



**Diseño e implementación de un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de  
planificación de trayectoria con arquitectura IoT**

Allauca Acosta, Luis Jonathan y Guerra Mestanza, Gabriel Alexander

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Loza Matovelle, David Cesar

19 de marzo 2021

# URKUND

## Document Information

Analyzed document	TESIS ALLAUCA-GUERRA_VURKUND.pdf (D95557539)
Submitted	2/15/2021 4:14:00 AM
Submitted by	
Submitter email	dcloza@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	dcloza.espe@analysis.arkund.com



## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Doc_fin.docx</b> Document Doc_fin.docx (D47220291) Submitted by: bgaguire@espe.edu.ec Receiver: lfescobar.espe@analysis.arkund.com		19
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE PALTAFORMA ROBOTICA PARA APLICACIONES EN ...</b> Document DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE PALTAFORMA ROBOTICA PARA APLICACIONES EN ... (D36039053) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.arkund.com		1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis Hidalgo_ Sinailin_Ukund.docx</b> Document Tesis Hidalgo_ Sinailin_Ukund.docx (D82356250) Submitted by: secardenas@espe.edu.ec Receiver: secardenas.espe@analysis.arkund.com		1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_Camino_Rojas.pdf</b> Document Tesis_Camino_Rojas.pdf (D59610945) Submitted by: mirojas@espe.edu.ec Receiver: wgaguilar.espe@analysis.arkund.com		1
<b>SA</b>	<b>L-T-0013.pdf</b> Document L-T-0013.pdf (D20990677)		3
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_Camino_Rojas_V_12_V1.pdf</b> Document Tesis_Camino_Rojas_V_12_V1.pdf (D60821952) Submitted by: smcamino@espe.edu.ec Receiver: wgaguilar.espe@analysis.arkund.com		1
<b>SA</b>	<b>tesis version c4.docx</b> Document tesis version c4.docx (D13515052)		4
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / PROYECTO DE TITULACION SIMBA.pdf</b> Document PROYECTO DE TITULACION SIMBA.pdf (D40111557) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.arkund.com		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13294/1/T-ESPEL-ENI-0397.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13294/1/T-ESPEL-ENI-0397.pdf</a> Fetched: 12/13/2019 7:33:57 AM		1



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño e implementación de un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de planificación de trayectoria con arquitectura IoT**” fue realizado por los señores **Allauca Acosta Luis Jonathan y Guerra Mestanza Gabriel Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolqui, 1 Marzo del 2021



DAVID CESAR  
LOZA  
MATOVELLE

.....  
**Loza Matovelle David César**

C. C. 1708661549



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, *Allauca Acosta Luis Jonathan* y *Guerra Mestanza Gabriel Alexander* con cédulas de ciudadanía n° 1722883855 y 1717185381 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de planificación de trayectoria con arquitectura IoT** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 12 de Febrero del 2021

Allauca Acosta Luis Jonathan

C.C.: 1722883855

Guerra Mestanza Gabriel Alexander

C.C.: 1717185381



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros *Allauca Acosta Luis Jonathan* y *Guerra Mestanza Gabriel Alexander* con cédulas de ciudadanía n°1722883855 y 1717185381, *autorizamos* a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de planificación de trayectoria con arquitectura IoT** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 12 Febrero 2021

Allauca Acosta Luis Jonathan

C.C.:1722883855

Guerra Mestanza Gabriel Alexander

C.C.: 1717185381

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia y amigos que siempre me han apoyado a lo largo de mi formación académica.

A mi abuelo Aníbal Acosta, quien, a pesar de no encontrarse en este mundo terrenal, siempre me ha guiado sus enseñanzas a lo largo de mi travesía por esta grandiosa Universidad.

A mis padres Luis y Geovana que siempre me han apoyado y dado consejo para llegar a convertirme en la persona que soy ahora.

A mi abuela María Criollo quien es el pilar de mi vida y siempre me ha empujado adelante en cualquier problema.

A mi hermano, quien, aunque es menor, siempre me comparte una sonrisa la cual logra darme fuerza para superar cualquier dificultad.

**Luis Jonathan Allauca Acosta**

### **Dedicatoria**

Dedico el presente trabajo a todas aquellas personas que me han acompañado en este largo camino para alcanzar mi título que permita desenvolverme como profesional.

Mi madre Verónica Elizabeth Mestanza Rodríguez quien con todo su sacrificio y amor me ha brindado todas las facilidades para concentrarme en obtener conocimiento y llegar a esta tan preciada meta.

Mis abuelos Wilfrido Mestanza y Mariana Rodríguez que en base a sus cuidados y cariño me han formado como un hombre de bien con el interés por la ciencia

Mis tíos Gabriel Mestanza, Susana Rodríguez, José Rodríguez por su preocupación a lo largo de mi desempeño estudiantil.

Jose Ángel Pollatos que ha sido siempre un apoyo tanto para mi madre como para mi ya que sin el en muchas ocasiones mi camino pudo complicarse.

Y finalmente a todos mis queridos amigos con quienes tuve el placer de compartir momentos que me han llevado a donde me encuentro actualmente.

**Gabriel Alexander Guerra Mestanza**

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer a toda mi familia y amigos que siempre me brindan apoyo y ayudan a realizar cualquier proyecto que me propongo y resolver todo tipo de problemas.

Agradezco a mi padre Luis Allauca, quien siempre me ha inculcado el valor del trabajo y me ha inculcado los conocimientos básicos y amor a esta carrera desde mi infancia mediante el trabajo práctico y guiado.

Agradezco a mi madre Geovana Acosta, quien siempre me ha inculcado el valor de la honradez y trabajo duro para obtener mis metas, siendo siempre humilde y respetuoso.

Agradezco a mis abuelos María Criollo y Aníbal Acosta por cuidarme desde mi nacimiento y siempre estar a mi lado en cualquier problema y aunque mi abuelo no se encuentre en este mundo, sé que sus enseñanzas siempre me permitirán crecer.

Agradezco al Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica, la carrera de ingeniería en mecatrónica y todos los profesores que forman esta gran familia y me han transmitido el conocimiento necesario para iniciar mi vida profesional sin problemas. Agradezco especialmente al Ing. Luis Escobar e Ing. David Loza por ser mis guías y amigos desde el inicio de mis estudios universitarios y siempre ayudándome en cualquier duda, inquietud y problema, especialmente a lo largo del desarrollo de este proyecto de titulación.

Agradezco a mi compañero y amigo Gabriel Guerra, quien me ha dado la confianza y reto para realizar este proyecto y muchos otros logrando reconocimientos no pensados al inicio. Agradezco a mis amigos Gis, Brandon, Lucho y Sebas con quienes compartí toda mi carrera y se han convertido en verdadero amigos, colegas y compañeros.

**Luis Jonathan Allauca Acosta**



## **Agradecimiento**

Con el paso de los años siempre pensé que los logros que he ido recolectando a lo largo de mi vida eran solo míos, sin embargo, no pude estar más equivocado. Yo no habría llegado al lugar en el que me encuentro sino fuera por personas increíbles las cuales me han apoyado alentado tolerado e inspirado con las cuales estoy agradecido.

Iniciando con mi madre Verónica Mestanza que gracias a su sacrificio de viajar a tierras lejanas y a su arduo trabajo me ha permitido seguir con mi educación en cada paso que he dado en la búsqueda de conocimientos y también por todo el amor que me ha brindado en los buenos y malos momentos. Mis abuelitos Wilfrido y Mariana que han estado conmigo durante toda mi vida brindando el amor y comprensión que he necesitado. Puedo asegurar que gracias a ellos es que me he convertido en el hombre que soy ahora

A Gabriela Mestanza, Susana Rodríguez, José Rodríguez, José Pollatos por toda su fe y alegría en los momentos que hemos compartido a lo largo de mi vida.

Al ingeniero Luis Fernando Escobar Carvajal y David Cesar Loza Matovelle por su guía a lo largo de este y otros proyectos que hemos llevado a cabo siempre entregándonos pautas para ser mejores profesionales y sobre todo personas.

A mi querido amigo Luis Jonathan Allauca Acosta por todo su apoyo y colaboración en cada reto que hemos tenido, obteniendo logros increíbles tanto nacionales como internacionales. Y por último mi otra familia, Stuart, Massiel, Alexander, Mateo, Edwin, Walter, Victoria y Andrés que han contribuido en mi crecimiento ya que sin ellos no hubiera llegado a donde estoy.

**Gabriel Alexander Guerra Mestanza**

**Tabla de contenidos**

Análisis Urkund .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Tabla de contenidos.....	10
Lista de Tablas.....	18
Lista de Figuras .....	22
Resumen .....	29
Abstract.....	30
Glosario.....	31

Capítulo I.....	34
Generalidades.....	34
Antecedentes.....	34
Trabajos Preliminares.....	37
Importancia y Justificación.....	39
Objetivos.....	40
Objetivo General.....	40
Objetivo Específico.....	40
Alcance.....	41
Estructura del Documento.....	42
Capítulo II.....	44
Estado del Arte.....	44
Sistema Ciber-Físicos.....	44
Ventaja de los Sistemas Ciber-Físicos.....	45
Aplicaciones de sistemas ciber-físicos.....	46

Sistemas Robóticos .....	47
Sistemas Robóticos de Manipulación.....	48
Sistemas robóticos de información y control .....	49
Sistemas robóticos móviles.....	50
Robótica en la Nube.....	59
Computación en la Nube.....	60
Aprendizaje Colaborativo de Robots.....	60
Planificación de Trayectoria .....	61
Esquemas de navegación en robots móviles.....	61
Planificación de la ruta .....	62
Métodos clásicos de Planificación.....	62
Generación de caminos.....	64
Protocolos de Comunicación.....	65
Arquitectura Cliente/Servidor .....	65
Arquitectura Publicador/Suscriptor .....	66

Capítulo III.....	67
Metodología y Diseño del Sistema .....	67
Metodología de Diseño .....	67
Requerimientos.....	68
Diseño de sistemas.....	68
Dominio específico del diseño .....	69
Integración de sistemas .....	69
Verificación/ Validación .....	69
Modelado y análisis de modelo.....	69
Producto .....	70
Diseño de Subsistemas.....	70
Matriz de evaluación para análisis y decisión en el diseño de subsistemas .....	71
Diseño de Subsistema Mecánico.....	71
Arquitectura del Prototipo .....	72
Sistema de Movimiento del Prototipo Móvil .....	75

Elementos del Subsistema Mecánico .....	80
Integración de Subsistema Mecánico.....	88
Simulación y validación de diseño.....	92
Diseño del Subsistema Electrónico .....	94
Diseño .....	95
Integración de Subsistema Electrónico .....	107
Integración Subsistema Electrónico y Subsistema Mecánico.....	109
Primer Nivel .....	109
Segundo Nivel .....	110
Tercer Nivel.....	110
Subsistema de Control .....	112
Control de Velocidad.....	112
Control de Orientación.....	123
Localización Local.....	125
Subsistema Tics.....	126

Procesamiento y Conversión de Datos.....	126
Comunicación del Sistema .....	129
Subsistema de Localización Global.....	134
Análisis y decisión del sistema de localización global por visión artificial .....	136
Proceso para localización global .....	140
Subsistema de Planificación de Trayectoria .....	144
Selección de Método de Planificación de Ruta .....	145
Integración de Subsistema de Planificación de Trayectoria .....	147
Validación.....	149
Integración global .....	151
Algoritmo de funcionamiento global.....	151
Algoritmo de control de actuadores .....	153
Algoritmo de control individual.....	153
Algoritmo de control central .....	136
3.1.1.    Modo IoT .....	141

Capítulo IV.....	142
Implementación y Resultados .....	142
Construcción e Implementación .....	142
Hardware .....	142
Software.....	146
Pruebas de Funcionamiento .....	151
Odometría Trayectoria Vertical.....	151
Odometría Trayectoria con Variación Angular .....	153
Corrección de Odometría con Visión Artificial .....	154
Planificación de Ruta.....	155
Trabajo Colaborativo.....	158
Capítulo V.....	161
Conclusiones y recomendaciones .....	161
Conclusiones .....	161
Recomendaciones .....	162



Trabajos Futuros .....	163
Bibliografía .....	165
Anexos .....	178

### Lista de Tablas

Tabla 1 Alcance del Sistema Multirobot Aplicado a los Subsistemas Planteados .....	41
Tabla 2 Aplicaciones de Sistemas Ciber-Físicos.....	46
Tabla 3 Aplicaciones de Sistemas SCF en Robótica .....	47
Tabla 4 Historia y Evolución de la Robótica Móvil .....	52
Tabla 5 Clasificación de Robots Móviles Terrestres .....	53
Tabla 6 Sistemas de Locomoción para Robots Móviles .....	73
Tabla 7 Matriz de Evaluación sobre Sistema de Locomoción.....	74
Tabla 8 Tipos de Ruedas .....	76
Tabla 9 Matriz de Evaluación sobre Tipo de Rueda .....	77
Tabla 10 Configuraciones para Robots Móviles.....	78
Tabla 11 Matriz de Evaluación sobre Configuración de las Ruedas .....	79
Tabla 12 Resumen Selección de Arquitectura del Robot Móvil .....	80
Tabla 13 Modelos de Llantas Omnidireccionales Disponibles en el Mercado .....	80
Tabla 14 Resumen Selección de Ruedas Omnidireccionales .....	82

Tabla 15 <i>Tipos de Motores Eléctricos</i> .....	82
Tabla 16 <i>Resumen de Selección de Actuadores del Sistema de Movimiento</i> .....	83
Tabla 17 <i>Parámetros para Dimensionamiento Motor DC</i> .....	84
Tabla 18 <i>Especificaciones Técnicas Motor DC Chihai</i> .....	87
Tabla 19 <i>Tipos de Materiales para Estructura Base</i> .....	87
Tabla 20 <i>Matriz de Selección de Material para Estructura Base</i> .....	88
Tabla 21 <i>Tipos de Sistemas de Localización Local</i> .....	97
Tabla 22 <i>Matriz de Selección Sistema de Localización Local</i> .....	98
Tabla 23 <i>Opciones de Tarjeta de Adquisición de Datos</i> .....	100
Tabla 24 <i>Matriz de Selección de Tarjeta de Adquisición de Datos</i> .....	101
Tabla 25 <i>Especificaciones de ESP32 (Tarjeta de Adquisición de Datos)</i> .....	101
Tabla 26 <i>Opciones de Controlador del Robot</i> .....	102
Tabla 27 <i>Especificaciones Técnicas Raspberry PI 3B+</i> .....	103
Tabla 28 <i>Consumo Energético Subsistema Electrónico</i> .....	103
Tabla 29 <i>Velocidades y Direcciones del Sistema del Robot Omnidireccional</i> .....	117

Tabla 30 <i>Parámetros de Funciones de Transferencia de las Plantas</i> .....	121
Tabla 31 <i>Sintonización por el Método de Ziegler Nichols en Controlador PI</i> .....	121
Tabla 32 <i>Parámetros de Controlador PI para cada Planta</i> .....	122
Tabla 33 <i>Tipo de Servicios IOT</i> .....	131
Tabla 34 <i>Matriz de Selección de Servicios IOT</i> .....	133
Tabla 35 <i>Opciones para sistema de localización global</i> .....	134
Tabla 36 <i>Comparación y decisión de Sistema de localización global</i> .....	135
Tabla 37 <i>Clasificación propuesta para cámaras de video en visión artificial</i> .....	138
Tabla 38 <i>Decisión de cámara de video</i> .....	139
Tabla 39 <i>Especificaciones de equipo de video</i> .....	140
Tabla 40 <i>Características del Planificador de Trayectoria</i> .....	145
Tabla 41 <i>Métodos de Planificación de Trayectoria</i> .....	146
Tabla 42 <i>Matriz de Selección del Método de Planificación de Trayectoria</i> .....	147
Tabla 43 <i>Fabricación de los Prototipos</i> .....	144
Tabla 44 <i>Especificaciones Técnicas de los Prototipos</i> .....	144

Tabla 45 <i>Entorno de Pruebas para Trabajo Colaborativo</i> .....	146
Tabla 46 <i>Resumen Clasificación de Modos Automáticos de Funcionamiento</i> .....	148
Tabla 47 <i>Distancias en Trayectoria Recta a Diferentes Metas</i> .....	151
Tabla 48 <i>Errores en Trayectoria Recta a Diferentes Metas</i> .....	152
Tabla 49 <i>Errores generados en Seguimiento de Ruta con Localización Externa</i> .....	155
Tabla 50 <i>Análisis Comparativo Localización Local vs Global</i> .....	155
Tabla 51 <i>Comparación de la Capacidad de Encontrar Ruta</i> .....	157
Tabla 52 <i>Análisis Comparativo con Parámetros de Tiempo y Capacidad de Clasificación</i> .....	159
Tabla 53 <i>Tiempo de Funcionamiento de Cada Robot en Proceso de Clasificación</i> .....	160

### Lista de Figuras

Figura 1 <i>Áreas de Conocimiento de Sistemas Ciber-Físicos</i> .....	34
Figura 2 <i>Despliegue de un SM en un entorno 2D general</i> .....	35
Figura 3 <i>Robot Autónomo para Robótica Colaborativa</i> .....	38
Figura 4 <i>Diseño de Robot Omnidireccional y Trayectorias para Prueba</i> .....	39
Figura 5 <i>Capacidades básicas de un SCF</i> .....	44
Figura 6 <i>Sistema Robótico de Manipulación Aplicado en Pintura de Superficies</i> .....	49
Figura 7 <i>Esquema de Control de un Grupo de Robots para Información y Control</i> .....	49
Figura 8 <i>Historia y Evolución de la Robótica Móvil</i> .....	51
Figura 9 <i>Clasificación de Robots Móviles por su Entorno</i> .....	53
Figura 10 <i>Sistemas de Localización de Robots Móviles</i> .....	54
Figura 11 <i>Ubicación de encoder en rueda</i> .....	56
Figura 12 <i>Proceso de Funcionamiento de un Sistema de Localización con Unidad Inercial IMU</i> ..	57
Figura 13 <i>Implementación y proceso de obtención de posición de robot y objetos con uso de visión artificial</i> .....	58
Figura 14 <i>Ejemplo del desarrollo de un planificador de campo potencial</i> .....	63

Figura 15 <i>Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos</i> .....	64
Figura 16 <i>Proceso de diseño de la norma VDI 2206</i> .....	67
Figura 17 <i>Elementos y Tareas para el Diseño del Subsistema Mecánico</i> .....	71
Figura 18 <i>Clasificación de Robots Terrestres</i> .....	72
Figura 19 <i>Clasificación Robots Móviles con Ruedas por su Forma</i> .....	74
Figura 20 <i>Diagrama de Cuerpo Libre del Sistema (DCL)</i> .....	84
Figura 21 <i>Motor Chihai DC 6 V, Gear motor</i> .....	86
Figura 22 <i>Ensamble entre Llantas Omnidireccionales y Motor DC</i> .....	89
Figura 23 <i>Acople Base Estructural-Conjunto de Movimiento</i> .....	90
Figura 24 <i>Base estructural</i> .....	90
Figura 25 <i>Subsistema Mecánico del Robot</i> .....	91
Figura 26 <i>Cubierta de robot</i> .....	91
Figura 27 <i>Deformación de soporte</i> .....	93
Figura 28 <i>Deformación en estructura base</i> .....	94
Figura 29 <i>Elementos y tareas para el diseño del subsistema electrónico</i> .....	95

Figura 30 <i>Encoder de efecto hall</i> .....	96
Figura 31 <i>Circuito de control de Motor aplicando transistores TIP120</i> .....	98
Figura 32 <i>Proceso para sistemas de adquisición de datos</i> .....	99
Figura 33 <i>Distribución de Elementos en Circuito de Potencia</i> .....	104
Figura 34 <i>Distribución de Elementos en Circuito de Control</i> .....	105
Figura 35 <i>Fuentes de Alimentación Circuito de Control y de Potencia</i> .....	106
Figura 36 <i>Tarjeta de Conexión PCB Sistema de Movimiento</i> .....	107
Figura 37 <i>Tarjeta de Conexión PCB de Regulación de Voltaje</i> .....	108
Figura 38 <i>Tarjeta de Conexión PCB de DAQ e IMU</i> .....	108
Figura 39 <i>Distribución electrónica y mecánica de Plataforma del Robot Nivel 1</i> .....	109
Figura 40 <i>Plataforma del Robot Nivel 2</i> .....	110
Figura 41 <i>Plataforma del Robot Nivel 3</i> .....	111
Figura 42 <i>Integración Subsistema Mecánico y Electrónico</i> .....	111
Figura 43 <i>Diagrama de Subsistema de Control</i> .....	112
Figura 44 <i>Sistema de Coordenadas Plataforma Móvil</i> .....	113



Figura 45 <i>Tipos de Movimientos en Robots Plataformas Omnidireccionales</i> .....	116
Figura 46 <i>Esquema de Diagrama de Control de la Variable Velocidad</i> .....	117
Figura 47 <i>Motor DC controlado por Voltaje de Armadura</i> .....	118
Figura 48 <i>Circuito Eléctrico del Motor DC</i> .....	118
Figura 49 <i>Sistema Mecánico en Motor DC</i> .....	119
Figura 50 <i>Prueba de Controlador PI para la Planta 1</i> .....	123
Figura 51 <i>Proceso del Control de Trayectoria</i> .....	124
Figura 52 <i>Control de Orientación del Robot</i> .....	125
Figura 53 <i>Aplicación del Subsistema Tics en el Sistema Multirobot</i> .....	126
Figura 54 <i>Comunicación entre DAQ Y Tarjeta de Control</i> .....	129
Figura 55 <i>Comunicación entre Bróker Central y Tarjetas de Control de Cada Robot</i> .....	130
Figura 56 <i>Integración en la Comunicación entre Bróker Central y la Nube</i> .....	133
Figura 57 <i>Posición de cámara y formación de planos de visualización</i> .....	137
Figura 58 <i>Proceso de obtención de coordenada real de objeto dentro de entorno censado por cámara cenital</i> .....	140
Figura 59 <i>Obtención de máscara binaria de objeto rojo por medio de librerías de OpenCV</i> .....	141

Figura 60 <i>Algoritmo de localización global</i> .....	144
Figura 61 <i>Implementación de Algoritmo de Campos Potenciales</i> .....	149
Figura 62 <i>Simulación del Método de Campos Potenciales</i> .....	150
Figura 63 <i>Comparación de Algoritmo de Planificación de Trayectoria con Optimización</i> .....	151
Figura 64 <i>Configuración de comunicación y control en nodos entre control, bróker central y nube.</i> .....	152
Figura 65 <i>Configuración de comunicación y control del nodo de cada robot</i> .....	152
Figura 66 <i>Algoritmo de funcionamiento de la tarjeta ESP32 en el control de actuadores y adquisición de datos</i> .....	153
Figura 67 <i>Algoritmo de control independiente del robot</i> .....	154
Figura 68 <i>Algoritmo de control del bróker para control y organización de los robots.</i> .....	136
Figura 69 <i>Algoritmo general del modo automático del sistema multirobot.</i> .....	137
Figura 70 <i>Proceso de movimiento de robot de punto a punto</i> .....	138
Figura 71 <i>Proceso automático para trayectoria con obstáculos simulados</i> .....	139
Figura 72 <i>Proceso automático para trayectoria con obstáculos reales.</i> .....	139
Figura 73 <i>Proceso de clasificación de objetos con obstáculos y objetos simulados.</i> .....	140

Figura 74 <i>Algoritmo de clasificación de objetos.</i> .....	141
Figura 75 <i>Comparación de diseño y resultados de Robot Omnidireccional</i> .....	142
Figura 76 <i>Comparación entre diseño y bases de prototipo construido.</i> .....	143
Figura 77 <i>Implementación de Prototipos para Sistema Multirobot</i> .....	145
Figura 78 <i>Entorno Controlado para el Sistema Multirobot</i> .....	146
Figura 79 <i>Pantalla Principal Sistema Multirobot</i> .....	146
Figura 80 <i>Interfaz HMI Pantalla de Configuración</i> .....	147
Figura 81 <i>Interfaz HMI Modo de Funcionamiento Manual</i> .....	148
Figura 82 <i>Interfaz HMI Modo Automático de Funcionamiento</i> .....	149
Figura 83 <i>Interfaz HMI Modo de Funcionamiento IOT</i> .....	150
Figura 84 <i>Funcionamiento del Modo de Trayectoria con Obstáculos Simulados</i> .....	150
Figura 85 <i>Variación en ángulo teórico vs practico</i> .....	153
Figura 86 <i>Seguimiento de Trayectoria Generada Teórica vs Real</i> .....	154
Figura 87 <i>Casos de Prueba para Planificación de Trayectoria a) Casos Simples, b) Casos Intermedios, c) Casos Complejos</i> .....	156
Figura 88 <i>Comparación de la Capacidad de Encontrar Ruta</i> .....	157

Figura 89 <i>Comparación del Costo Computacional en Algoritmos de Planificación de Ruta</i> .....	158
Figura 90 <i>Caso de Prueba para Sistema Multirobot</i> .....	159
Figura 91 <i>Comparación en base a la Cantidad de Procesos de Clasificación en 45 [min]</i> .....	160

## Resumen

En el presente proyecto se muestra el diseño y construcción de un sistema multirobot para aplicaciones colaborativa. Se diseño 3 prototipos de robots móviles omnidireccionales escalables mediante el uso de elementos accesibles en el mercado local. El sistema multirobot cuenta con una arquitectura centralizado y administrado por un Broker con implementación de ROS para la comunicación local e IoT, mediante el protocolo MQTT, para su monitoreo y control desde la nube. Como aplicación de prueba para este sistema, la clasificación de objetos por color es implementada y mediante la utilización de visión artificial tanto para el reconocimiento de objetos y obstáculos como localización de los robots dentro de un entorno controlado, permite la eficiente corrección de errores durante su funcionamiento. Se utiliza el método de Campos potenciales y A\* para la generación de rutas y un algoritmo de planificación simple para determinar la movilización de varios robots al cumplir con la tarea de clasificación. Los resultados obtenidos muestran un error menor del 5% tanto en el seguimiento de ruta como su objetivo final en diversas circunstancias de prueba de movilidad desde la más simple a la más compleja y al final se entrega un prototipo modular, escalable, de fácil control, fácil configuración y de fácil réplica o mejora junto con un entorno controlado y monitoreado totalmente con visión artificial; así como, un software escalable y de fácil uso para el usuario.

### Palabras Clave:

- **ROBÓTICA MÓVIL**
- **ROBÓTICA COLABORATIVA**
- **ROBÓTICA EN LA NUBE**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**

### **Abstract**

This project shows the design and construction of a mobile multirobot system for collaborative applications. 3 prototypes of scalable omnidirectional mobile robots are designed by using elements accessible in the local market. The multirobot system has centralized control and is managed by a central Broker with ROS implementation for local communication and IoT, through the MQTT protocol, for monitoring and control from the cloud. As a test application for this system, the classification of objects by color is implemented and the use of artificial vision both for the recognition of objects and obstacles and the location of the robots within a controlled environment, allows the efficient correction of errors during their operation. . The Potential Fields and A \* method is used for the generation of routes and a simple planning algorithm is used to determine the mobilization of several robots when fulfilling the classification task. The results showed an error of less than 5% in both the route tracking and its final objective in various mobility test circumstances from the simplest to the most complex and in the end a modular, scalable, easily controlled, easy prototype is delivered setup and easy replication or upgrade along with a fully machine vision controlled and monitored environment; as well as a scalable and user-friendly software.

#### **Keywords:**

- **MOBILE ROBOTICS**
- **COLLABORATIVE ROBOTICS**
- **ROBOTICS IN THE CLOUD**
- **ARTIFICIAL VISIÓN**

## Glosario

$F_{rk}$ : Fuerza de rozamiento

$u_{rk}$ : Coeficiente de rozamiento dinámico

$T$ : Torque del sistema

$\emptyset_{rueda}$ : Diámetro de la rueda

$V_{iw}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ): Vector de velocidad correspondiente a la rotación de la rueda.

$R_w$ : Radio de la rueda omnidireccional

$\omega_{iw}$ : Velocidad angular de la rueda omnidireccional  $i$

$V_{ir}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ): Vector de velocidad tangencial del rodillo libre que toca la superficie de locomoción.

$v_x$ ;  $v_y$ : Representan las componentes de velocidad lineal del robot omnidireccional en los ejes X e Y

$\omega_z$ : Representan las componentes de velocidad angular del robot omnidireccional

$L_1$ : La distancia desde cada eje de la rueda al centro de gravedad del robot en el eje X

$L_2$ : La distancia desde cada eje de la rueda al centro de gravedad del robot en el eje Y

$V_w$ : es el vector de velocidad angular correspondiente a la rueda

$V_0$ : es el vector de velocidad en coordenadas cartesianas representada en (11)

$V$ : Voltaje de excitación

$R$ : Resistencia del circuito

$L$ : Bobina interna

$e$ : Fuerza contraelectromotriz

$T_m$ : Torque del motor

$J$ : Momento de inercia equivalente del motor cuando tiene carga

$w$ : Velocidad angular del motor

$B$ : Coeficiente fricción del motor

$R_{rueda}$ : radio de la rueda

$n$ : reducción del motor

$C_e$ : resolución del encoder

$A = \text{matrix de cámara}$

$f_x, f_y = \text{Distancia focal}$

$C_x, C_y$ : Centros ópticos



$coef_{dis}$ : Coeficientes de distorción

$c_x, c_y$ : Coordenadas de centro del contorno

$x_i, y_i$ : Coordenadas de cada punto que forman el contorno del objeto

$s$ : Factor de escala

$u, v$ : coordenadas en pixeles

$A$ : Matriz intrínseca de la cámara (ec. 26)

$(R|t)$ : Matriz extrínseca de rotación – traslación

$X, Y, Z$ : Coordenadas en mundo real

$U(q)$ : Representa la sumatoria de todos los campos.

$U_{att}(q)$ : Campos atractivos generados por la meta.

$U_{rep}(q)$ : Campos repulsivos generados por los obstáculos.

$k_a$ : coeficiente positivo de gravedad

$(q - q_d)$ : representa la distancia euclídea entre la posición actual y el objetivo a alcanzar

$k_b$ : coeficiente de repulsión

$d(q)$ : distancia entre el robot y el obstáculo

$d_0$ : distancia que afecta la fuerza repulsiva del obstáculo

## Capítulo I

### Generalidades

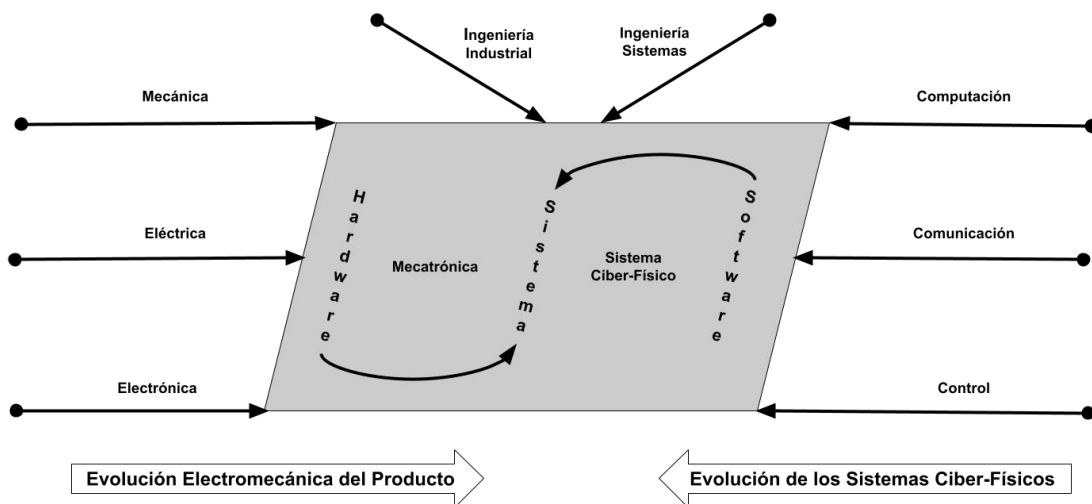
El primer capítulo presenta una descripción de la necesidad de implementar un sistema multirobot centralizado en el cual cada uno de los dispositivos posean un sistema de movimiento autónomo y que permitan la clasificación de objetos.

Además, se muestra los antecedentes en base a proyectos llevados a cabo tanto dentro como fuera del país orientados a la educación como a casos reales en la industria. Se presenta los objetivos generales y específicos de la investigación y el alcance que establecido del proyecto.

### Antecedentes

Figura 1

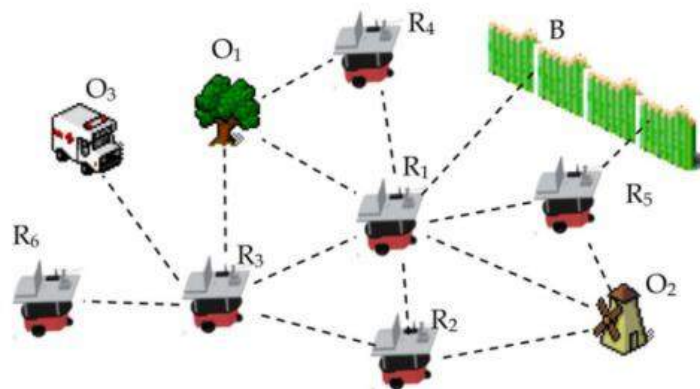
*Áreas de Conocimiento de Sistemas Ciber-Físicos*



Con el avance constante de la tecnología una nueva rama de la ingeniería ha ganado fuerza en los últimos años, los sistemas ciber-físicos (SCF) son aquellos que combinan áreas de conocimiento como el procesamiento de información, comunicación e informática con las tecnologías con componentes físicos y sistemas de ingeniería (Wan et al., 2011). Las metas de este campo de investigación consisten en combinar la información de múltiples dominios en un sistema consistente para respaldarlo con los principios básicos de las ciencias naturales, formales, técnicas, sociales y humanas, los dominios que forman parte de esta ciencia se pueden observar en la Figura 1. Las principales investigaciones en esta área se centran en la simbiosis de las partes del sistema físico y cibernético, la integración de tecnologías habilitadoras, análisis de comportamiento del sistema, operación de sistemas autónomos, comportamiento de sistemas inteligentes entre otros (Horvath & Gerritsen, 2012).

**Figura 2**

*Despliegue de un SM en un entorno 2D general*



Una de las aplicaciones dentro de los sistemas ciber- físicos es la capacidad de construir y operar sistemas con comportamiento autónomo y con capacidad de realizar tareas, lo que puede

ser visualizado en los sistemas multirobot (SM). Los sistemas antes mencionados consisten en un entorno en el que varios robots cooperan para realizar tareas complejas que de otro modo serían imposible de lograr para un solo robot poderoso (Gautam & Mohan, 2012). El método aplicado para este tipo de sistemas consiste en emplear en subproblemas simples a robots permitiéndoles interactuar entre sí para encontrar soluciones a problemas complejos. Los SM brindan ciertas ventajas entre ellas son generalmente más eficientes en el tiempo para llevar a cabo cierta tarea, menos propensas a puntos únicos de falla, y típicamente exhiben múltiples capacidades, que en muchos casos dan una solución más efectiva a un problema dado, y finalmente la aplicación de sistemas multirobot resulta menos costoso y más flexible que la implementación de un único robot (Darmanin & Bugeja, 2017). En la Figura 2 se muestra el comportamiento de un sistema multirobot encargado de llevar a cabo diferentes tareas.

Al implementar un sistema multirobot deben ser tomadas en cuenta una variedad de características con el objetivo de llevar de mejor manera la tarea asignada entre ellas se encuentra la arquitectura, comunicación, asignación de tareas y aprendizaje. La arquitectura y comunicación SM son relevantes para todos los tipos, ya que estos enfoques especifican cómo se organizan e interactúan los miembros del equipo robot. Además, cuando los robots varían en capacidades, surgen desafíos para determinar qué robots deben realizar qué tareas. Finalmente, aprender en equipos multirobot es de particular interés por lo cual se busca diseñar equipos que sean adaptativos y puedan aprender nuevos comportamientos.

El diseño de la arquitectura general para el SM tiene un impacto significativo en la robustez y escalabilidad del sistema (Parker, 2008). Existe una variedad de arquitecturas para sistemas multirobot; lo más comunes son:

- **Centralizados:** el diseño del control general se coordina a todo el sistema desde un único punto, aunque a menudo se puede complicar debido a la dificultad de comunicar todo el estado del sistema. Aplicable a casos en que el controlador centralizado tiene un punto de vista claro desde el cual observar a los robots, y puede transmitir fácilmente mensajes grupales para todos.
- **Jerárquicos:** cada robot supervisa las acciones de un grupo relativamente pequeño de otros robots, cada uno de los cuales supervisa otro grupo, y así sucesivamente, hasta el robot más bajo, que simplemente ejecuta su parte de la tarea. Un punto de debilidad para la arquitectura de control jerárquico es recuperarse de fallas de robots con alto control árbol.
- **Descentralizados:** son el enfoque más común para los SM, y típicamente requieren que los robots tomen acciones basadas solo en el conocimiento local a su situación. Este enfoque de control puede ser altamente robusto al fracaso, ya que ningún robot es responsable para el control de cualquier otro robot.
- **Híbrido:** combinan el control local con enfoques de alto nivel para lograr robustez y la capacidad de influir acciones a través de objetivos globales, planes o control. Muchos sistemas multirobot hacen uso de arquitecturas híbridas (Khoshnevis & Bekey, 1998).

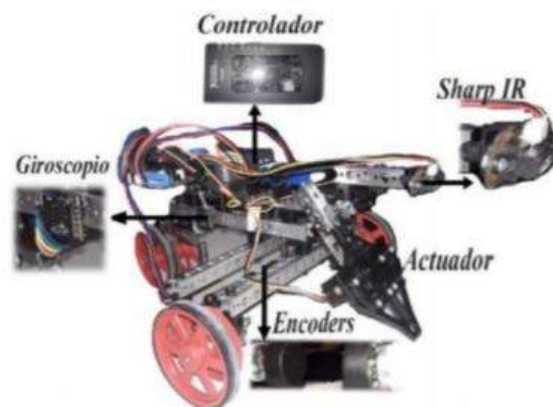
### ***Trabajos Preliminares***

A nivel mundial se han llevado a cabo una gran variedad de trabajos enfocados en SM como el que se muestra en (Sahin et al., 2008), en el cual se analiza las características de la robótica de enjambre para la coordinación de grandes cantidades de robots en el cual se presenta

desde su definición, hasta el análisis de problemas de esta técnica. Además de los ejemplos claros de la aplicación de sistemas multirobot se da un enfoque de la planificación de trayectoria como se puede observar en el trabajo de (Z. Wang et al., 2013), la planificación de rutas es un método fundamental para robots en movimiento atravesando campos abiertos con obstáculos, existe una gran variedad de métodos en el caso de este artículo es aplicado Q-learning es un modelo independiente de aprendizaje de refuerzo, que se puede utilizar en la planificación de caminos para robots en una colaboración multirobot.

**Figura 3**

*Robot Autónomo para Robótica Colaborativa*



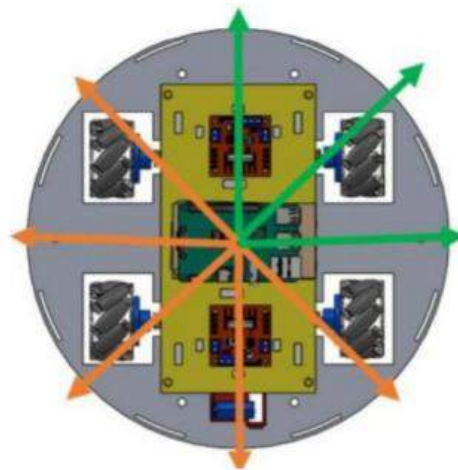
**Nota.** Tomado de Diseño e implementación de una arquitectura IOT para robótica colaborativa (p.35) por González Bonifaz, D. E., & Verdugo Cabrera, 2018.

En investigaciones nacionales se puede encontrar trabajos colaborativos como es el caso de (González & Verdugo, 2018) el cual consta de un sistema Multirobot, con arquitectura IoT y el planificador automático que tiene como objetivo de formar un clasificador de elementos, con control de proceso por medio de un planificador automático el cual se encarga de trazar rutas y

hacer uso de los recursos disponibles. El diseño del robot implementado para este SM se presenta en la Figura 3. Además de la existencia de proyectos en los cuales se tiene la construcción de un sistema multirobot que consta de una red descentralizada que presentan una retroalimentación de posición y movimiento de cada autómeta (Aguirre & Moyano, 2019). En la Figura 4 se muestra el diseño de un robot omnidireccional con las posibles trayectorias que puede tener que posteriormente se utilizara para el trabajo colaborativo.

**Figura 4**

*Diseño de Robot Omnidireccional y Trayectorias para Prueba*



**Nota.** Tomado de Diseño E Implementación de un Sistema Multirobot Descentralizado para realizar Trabajo Colaborativo con Aplicaciones Logísticas, Flexibles Y Escalables (p.45), Aguirre Aymara & Moyano Cabezas, 2019.

### **Importancia y Justificación**

El estudio y aplicación de la robótica colaborativa es un punto clave de la investigación en la actualidad y con su creciente implementación en tareas industriales ha creado la necesidad de establecer nuevas alternativas y soluciones que se puedan proporcionar a los sistemas. Dentro

de los sistemas multirobot hay varios factores que se deben tomar en cuenta, para obtener una óptima aplicación, entre ellas la estrategia de control, disminuir los puntos de falla y la coordinación de los prototipos. El último factor juega un rol determinante por su interacción directa con el proceso, la administración eficiente de recursos y el tiempo que tardara el sistema en desempeñar la tarea.

La coordinación de los prototipos limita el desarrollo de la robótica móvil en un aspecto específica que es la adaptabilidad del sistema ante diferentes casos de estudio, impidiendo el desarrollo continuo de proyectos dentro de un panorama práctico y cambiante en el campo educativo. Para solventar la problemática se propone obtener un SM adaptativo, modular, escalable y apto para la investigación mediante el diseño y construcción de 3 robots móviles omnidireccionales dentro de un entorno controlado, monitoreado, dotado de una red centralizada y enfocado en aplicaciones colaborativas como la clasificación de objetos por color.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Diseñar e implementar un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de planificación de trayectoria con arquitectura IOT.

### ***Objetivo Específico***

- Replicar y mejorar el diseño de los prototipos de los robots móviles desarrollados en el Laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos para su aplicación en trabajo colaborativo de clasificación.



- Diseñar y construir un entorno controlado adecuado a las dimensiones de los robots a utilizarse.
- Adquirir la posición de cada robot móvil dentro del entorno controlado mediante el uso de un sistema de visión artificial.
- Implementar un algoritmo de planificación de trayectoria mediante el uso de un computador central dotado con ROS para alcanzar un objetivo asignado.
- Implementar un algoritmo de clasificación de objetos por color mediante el uso de un computador central dotado con ROS.
- Implementar una arquitectura IOT para la monitoreo y control conjunta de los robots.
- Analizar el comportamiento y rendimiento del funcionamiento conjunto del sistema multirobot.

## Alcance

**Tabla 1**

*Alcance del Sistema Multirobot Aplicado a los Subsistemas Planteados*

<b>Requerimientos Generales</b>			
<b>Sistema General</b>	<b>Subsistema Mecánico</b>	<b>Subsistema Eléctrico y electrónico</b>	<b>TICs</b>
Plataforma robótica flexible	Peso menor a 3 kg	Regulación de alimentación.	Implementación arquitectura IOT.
Plataforma robótica escalable	Estabilidad	Independencia de alimentación para potencia y control	Uso de software libre
Brindar maniobrabilidad	Actuador para agarrar pequeños objetos	Medición y Control de Velocidad	Implementación de ROS

<b>Requerimientos Generales</b>			
<b>Sistema General</b>	<b>Subsistema Mecánico</b>	<b>Subsistema Eléctrico y electrónico</b>	<b>TICs</b>
Sistema de Localización Preciso	Estructura modular	Sistema de Localización del Robot	Comunicación inalámbrica
Costo menor de \$450 por robot		Implementación de tarjetas de desarrollo comerciales	
Autonomía energética mayor a 30 minutos.			

Se plantea el diseño y construcción de un sistema multirobot (SM) de 3 unidades con capacidad de comunicación entre ellos, implementación de una arquitectura IOT y utilización de software libre (OS). Los robots que estén dentro del sistema enviarán y recibirán información a un ordenador central o broker para su administración, coordinación y corrección. La detección de posición y clasificación se realizará mediante el uso de un sistema de visión artificial dentro de un entorno controlado previamente diseñado. Los requerimientos se encuentran enlistados en la Tabla 1.

### **Estructura del Documento**

El documento del trabajo se estructura en cinco capítulos donde se muestra y describe la información y desarrollo del trabajo a realizar en la plataforma robótica móvil. En el capítulo 1 se presentan las generalidades y antecedentes que se tiene en el área de investigación, además se definen los objetivos al igual que el alcance del proyecto.

En el capítulo 2 se tiene la revisión del estado del arte en el campo de los sistemas ciberfísicos, robótica móviles aplicados en sistemas multirobot y visión artificial. Se presenta además

la conceptualización de los sistemas involucrados en la autonomía en trayectoria y posicionamiento.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo mecatrónico del sistema. Se detallarán el desarrollo de conceptos del sistema del robot móvil, selección de los elementos determinados para cada uno de los subsistemas que forman parte del proyecto basados en la norma de diseño VDI2206.

En el capítulo 4 se detallan los resultados obtenidos después de la construcción e implementación de lo desarrollado en el capítulo número 3. De igual manera se especifican las pruebas realizadas en la plataforma, así como, el análisis de resultados del sistema.

Finalmente, en el capítulo 5, se pueden encontrar las conclusiones, recomendaciones y propuestas para trabajos futuros.

## Capítulo II

### Estado del Arte

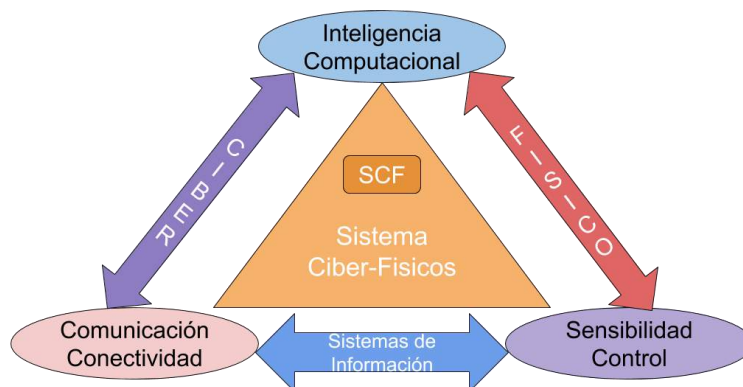
El segundo capítulo recopila la información teórica y técnica implementada en el desarrollo del proyecto. Se organiza desde temas generales a específicos, identificando los aspectos más importantes y resumiéndolos en diagramas o gráficos auxiliares.

#### Sistema Ciber-Físicos

(Cardin, 2019) define los sistemas ciber físicos (SCF) como sistemas diseñados que se crean a partir de la integración perfecta de algoritmos computacionales y componentes físicos como se puede observar en la Figura 5.

**Figura 5**

*Capacidades básicas de un SCF*



**Nota.** Tomado de Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework, Cardin, 2019.

Las áreas de investigación ejemplares de SCF incluyen la teoría y la práctica de la detección y manipulación de datos, la base de ingeniería de las interacciones ciber físicas, el diseño y la verificación de sistemas informáticos y la aplicación de metodologías SCF en diferentes campos, tales como sistemas inteligentes de energía, hogar inteligente, sistema de vehículos conectados y autónomos, prótesis médicas, dispositivos portátiles, internet de cosas y otros (Greer et al., 2019).

### ***Ventaja de los Sistemas Ciber-Físicos***

- **Integración:** La incorporación de redes de sensores inalámbricos en la nube es una parte importante de SCF, proporciona características de integración de red como las técnicas de control de acceso a los medios y sus efectos en la dinámica del sistema, middleware y software. (Haque et al., 2014).
- **Manejo de la incertidumbre:** La certeza es el proceso de proporcionar pruebas de que un diseño es válido y digno de confianza. Los sistemas físicos cibernéticos pueden ser capaces de evolucionar y operar con ambiente nuevo y poco confiable.
- **Mejor rendimiento del sistema:** SCF puede proporcionar mejoras en términos de retroalimentación y rediseño automático con interacción cercana de sensores e infraestructura cibernética.
- **Escalabilidad:** como parte de la computación en la nube, SCF puede proporcionar los recursos a los usuarios de acuerdo con sus requisitos

- **Tiempo de respuesta más rápido:** SCF aumentará el tiempo de respuesta rápido y facilitará la detección temprana de fallas, además de la utilización adecuada de recursos como el ancho de banda (H. Chen, 2017).

### ***Aplicaciones de sistemas ciber-físicos***

**Tabla 2**

*Aplicaciones de Sistemas Ciber-Físicos*

<b>Área</b>	<b>Aplicación</b>
Sistemas vehiculares y transporte	Transporte público. Diseño de vehículos ciber-físicos. Carga de vehículos eléctricos. Monitoreo de Carreteras.
Sistemas médicos y sanitarios	Dispositivos médicos implantables de soporte vital. Operación asistida por robot. Desarrollo de plataforma de aplicaciones médicas.
Casas inteligentes y edificios	Equipos electrónicos y control de climatización. Asistencia sanitaria en hogares inteligentes. Administración de energía en hogares inteligentes.
Administración de energía térmica	Minimizando el costo de electricidad. Colocación de carga de trabajo. Interacción ciber-física basada gestión térmica/energética.
Red Eléctrica y Sistemas de Energía	Modelado Energía renovable Aspecto relacionado con la seguridad.

**Aplicaciones de Sistemas SCF en Robótica.** Una de las aplicaciones dentro de los SCF es el campo de la robótica donde el principal desafío para los SM es el desarrollo de sistemas adaptativos, escalables, arquitectura abierta y centrados en la interoperabilidad. En la Tabla 3 se observa principios de diseño para sistemas SCF orientados a la robótica (Moisesescu et al., 2016).

**Tabla 3***Aplicaciones de Sistemas SCF en Robótica*

<b>Subsistemas</b>	<b>Componentes</b>
Sensores y Actuadores	Tecnologías de redes de sensores y actuadores. Sensores habilitados semánticamente. Arquitectura orientada a Servicios. Modelado de datos. Gestión de datos en tiempo real.
Human in the Loop	Humano a máquina: interacción humana – robot. Máquina a humano: robot - interacción humana. Interfaz hombre-máquina: realidad aumentada y virtual. SM: Contexto, gestión de robots múltiples para colaboración.
Control de robot Colaboración de robots	Sistemas de control de red Servicio de sistemas robóticos Sistemas inteligentes de soporte de decisiones integrados en robótica Aprendizaje automático Tecnologías semánticas

**Nota.** Tomado de A Cyber Physical Systems Approach for Robotic Systems Design (p44), Moisescu et al., 2016

### **Sistemas Robóticos**

Los sistemas robóticos representan medios técnicos para automatización de procesos complejos de producción permitiendo de esta forma la eliminación de tareas monótonas y repetitivas. En la producción contemporánea, la automatización de los procesos tecnológicos básicos es característica, pero las operaciones auxiliares se realizan manualmente. La práctica ha demostrado que muchas operaciones auxiliares de trabajo manual no pueden automatizarse por medios tradicionales razón por la cual es necesaria la fabricación y amplia aplicación de robots industriales con mecanismos multisegmento que poseen todos los grados de libertad activos. De esa manera, los robots representan máquinas multiusos, que satisfacen las demandas contemporáneas de la automatización de producción la generación de tecnología económica en

campos como la industria, minas, ciudades, hospitales, bajo el agua y otros ambientes (Sandler, 1999).

La clasificación general de los sistemas robóticos se puede enumerar de la siguiente forma:

- Sistemas robóticos de manipulación
- Sistemas robóticos de información y control.
- Sistemas robóticos móviles

### ***Sistemas Robóticos de Manipulación***

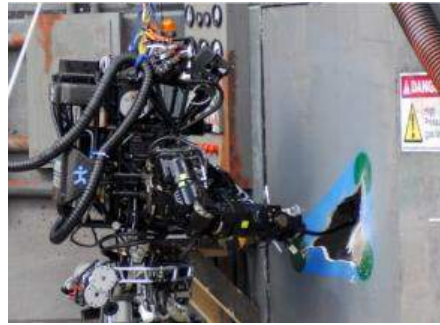
Muy pocas definiciones de manipulación aparecen en la literatura sobre robótica entre ellas se define la manipulación como la función de utilizar las características de un objeto captado para lograr una tarea (Murray et al., 2017), en la Figura 6 se puede observar una aplicación de un manipular orientado a la pintura de superficies. Los sistemas de robot de manipulación se pueden dividir en tres tipos:

- Manipuladores Automáticos: se utilizan principalmente en la producción industrial (robots industriales y complejos robotizados)
- Manipuladores de Control Remoto: Aplicados en condiciones hostiles (radiación nuclear, contaminación del aire, peligro de explosión, altas o bajas temperaturas y alta presión)
- Manipuladores de Control Manual: Únicamente para trabajo pesado de carga y descarga.



Figura 6

*Sistema Robótico de Manipulación Aplicado en Pintura de Superficies*

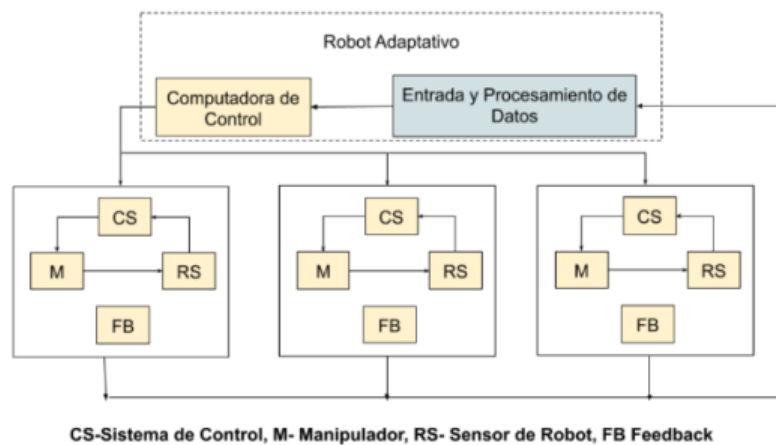


**Nota.** Tomado de (*Eight Teams Earn DARPA Funds for 2014 Robotics Finals*, s. f.)

### ***Sistemas robóticos de información y control***

Figura 7

*Esquema de Control de un Grupo de Robots para Información y Control*



Representan dispositivos complejos de medición y control, para la adquisición, procesamiento y transferencia de datos, así como para su uso en la formación de diversas señales de

control. En las plantas de producción, estos son sistemas de control automático en procesos de producción no tripulados, mecanizados de manera compleja con robots industriales utilizados en grupos (Vukobratović et al., 1989). En la Figura 7 se puede observar el proceso del control de este tipo de sistemas robóticos trabajando de forma colaborativa en la industria.

### ***Sistemas robóticos móviles***

Consisten en plataformas móviles, cuyo desplazamiento es controlado por un sistema automático. Además, consta con un programa de trayectoria de movimiento, y también poseen carga automática que asegura el alcance del punto de destino (Lazea & Lupu, 1997). A diferencia de los robots industriales basados en arreglos, un robot móvil tiene su movimiento ilimitado por su tamaño físico debido a su movilidad. Como resultado, los robots móviles pueden operar en un gran espacio de trabajo y explorar entornos desconocidos y, por lo tanto, pueden realizar tareas donde sea necesario.

Hoy en día, la robótica móvil es uno de los campos de investigación científica de mayor expansión. Debido a sus habilidades, los robots móviles pueden sustituir a los humanos en muchos campos. Aplicaciones incluyen vigilancia, exploración planetaria, patrullaje, operaciones de rescate de emergencia, reconocimiento, aplicaciones petroquímicas, automatización industrial, construcción, entretenimiento, guías de museos, servicios personales, intervención en ambientes extremos, transporte, servicios médicos. cuidado, etc (Rubio et al., 2019).

**Historia y Evolución de la Robótica Móvil.** El interés en la robótica móvil proviene principalmente de la necesidad de explorar áreas que los humanos no pueden explorar. La razón puede ser que el entorno es peligroso o lejana en la distancia y el tiempo (exploración espacial).

En tales condiciones, los robots de base fija no son suficientes. En la Figura 8 se presenta una línea de tiempo de la evolución de la robótica móvil en el transcurso de los años. En la cual se encuentran desde el primer trabajo en el área de la robótica móvil de Grey Walter que consistía en robots con una estructura similar a una tortuga dotados de 3 ruedas cuyo objetivo consistía en encontrar el camino a una estación de recarga cuando tenían poca energía, hasta la actualidad con enfoques de robots autónomos que pueden ser orientados a diferentes áreas como se explicó en secciones anteriores (X. Chen et al., 2009). En la Tabla 4 se muestra un resumen de las aplicaciones de los robots a lo largo de la historia.

**Figura 8**

*Historia y Evolución de la Robótica Móvil*

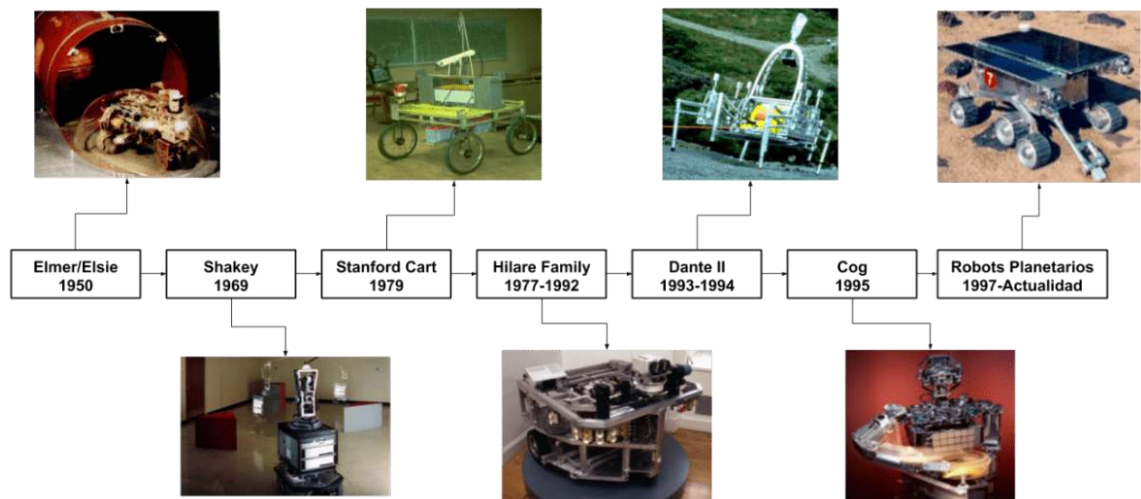


Tabla 4

*Historia y Evolución de la Robótica Móvil*

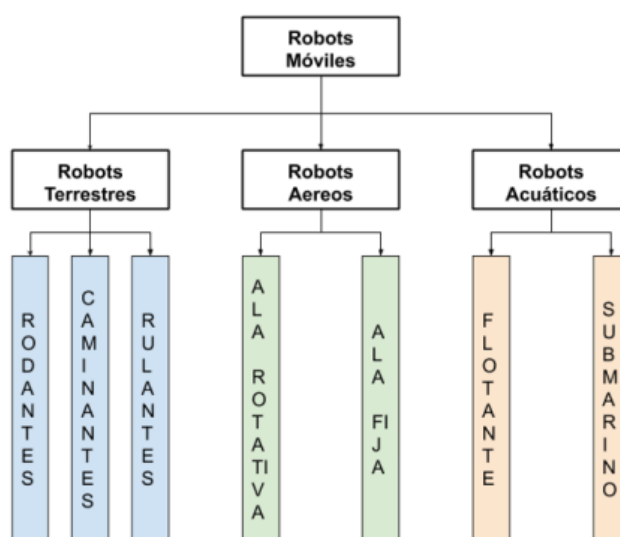
<b>Sistema Robótico</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
Elmer/Elsie	1950	Primer sistema robótico móvil, de tres ruedas capaz de tomar taxis fotográficos
Shakey	1969	Primer Robot móvil dotado con visión para el reconocimiento de objetos
Stanford Cart	1979	Robot con movimiento autónomo capaz de cruzar una sala llena de sillas sin colisiones
Hilare Family	1977-1992	Una gama de robots dotados de 2 llantas para el manejo y 4 ruedas libres, con función de odometría y dotados con cámara.
Dante II	1993-1994	Robot de exploración cuyas pruebas fueron realizadas en la Antártica y Alaska, dotado con 8 piernas para el desplazamiento y con comunicación a través de fibra óptica a una estación.
Cog	1995	Primer prototipo de robot humanoide
Robots Planetarios	1997-Actual	Con el objetivo de exploración de planetas se ha dotado a robots móviles con función de autonomía para la extracción de datos de otros planetas (Marte).

**Clasificación de la Robótica Móvil.** En general, los robots móviles se pueden clasificar en tres categorías según sus entornos operativos como se muestra en la Figura 9 Se puede notar que son robots terrestres, aéreos y acuáticos. En la presente investigación vamos a centrarnos en los robots terrestres los cuales como se observa en la Figura 9 tienen una subclasificación en función del sistema de locomoción que presentan. Un robot móvil necesita mecanismos de locomoción que le permitan moverse sin límites en todo su entorno. Pero hay una gran variedad de formas posibles de desplazarse, por lo que la selección del enfoque de locomoción de un robot es un aspecto importante del diseño. Existen sistemas robóticos de investigación que pueden caminar, saltar, correr, deslizarse y, por supuesto, rodar. La mayoría de estos mecanismos de locomoción

se han inspirado en sus homólogos biológicos. En la Tabla 5 se muestran los sistemas de locomoción principales y las leyes físicas necesarias para su comportamiento.

**Figura 9**

*Clasificación de Robots Móviles por su Entorno*



**Tabla 5**

*Clasificación de Robots Móviles Terrestres*

<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Fuerzas de Resistencia al Movimiento</b>	<b>Conceptos cinemáticos del movimiento</b>	<b>Observación</b>
Rulante	Fuerzas de Fricción	Vibración Longitudinal y Transversal	Simulación del Movimiento de Serpientes y Gusanos
Caminantes	Perdida de energía cinética	Movimiento oscilatorio de un péndulo multijunta	Dotado de n número de patas que permiten su movimiento
Rodantes	Perdida de energía cinética	Rodando en un polígono	Su movimiento se da por el uso de ruedas

Nota. Tomado de Introduction to Autonomous Mobile Robots (p14), Siegwart, 2011.

Los robots móviles generalmente se desplazan utilizando mecanismos con ruedas, una tecnología humana conocida para vehículos o utilizando un pequeño número de piernas articuladas, el enfoque biológico más simple para la locomoción. En general, la locomoción con patas requiere mayores grados de libertad y, por lo tanto, mayor complejidad mecánica que la locomoción sobre ruedas. Las ruedas, además de ser simples, son extremadamente adecuadas para terreno plano, en las superficies antes mencionadas, la locomoción con ruedas es más eficiente que la locomoción con patas (Siegwart et al., 2011b).

**Sistema de Localización de Robots.** La localización consiste en encontrar la posición del robot (es decir, las coordenadas de su centro y su orientación), o generalmente todos sus grados de libertad. Este problema se encuentra en la navegación, donde necesitamos aproximar la posición, orientación y velocidad del robot. El problema de localización a menudo se considera un caso particular de estimación de estado y se puede resolver a partir de ciertas ecuaciones que toman en cuenta variables.

**Figura 10**

*Sistemas de Localización de Robots Móviles*



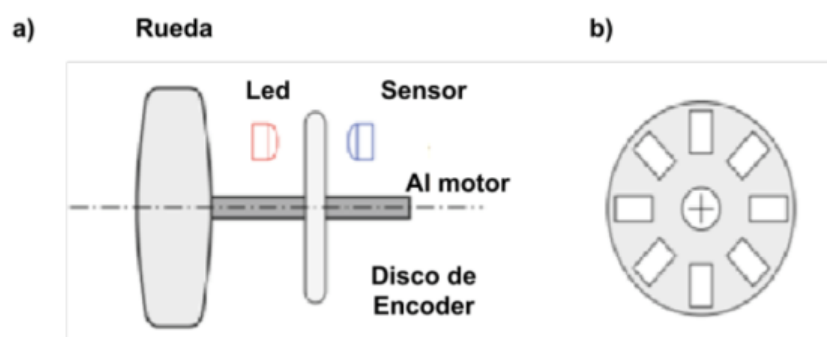
Los parámetros involucrados pueden ser de posición o cinemáticas como velocidad y aceleraciones para lo cual es necesario el uso de ciertos sistemas de localización a partir de la aplicación de sensores. Los robots están equipados con numerosos sensores que se utilizan para su localización. Como se puede observar en la Figura 10, se presenta algunos de los sistemas de localización más utilizados.

**GPS (Sistema de Posicionamiento Global).** La técnica de localización tradicional que ha sido ampliamente utilizado en plataformas autónomas es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Es un sistema satelital global que utiliza señales de radio para determinar la posición y la velocidad de plataformas móviles con cobertura global. Sin embargo, el GPS sufre de algunos problemas que hacen que sea menos confiable para ser utilizado en una auto localización precisa, como la fluctuación de la cobertura satelital, la trayectoria múltiple efectos, latencia e inexactitud (Srinivas & Kumar, 2017).

**Odometría.** Es una de las formas más simples de localización autónoma que se ha utilizado en muchos robots de dirección deslizante, como los robots de dos y cuatro ruedas (Cheng et al., 2005). El método de odometría se basa en encoders que están montados en las ruedas del robot para rastrear el número de revoluciones que ha hecho cada rueda como se muestra en la Figura 11. El número de revoluciones se integra en un modelo dinámico para determinar la posición actual del robots respecto al punto de partida (Yousif et al., 2015). Aunque la odometría de las ruedas es una técnica de localización simple y económica, no es adecuada para controlar plataformas que requieren un sistema de localización preciso y confiable a largo plazo.

Figura 11

Ubicación de encoder en rueda



Nota. a) Ubicación de Encoder con Rueda, b) Disco de encoder. Tomado de (Ben-Ari & Mondada, 2018)

**Radar o Sonar.** Es un enfoque para estimar la posición y orientación de una plataforma mediante el seguimiento de patrones de moteado láser reflejados por los objetos circundantes. Los LiDAR son insensibles a la iluminación ambiental y entornos de baja textura (Saito et al., 2015). En general, el proceso de detección basado en LiDAR consta de dos partes principales: emisión láser y observación óptica. En la parte de emisión láser, se emite luz coherente y espacial desde el dispositivo láser al entorno circundante. En la parte de observación óptica, la luz láser irradiada en un objeto refleja motas láser en el plano de observación 2D que es el plano para monitorear las reflexiones láser basadas en detectores ópticos (Zhang & Singh, 2014).

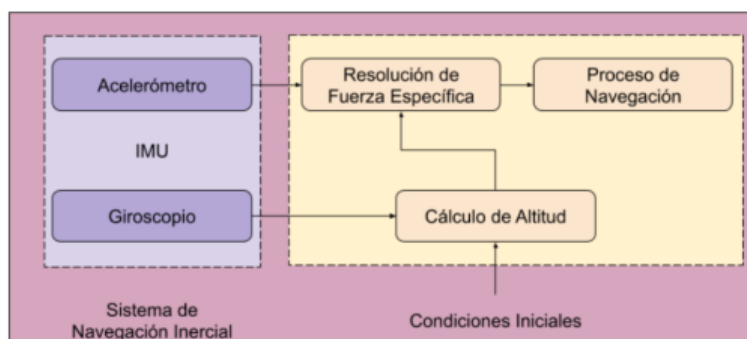
**Unidad Inercial.** Es un método de localización que usa las medidas desde el sensor IMU para determinar la posición, orientación, altitud y velocidad lineal de un vehículo, en relación con un punto de partida dado (Du et al., 2014). Una unidad de medida inercial asocia un giroscopio y un acelerómetro para aumentar la precisión de la estimación. Las más recientes combinan otros tipos de información, como la velocidad estimada o incluso tener en cuenta la rotación de la



Tierra. Conocer esta dirección nos da dos ecuaciones que involucran los ángulos de Euler del robot que son el banco  $\phi$ , la elevación  $\theta$  y el rumbo  $\psi$  del robot, expresados en un sistema de coordenadas local. Con el acelerómetro incluido en la unidad, es posible deducir el vector de gravedad a partir de lo anterior y generar así una ecuación adicional que permitirá calcular los tres ángulos de Euler (Klancar et al., 2017; Mohamed et al., 2019), este proceso se encuentra resumido en la Figura 12. Sin embargo, estos sistemas sufren de un problema de deriva debido a errores originados de diferentes fuentes, por ejemplo, errores constantes en las mediciones del giroscopio y acelerómetros. Estos errores, conducen a un aumento del error en la velocidad y posición estimadas. Por lo tanto, los sistemas de odometría inercial son inexactos e inadecuados para aplicaciones que requieren localización por largos períodos de tiempo. Para abordar este problema, se han encontrado diferentes soluciones como la aplicación de diferentes filtros (Filtro de Kalman, Filtro de Kalman Extendido, Filtro de Partículas) (Solin et al., 2017).

**Figura 12**

*Proceso de Funcionamiento de un Sistema de Localización con Unidad Inercial IMU*



Nota. Tomado de A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems, Mohamed, 2019

**Visión artificial.** Según (AIA, 1984) la visión artificial incluye todas las aplicaciones industriales y no industriales donde una combinación de hardware y software brindan una guía operativa a dispositivos en la ejecución de sus funciones en base a la captura y el procesamiento de imágenes.

Las técnicas para localizar y navegar un robot móvil son variadas, pero pueden establecerse en dos categorías. El primer grupo comprenden técnicas basadas en la obtención de profundidad (distancia) a objetos del entorno, donde se incluyen, fundamentalmente, la visión estéreo y la estimación de movimiento a partir del flujo óptico. (Atiya & Hager, 1993; Ayache, 1991; Owen, 1994)

**Figura 13**

*Implementación y proceso de obtención de posición de robot y objetos con uso de visión artificial*



Nota. Tomado de Sistema de Visión Artificial (p.3), García & Prada, 2010.

En un segundo grupo se consideran técnicas basadas en modelos del entorno donde la estimación de la posición se lleva a cabo a partir del emparejamiento de características extraídas

de la imagen con el modelo conocido. De este tipo son, por ejemplo, el sistema propuesto por (Lebegue & Aggarwal, 1993) y (Solano, 1991), donde se extraen de una imagen los segmentos característicos en las tres direcciones del espacio. La Figura 13 muestra un resumen del proceso de localización por visión artificial donde se discretiza el objeto deseado del entorno donde se localiza. (García & Prada, 2010; Jiménez & Baturone, 1996)

### **Robótica en la Nube**

El término de Robótica en la nube (Cloud Robot) hace referencia a dos puntos principales, que son las nuevas tecnologías implementadas en la nube y el de los servicios de la robótica. El término fue presentado por primera vez por James Kuffner en la conferencia de robots humanoides en el IEEE RAS Int (Mester, 2014). Los sistemas de Cloud Robot se pueden definir como cualquier robot o sistemas de automatización que se basa en códigos o datos de una red para dar un respaldo a su funcionamiento, lo que quiere decir donde sus sensores, actuadores o cualquier otro tipo de componente no está integrado en un único sistema independiente. La nueva rama de la inteligencia computacional busca incluir diferentes sistemas como líneas de ensamble automatizadas, teleoperación, robots móviles entre otros (Kehoe et al., 2015). Las principales ventajas que ofrecen los sistemas son:

- **Big Data:** acceso a bibliotecas de imágenes, mapas, trayectorias.
- **Cloud computing:** acceso a la computación en cuadrícula paralela a pedido para análisis estadísticos, aprendizaje y planificación del movimiento.
- **Aprendizaje colaborativo de robots:** robots que comparten trayectorias, políticas de control y resultados

La conectividad en la nube presenta una serie de problemas de privacidad y seguridad. Las preocupaciones incluyen datos generados por robots y sensores conectados a la nube, especialmente porque pueden incluir imágenes o videos o datos de hogares privados o secretos comerciales corporativos. Cloud Robotics también presenta el potencial de los robots y sistemas para ser atacados de forma remota: un pirata informático podría apoderarse de un robot y usarlo para interrumpir la funcionalidad o causar daños por lo cual es un tema esencial que debe ser tomado en cuenta en el diseño y desarrollo de robots conectados a la nube (Ren et al., 2012).

### ***Computación en la Nube***

El servicio que inicialmente fue utilizado por desarrolladores de aplicación web ha tenido un crecimiento acelerado a tal punto que aplica en soluciones de problemas científicos y técnicos en el que se requiere computación de alto rendimiento. La computación en la nube es ideal para el análisis basado en muestras, el proceso tiene el potencial para el desarrollo eficiente de diferentes aplicaciones en el campo de la robótica y la automatización entre ellos la navegación de robots utilizando SLAM o la planificación de movimientos basados en muestreos óptimos. Esto puede ser posible gracias a la facilidad de análisis de imágenes y videos que presenta (Kehoe et al., 2015).

### ***Aprendizaje Colaborativo de Robots***

La nube facilita el intercambio de datos para el aprendizaje de robots al recopilar datos de pruebas y entornos. Por ejemplo, los robots y los sistemas de automatización pueden compartir las condiciones iniciales y deseadas, las políticas de control y las trayectorias asociadas,

y lo que es más importante datos sobre el rendimiento y los resultados. En los últimos años se ha propuesto proyectos para el aprendizaje colectivo de robots al incluir las trayectorias de muchos robots en muchas tareas en las cuales se utiliza el cloud computing para la planificación paralela y el ajuste de la trayectoria. Dichos sistemas también pueden expandirse a redes globales para facilitar la planificación de rutas compartidas (Berenson et al., 2012)

Entre otros ejemplos se tiene los robots colaborativos COBOTS son una nueva generación cuyo propósito principal es prescindir de una funcionalidad específica para cada uno y en su lugar poseer una programación global que se encargue de cumplir los objetivos para los que fueron diseñados (Casalet, 2018).

## **Planificación de Trayectoria**

### ***Esquemas de navegación en robots móviles***

Realizar una tarea de navegación para un robot móvil significa circular por un camino que lo lleve de una posición inicial hasta una posición final, pasando por ciertas posiciones intermedias u obstáculos. El problema de la navegación se divide en las siguientes cuatro etapas:

- **Percepción del mundo:** Mediante el uso de sensores externos, creación de un mapa o modelo del entorno donde se desarrollará la tarea de navegación.
- **Planificación de la ruta:** Crea una secuencia ordenada de objetivos o submetas que deben ser alcanzadas por el vehículo. La secuencia se calcula utilizando el modelo o mapa de entorno, la descripción de la tarea que debe realizar y algún tipo de procedimiento estratégico.

- **Generación del camino:** En primer lugar, se define una función continua que interpola la secuencia de objetivos construida por el planificador. Posteriormente procede a la discretización de la misma para generar el camino.
- **Seguimiento del camino:** Efectúa el desplazamiento del vehículo, según el camino generado mediante el adecuado control de los actuadores del vehículo (Zamora-Izquierdo et al., 2000).

### ***Planificación de la ruta***

Consiste en encontrar una ruta segura capaz de llevar al vehículo desde la posición actual hasta la especificada, destino. El concepto de ruta segura implica el cálculo de un camino al menos continuo en posición, que sea libre de obstáculos. Por tanto, el generador construirá las referencias que se le entregan al control de movimientos del robot móvil. Por ello, en la especificación de la ruta se obvian las características cinemáticas y dinámicas del vehículo, ya que el cómputo de una referencia adecuada que cumpla con estos atributos es tarea del generador de caminos. Por tanto, la ruta al tan sólo asegurar continuidad en posición supone que únicamente los robots móviles omnidireccionales puedan seguir una referencia de tales características.

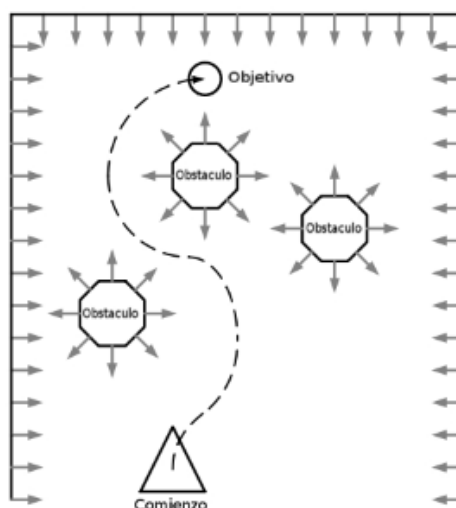
### ***Métodos clásicos de Planificación***

**Planificación basada en campos potenciales.** La planificación de trayectorias es la búsqueda de una sucesión de posiciones para un robot, que permitirán llevarlo desde un estado inicial a uno final, entendiéndose por estado a la descripción de la ubicación del robot referida a

un marco de referencia absoluto. La configuración que adquiere una determinada trayectoria queda definida por la distribución de los obstáculos a lo largo de todo el espacio de trabajo, y por supuesto, por la geometría del robot y sus capacidades de movimiento. De esta manera, la topología del ambiente de trabajo restringirá el espacio libre de obstáculos en el cual se pueden expresar las posibles trayectorias para alcanzar el estado final deseado (UdeSantiagoVirtual, 2019). Un esquema del proceso es representado en la Figura 14.

**Figura 14**

*Ejemplo del desarrollo de un planificador de campo potencial*



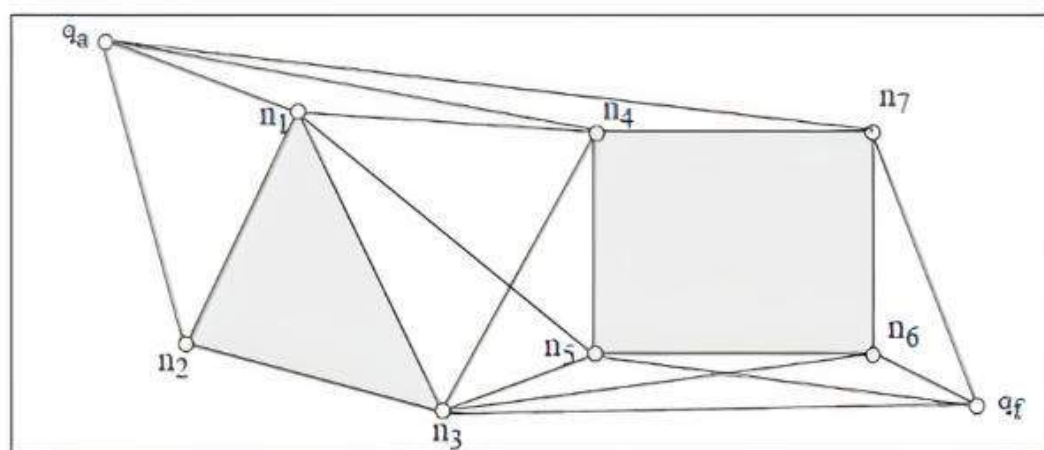
Nota. Tomado de Robótica industria, UdeSantiagoVirtual,2019.

**Planificación basada en grafos de visibilidad.** El método introduce el término de visibilidad, según el cual, define dos puntos del entorno como visibles, si y solo sí, se pueden unir mediante un segmento rectilíneo que no intercepte ningún obstáculo. Se consideran como nodo

del grafo a la posición inicial, la posición final y todos los vértices de los obstáculos, siendo el grafo el resultado de la unión de los nodos visibles, tal como se muestra en la Figura 15 (Yandún & Sotomayor, 2012).

**Figura 15**

*Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos.*



**Nota.** Tomado de Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil, Yandún & Sotomayor, 2012.

### **Generación de caminos**

El camino es el grupo de consignas que se entregarán al seguidor de rutas para la ejecución de la tarea de navegación. Se construye en función de la ruta definida por la tarea de planificación y debe estar libre de obstáculos. El camino se define como la discretización de una curva continua que interpola ciertos puntos elegidos de la ruta calculada por el planificador. Por tanto, el problema de la definición de un camino con buenas propiedades pasa por la construcción de la función camino adecuada que las posea. Las características buscadas son aquellas que hacen



posible el seguimiento del camino especificado según el comportamiento cinemático y dinámico del vehículo (Maza & Ollero, 2001).

### **Protocolos de Comunicación**

Uno de los más grandes desafíos que presenta IOT es la interconexión entre los diferentes dispositivos y las plataformas que maneja. Existe una gran variedad de protocolos tanto estándar como privados que buscan resolver estos problemas de comunicación.

Cada uno de estos protocolos buscan dar solución a dichos problemas y convertirse en la mejor opción estandarizada para funciones de Internet of things, sin embargo, cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas que brinda elección dependiendo de las capacidades tanto de hardware como de software entre los protocolos más utilizados se tiene HTTP, REST, JSON, MQTT, OPC, COAP, entre otros. (Vega et al., 2015)

Los protocolos mencionados anteriormente manejan ya sea una arquitectura cliente servidor o publicador/suscriptor.

### ***Arquitectura Cliente/Servidor***

Aquí se presenta un modelo de comunicación en el cual el cliente realiza una solicitud o petición y el servidor se encarga de responder a la misma con los datos solicitados siempre y cuando el cliente se encuentre conectado al servidor.

La comunicación existente entre el cliente y el servidor se encarga de separar completamente las responsabilidades de estos. Una de las características principales de la arquitectura consiste en que las peticiones de cada cliente son completamente independientes.

### ***Arquitectura Publicador/Suscriptor***

El modelo se divide en dos componentes principales primero aquellos que se encargan de generar información (publicador) y segundo el que tiene interés de la información generada (suscriptor). El elemento que se encarga de la comunicación entre el publicador y el suscriptor se conoce como bróker y su labor es coordinar las acciones entre los dos entes antes mencionados.

Una de las principales ventajas que ofrece la arquitectura al poseer un intermediario, el bróker, no es necesario que el publicador y el suscriptor tengan conocimiento el uno del otro con lo cual se obtienen ciertas ventajas como son tener una mayor escalabilidad y flexibilidad, además de permitir obtener una topología de red más dinámica.

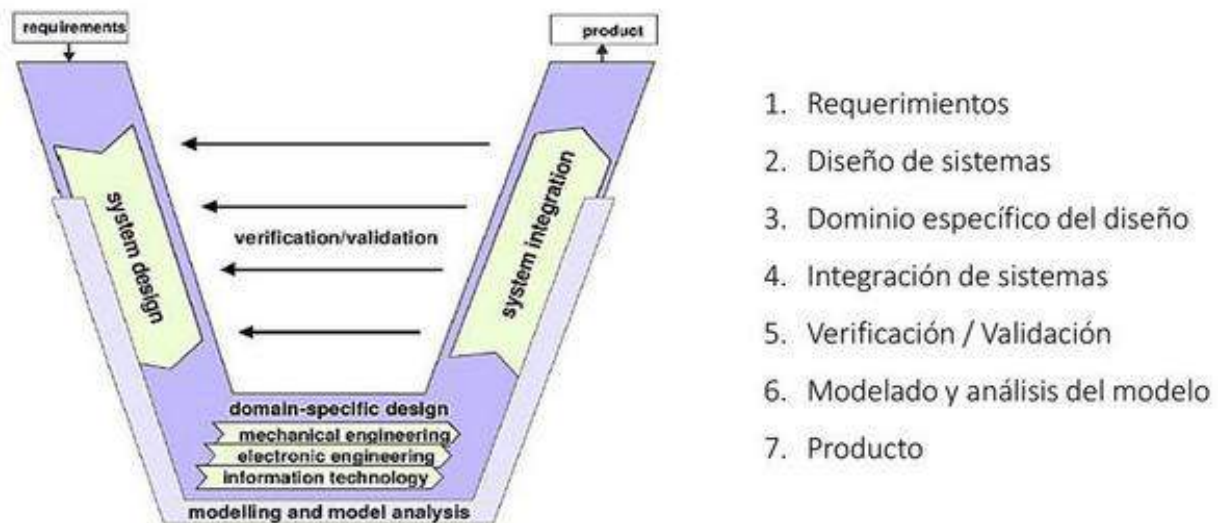
## Capítulo III

### Metodología y Diseño del Sistema

#### Metodología de Diseño

Figura 16

Proceso de diseño de la norma VDI 2206



Nota. Tomado de VDI 2206 - Design methodology for mechatronic systems (p.14), VDI Standards, 2004

Se propone utilizar la norma VDI 2206, destinada al desarrollo de proyectos mecatrónicos (VDI Standards, 2004). La Figura 16 representa la metodología propuesta en forma general. La metodología se basa en la concurrencia para el diseño de sistemas multifuncionales. El proceso consta de tres fases, diseño del sistema, diseño específico e integración del sistema, los cuales se desarrollan paralelamente, a partir de requerimientos propuestos, para obtener un producto. En la norma VDI 2206 siempre se verifica para una correcta retroalimentación y mejora continua. El

proyecto será realizado con respecto al diseño del robot, el planificador y entorno, a la par siguiendo la metodología para lograr un satisfactorio estudio y desarrollo del mismo.

### ***Requerimientos***

En esta etapa se investiga, analiza y se enlista los requerimientos más representativos del proyecto. Es la base para su desarrollo y durante el proceso pueden ser mejorados o alterados, mas no eliminados. Para el proyecto se resumen los siguientes requerimientos:

- Aplicación de Robots móviles.
- Implementación de un sistema autónomo de planificación de trayectoria.
- Capacidad de toma de decisiones.
- Aplicación de un sistema de localización.
- Modularidad
- Bajo costo

### ***Diseño de sistemas***

Se realiza la división de los subsistemas del proyecto acorde a los requerimientos para su desarrollo. Los planteados en el proyecto son:

- Mecánico
- Electrónico y eléctrico
- Control y localización local
- Tics
- Localización Global

- Planificación de trayectoria
- Aplicación

### ***Dominio específico del diseño***

Al desarrollar cada subsistema se obtiene su completo dominio y entendimiento para permitir cualquier cambio o resolución del problema si es necesario. El dominio del diseño garantiza el desarrollo de los mismos con vista a una unión y formación integral del proyecto.

### ***Integración de sistemas***

Al completar el desarrollo individual de los subsistemas, estos son acoplados para formar el proyecto. El diseño del proyecto se basa en trabajar por partes pensando en su unión final para evitar problemas con la integración.

### ***Verificación/ Validación***

En cada etapa desde el diseño, desarrollo y comprobación, se realizará una validación constante para generar retroalimentación. El diseño de cada subsistema puede modificarse o cambiarse en el transcurso de todo el proyecto debido a circunstancias varias. Durante nuestro proyecto se verificará y validará cada paso realizado para corregir eficientemente cualquier subsistema en todo momento.

### ***Modelado y análisis de modelo***

Se realizará un modelado del sistema a desarrollarse y analizará su funcionalidad, desempeño y mejoras. Esto permite un concepto claro del proyecto y futuras mejoras o desarrollo

de investigaciones en base del mismo. El modelado es aplicado a cada subsistema y su complementación para formar uno solo.

### ***Producto***

El Proyecto en su completo desarrollo forma un producto el cual cuenta con todo el sustento tanto de diseño, desempeño, manual de uso y mantenimiento. Es enfocado a la obtención de un producto replicable y mejorable para uso de cualquier usuario por medio de un manual. Toda la información se dividirá en dos partes; la primera para entendimiento del funcionamiento y la segunda para comprensión de su construcción.

### **Diseño de Subsistemas**

Tomando como base la metodología de la norma VDI 2206 es necesario inicialmente tomar en cuenta los requerimientos del proyecto para poder tener como base las especificaciones para el diseño de cada subsistema. Como se puede observar en la tabla 1 del presente artículo se especifica cada uno de los requerimientos que debe cumplir el prototipo para su diseño aprobación, para facilitar su entendimiento se ha dividido en 6 subsistemas principales que son:

- Mecánico
- Electrónico y eléctrico
- Control y Localización Local
- Tics
- Localización Global
- Planificación de trayectoria

- Aplicación

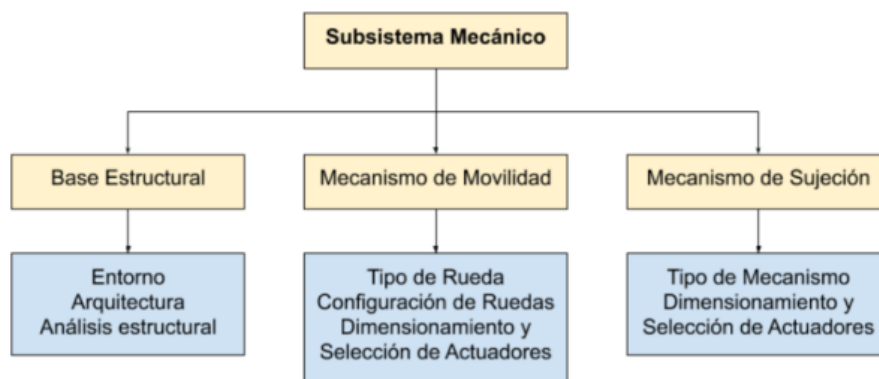
### ***Matriz de evaluación para análisis y decisión en el diseño de subsistemas***

Una matriz de evaluación es una herramienta para valorar cada característica con un peso porcentual dependiendo de su importancia. La columna “Peso” muestra el porcentaje de importancia, los literales corresponden a las opciones mostradas en la sección de Diseño del Sistema. Las ponderaciones se muestran en la columna de calificación (Ca) y multiplicado por el peso se obtiene la Evaluación Ponderada (Ep), finalmente la opción que tenga la mayor sumatoria de estos valores debe ser la opción a desarrollar (Ulrich & Eppinger, 2004)

### **Diseño de Subsistema Mecánico**

**Figura 17**

*Elementos y Tareas para el Diseño del Subsistema Mecánico*



El subsistema mecánico es aquel que está relacionado directamente con la base estructural que va a presentar el robot, además de los mecanismos que va a tener con el objetivo de cumplir con sus tareas asignadas. En la Figura 17 se muestra un resumen de los elementos y

tareas que se tendrá para el diseño del subsistema, es necesario tomar en cuenta que los mecanismos necesarios que tendrá el dispositivo consisten principalmente en su movilidad y su sujeción implementada para el proceso de clasificación.

### **Arquitectura del Prototipo**

Robótica engloba una gran variedad de campos y aplicaciones, por lo cual, se tiene una clasificación que permita llevar a cabo de mejor forma las tareas asignadas de forma eficiente. Entre las clasificaciones existentes dentro de la robótica se encuentra la división de los sistemas en función del entorno en el cual desempeñan sus labores (aéreos, acuáticos y terrestres).

**Arquitectura del Robot Según su Sistema de Locomoción.** Los sistemas antes definidos a su vez entran en una subdivisión detallada anteriormente y en base a que la aplicación del sistema está orientada en sistemas terrestres. Para el diseño vamos a centrarnos únicamente en esta subdivisión mostrada en la Figura 18, además, en la Tabla 6 se resumen las características de los tipos de robots móviles terrestres.

**Figura 18**

*Clasificación de Robots Terrestres*

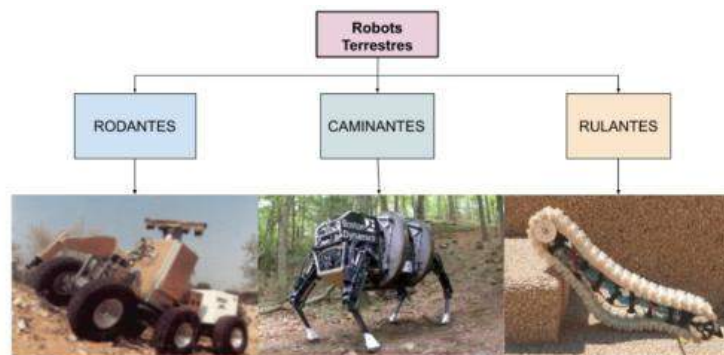




Tabla 6

*Sistemas de Locomoción para Robots Móviles*

<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Descripción</b>
Rulante	Simulación del Movimiento de Serpientes y Gusanos.
Caminantes	Dotado de n número de patas que permiten su movimiento y estabilidad. Posee adaptabilidad y maniobrabilidad en terrenos rugosos.
Rodantes	Su movimiento se da por el uso de ruedas. Presenta gran balance y estabilidad. Su diseño y complejidad mecánica es relativamente simple. Presenta gran eficiencia respecto a los otros sistemas.

Nota. Resumen de características tomado de Introduction to Autonomus Móvil Robots (p.14),Siegwart,2011.

**Análisis y decisión.** En la Tabla 7 se aprecia en base a parámetros seleccionados de estabilidad, maniobrabilidad, complejidad mecánica y costo, que la opción con mayor puntaje es el diseño de un robot móvil terrestre con un sistema de locomoción por ruedas. En base a factores importantes como la estabilidad en superficies sin inclinación y la capacidad de maniobrabilidad necesaria al momento de seguir una ruta, la opción de robot caminante puede ser utilizado; pero se lo descarta principalmente por la dificultad de balance e implementación de una mayor cantidad de patas, lo que representa un problema en cuanto a complejidad mecánica y costo del sistema.

En la Tabla 7 se aprecia en base a parámetros seleccionados de estabilidad, maniobrabilidad, complejidad mecánica y costo, que la opción con mayor puntaje es el diseño de un robot móvil terrestre con un sistema de locomoción por ruedas. En base a factores importantes como la estabilidad en superficies sin inclinación y la capacidad de maniobrabilidad necesaria al momento de seguir una ruta, la opción de robot caminante puede ser utilizado; pero se lo

descarta principalmente por la dificultad de balance e implementación de una mayor cantidad de patas, lo que representa un problema en cuanto a complejidad mecánica y costo del sistema.

**Tabla 7**

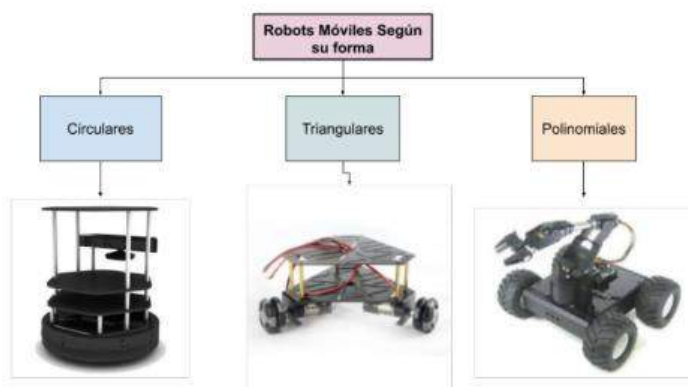
*Matriz de Evaluación sobre Sistema de Locomoción*

Criterios	Peso %	Ruedas		Caminantes		Rulantes	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Estabilidad	40	5	2	3	1,2	5	2
Maniobrabilidad	40	4	1,6	4	1,6	4	1,6
Complejidad Mecánica	10	4	0,4	3	0,3	3	0,3
Costo	10	4	0,4	2	0,2	3	0,3
Total			4,4		3,3		4,2

**Arquitectura del Robot Según su Forma.** Los sistemas robóticos móviles con ruedas se clasifican según la forma de estructura que posee y sus variaciones se resumen en la Figura 19.

**Figura 19**

*Clasificación Robots Móviles con Ruedas por su Forma*



**Arquitectura triangular.** Estructura simple de tres lados, las ventajas que presenta es su tamaño reducido y uso de un menor número de ruedas, en comparación con otras arquitecturas.

Entre las desventajas se consideran el área reducida para los diferentes elementos electrónicos como batería, procesadores, controladores y otros. Además, posee restricciones dinámicas y poca investigación (Shabalina et al., 2018).

**Arquitectura circular.** La forma circular ha sido implementada en varias investigaciones y productos comerciales por su destreza en esquivar y rodear obstáculos. Existe disponibilidad de un amplio espacio y su dirección no está definida por su forma, como en el triángulo donde una de sus puntas es el frente por estándares o generalidades ya dadas por investigaciones (Siegwart et al., 2011b, p. 34).

**Arquitecturas polinomiales.** Arquitectura donde el robot presenta varios lados. La arquitectura rectangular es la más utilizada para robótica móvil, principalmente debido a su uso en vehículos cotidianos de transporte. Su principal ventaja es el amplio conocimiento que se tiene de esta arquitectura de robot como sus restricciones dinámicas, configuración cinética entre otras y se puede afirmar que la desventaja más importante son sus restricciones de movimiento en especial por sus aristas vivas (Shabalina et al., 2018).

**Análisis y decisión.** Al analizar las características de las tres formas tentativas para un robot móvil, se opta por la arquitectura circular, principalmente, por su ayuda en la maniobrabilidad y esquite de objetos. Además, se obtiene mayor espacio para ubicar sus elementos y lograr escalabilidad en cualquier aplicación a emplearse.

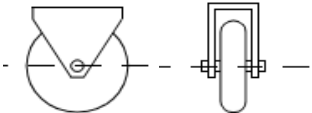
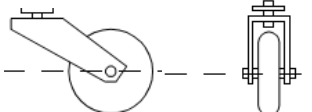
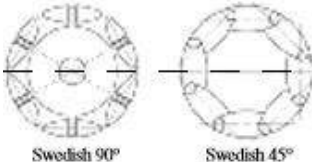
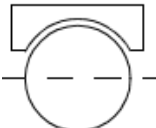
### ***Sistema de Movimiento del Prototipo Móvil***

**Tipo de Rueda.** En el diseño de un robot móvil, expresar restricciones sobre los movimientos de las ruedas individuales es crucial. Los movimientos de las ruedas individuales se

pueden combinar para calcular el movimiento del robot en su conjunto. Hay cuatro tipos básicos de ruedas con propiedades cinemáticas muy variables. En la tabla 8 se presenta un resumen de los 4 tipos de ruedas:

**Tabla 8**

*Tipos de Ruedas*

Tipo de Rueda	Características	Ilustración
Rueda Estándar	Tienen un eje primario de rotación. Para moverse en una dirección diferente, la rueda debe dirigirse primero a lo largo de un eje vertical.	
Rueda Giratoria	Presenta el mismo comportamiento de la rueda estándar con la variación de que la rueda gira alrededor de un eje desplazado, provocando una fuerza impartida al chasis del robot durante la dirección.	
Rueda Sueca Omnidireccional	Presenta tres grados de libertad; rotación alrededor del eje de la rueda (motorizada), alrededor de los rodillos y alrededor del punto de contacto	
Rueda Esférica	Una rueda verdaderamente omnidireccional, a menudo diseñada para que pueda ser activada para girar en cualquier dirección	

Nota. Información resumida de Introduction to Autonomous Mobile Robot (Cap.II), Siegwart et al, 2011

**Análisis y decisión.** La Tabla 9 representa la matriz de evaluación para el tipo de rueda con el fin de seleccionar la opción que brinde mejores resultados para el movimiento. En el cual se representa con letra A, B, C, D las opciones de ruedas estándar, giratoria, omnidireccional y esférica respectivamente, además se toma en cuenta los criterios de estabilidad, maniobrabilidad como necesarios para el desplazamiento del robot y por ende un mayor peso junto a la variable de innovación con el fin de obtener mejores resultados.

**Tabla 9**

*Matriz de Evaluación sobre Tipo de Rueda*

<b>Criterios</b>	<b>Peso %</b>	<b>A</b>		<b>B</b>		<b>C</b>		<b>D</b>	
		<b>Ca</b>	<b>Ep</b>	<b>Ca</b>	<b>Ep</b>	<b>Ca</b>	<b>Ep</b>	<b>Ca</b>	<b>Ep</b>
		Estabilidad	30	5	1,5	4,0	1,2	5,0	1,5
Maniobrabilidad	30	3	0,9	4,0	1,2	5,0	1,5	5,0	1,5
Innovación	30	1	0,3	1,0	0,3	4,0	1,2	3,0	0,9
Costo	10	4	0,4	4,0	0,4	3,0	0,3	5,0	0,5
<b>Total</b>			<b>3,1</b>		<b>3,1</b>		<b>4,5</b>		<b>3,8</b>


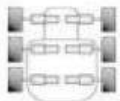
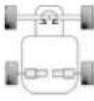

Como resultado de la Tabla 9 el tipo de rueda seleccionado será la omnidireccional debido a la ventaja de que, aunque la rotación de la rueda se acciona solo a lo largo del eje principal (a través del eje), la rueda puede moverse cinemáticamente con muy poca fricción a lo largo de

muchas trayectorias posibles, no solo hacia adelante y hacia atrás permitiendo de esta forma una mayor maniobrabilidad.

**Configuración de las Ruedas.** Las maniobras de dirección requieren más tracción y energía para funcionar que la conducción en línea recta; las fuerzas y momentos desarrollados durante las maniobras de giro imponen una carga significativa en los subsistemas de locomoción del robot. Además, en esquemas de dirección explícitos, se necesitan disposiciones de configuración especiales para el volumen de barrido de las ruedas y posibles interferencias entre el mecanismo de dirección y la estructura del tren de rodaje, motivo por el cual es importante un especial análisis de las diferentes configuraciones de ruedas resumidas en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Configuraciones para Robots Móviles*

Variable	Configuración	Descripción	Ilustración
A	Dirección Síncrona	Tiene mecanismos que permiten orientar ruedas con velocidad angular transformándola a velocidad lineal para el vehículo	
B	Dirección antideslizante	Realizado mediante el control de la dirección y la magnitud de las velocidades de las ruedas circunferenciales en los lados opuestos del chasis.	
C	Dirección coordinada	En la que se utiliza el acoplamiento mecánico para sincronizar el giro de dos o más ruedas sujetas a la geometría cinemática deseada.	
D	Dirección Diferencial	Cuenta con 2 ruedas laterales que se encargan de la dirección y el movimiento, además de contar con una rueda loca que ayuda con los giros y orientación	

Nota. Información resumida de Introduction to Autonomous Mobile Robot (p.34), Siegwart et al, 2011

**Análisis y decisión.** En la selección se toma en cuenta el factor de maniobrabilidad que permite el diseño al movilizarse y es vital en sistemas de movimiento autónomo, donde se da en intervalos cortos de tiempo. Otro criterio importante es la facilidad de control pues esto determina el desempeño y precisión del robot. También se toma en cuenta la innovación y costo para lograr los objetivos planteados.

**Tabla 11**

*Matriz de Evaluación sobre Configuración de las Ruedas*

Criterios	Peso %	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Control	30	5	1,5	3,0	0,9	4,0	1,2	2,0	0,6
Maniobrabilidad	50	3	1,5	5,0	2,5	3,5	1,8	3,0	1,5
Innovación	10	4	0,4	4,0	0,4	4,0	0,4	3,0	0,3
Costo	10	4	0,4	3,0	0,3	4,0	0,4	4,0	0,4
Total			3,8		4,1		3,8		2,8

En función de la matriz definida en la Tabla 11, la configuración seleccionada para el sistema es la dirección antideslizante la cual al tener un control por cada rueda permite una mayor maniobrabilidad que es uno de los factores clave del prototipo, aunque esto equivale a tener mayor dificultad para el control e incrementa el costo del sistema. Con esta última selección se tiene el sistema completo en cuanto a funcionalidad del robot móvil resumidas en la Tabla 12.

Tabla 12

*Resumen Selección de Arquitectura del Robot Móvil*

Variable	Selección	Ventaja	Desventaja
Locomoción	Ruedas	Sistema Robusto, con	Presenta un costo
Forma	Circular	buena estabilidad y	mayor en función a
Tipo Rueda	Omnidireccional	maniobrabilidad	otros sistemas
Configuración de Ruedas	Dirección Antideslizante		


### **Elementos del Subsistema Mecánico**

En secciones anteriores han sido seleccionados ciertos parámetros como arquitectura, sistema de locomoción, tipo de ruedas, etc. Sin embargo, es necesaria la adquisición de los elementos que formaran parte del prototipo. Entre ellas encontramos las ruedas omnidireccionales, el tipo de actuador para el movimiento, el sistema de soportes, etc.

**Ruedas Omnidireccionales.** Para el proceso de selección de los elementos es necesaria la búsqueda en el mercado, con la cual se pueda obtener la disponibilidad para su posterior compra. Los modelos de llantas encontradas se encuentran resumidas en la Tabla 13.

Tabla 13

*Modelos de Llantas Omnidireccionales Disponibles en el Mercado*

Variable	Modelo	Especificaciones	Ilustración
A	HLX-robot Omni rueda-02	Rueda de Goma/Nylon Diámetro de la Rueda 100 mm. Espesor 35 mm. Soporta hasta 20 kg de carga Presenta 18 rodillos de goma	



Variable	Modelo	Especificaciones	Ilustración
B	UniHobby H14135	Rueda de Nylon Diámetro 58 mm Espesor 31 mm Soporta hasta 2.5 kg de carga Presenta 10 rodillos de TPR	
C	UniHobby UH144	Llantas de Aluminio Diámetro 66 mm Espesor 30mm Soporta hasta 12 kg de carga Presenta 8 Rodillos PP+PE	
D	36466 Tetrax MAX	Material goma Diámetro de 50 mm Espesor 28 mm Soporta hasta 1 kg de carga Presenta 20 rodillos de goma	

Nota. Tomado de productos publicitados en la página web bangood.com,2019

**Análisis y decisión.** El presente sistema toma en cuenta principalmente el requerimiento de peso máximo del prototipo de 3 kg, además. Además, se considera que el prototipo estará en contacto constante con superficies por lo cual se debe colocar llantas que tengan resistencia mecánica acorde al suelo en el que se va a desplazar. Tomando estas características como premisa se formula la siguiente matriz de decisión en la Tabla 14; donde las llantas omnidireccionales con el modelo UniHobby UH144 es el seleccionado principalmente por la carga de 12 kg que soporta y el material de la rueda: aluminio en la estructura y Polipropileno y Polietileno (PP+PE) en los rodillos.

Tabla 14

Resumen Selección de Ruedas Omnidireccionales

Criterios	Peso %	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Carga	30	5,0	1,5	4,0	1,2	5,0	1,5	1,0	0,3
Resistencia	30	3,0	0,9	3,0	0,9	5,0	1,5	3,0	0,9
Calidad	30	3,0	0,9	4,0	1,2	4,0	1,2	3,0	0,9
Costo	10	4,0	0,4	3,0	0,3	4,0	0,4	3,0	0,3
Total			3,7		3,6		4,6		2,4

**Actuador del Sistema de Locomoción.** El actuador seleccionado para este tipo de sistemas móviles es un motor eléctrico pues combinan las ventajas del uso de la energía eléctrica (bajo, costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de la puesta en marcha, etc.) con una construcción relativamente simple, costo reducido y buena adaptación a los más diversos tipos de carga. En la Tabla 15 se presenta los tipos de motores que pueden ser aplicados al prototipo.

Tabla 15

Tipos de Motores Eléctricos

Tipo de Motor	Ilustración
Motor DC	
Motor a Pasos	
Servomotor	

Nota. Información resumida tomada de (TT Motor, 2020)

**Análisis y decisión.** El respectivo análisis del sistema se presenta en la Tabla 16 con los criterios de velocidad de respuesta con el fin de obtener una buena maniobrabilidad, además de la necesidad de un torque alto a bajas velocidad que es con las que se va a manejar el sistema y necesario al momento de realizar el movimiento del robot con carga. La precisión de los actuadores es vital para el proceso y está directamente relacionado con el control y sin olvidar que el sistema necesita un costo por prototipo menor a 450\$. Basado en las características mencionadas, el actuador que los requerimientos es el motor DC representado por la letra A en la matriz de selección.

**Tabla 16**

*Resumen de Selección de Actuadores del Sistema de Movimiento*

Criterios	Peso %	A		B		C	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Torque Alto	20	5,0	1,0	5,0	1,0	3,0	0,6
Eficiencia	20	4,0	0,8	3,0	0,6	3,0	0,6
Velocidad de Respuesta	20	5,0	1,0	3,0	0,6	3,0	0,6
Control y Precisión	20	3,0	0,6	5,0	1,0	5,0	1,0
Costo	10	5,0	0,5	3,0	0,3	5,0	0,5
Total			3,9		3,5		3,3

**Dimensionamiento Motor DC.** Posterior a la selección del tipo de actuador que será implementado en el robot es necesario realizar el dimensionamiento del elemento. En la Tabla 17 se presentan parámetros generales de funcionamiento del robot.

Tabla 17

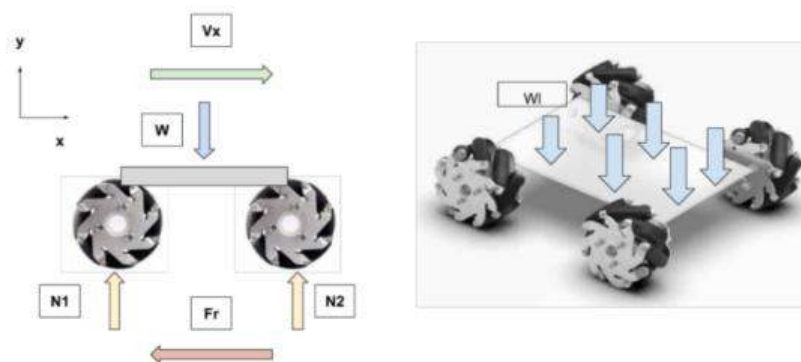
Parámetros para Dimensionamiento Motor DC

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Peso del sistema	3 [kg]
Numero de Ruedas	4
Diámetro de llanta	66 [mm]
Inclinación de la superficie	0°
Tipo de superficie	cerámica
Velocidad del Robot	0.04 [m/s]

Se debe tomar en cuenta que el proyecto se llevara a cabo en un entorno controlado y es orientado al laboratorio de instrumentación y sistemas dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el cual la superficie no presenta inclinación y es de cerámica. Partiendo de las premisas antes mencionadas se obtiene el diagrama de cuerpo libre DCL de la Figura 20.

Figura 20

Diagrama de Cuerpo Libre del Sistema (DCL)



N1,N2-Norma 1 y 2, W-Peso Total, Fr- Fuerza de Rozamiento, Vx Velocidad del Sistema

Considerando el DCL se procede a realizar el análisis planteando la sumatoria de fuerzas en los ejes x, y.

$$\sum F_y = 0$$

$$N_{Total} = W_{Total} \quad (1)$$

$$N_{Total} = 3 \cdot 9.8 = 29.4 \text{ [N]}$$

En(1) se toma el peso del prototipo que es la suma entre el peso de la plataforma y el del objeto que va a ser transportado. Posterior se realiza el cálculo de la fuerza de rozamiento en función de (2) recordando que el coeficiente de fricción dinámico para los cerámicos es de 0.8.

$$F_{rk} = \mu_{rk} \cdot NF_{rk} \quad (2)$$

$$F_{rk} = 0.8 \cdot 29.4 = 23.52 \text{ [N]}$$

Es necesario obtener el torque total que va a requerir el sistema a partir de (3).

$$T = F_{rk} \cdot \frac{\phi_{rueda}}{2} \quad (3)$$

$$T = 23.52 \cdot \frac{6.6}{2} = 77.61 [N \cdot cm]$$

El torque obtenido es del sistema total y se lo distribuye por cada una de las llantas en (4).

$$T_{rueda} = \frac{T}{4} \tag{4}$$

$$T_{rueda} = \frac{77.61}{4} = 19.49 [N \cdot cm] = 1.94 [kg \cdot cm]$$

Con el torque obtenido para cada rueda podemos establecer el motor requerido para el movimiento del sistema.

**Análisis y Decisión.** En base al torque obtenido de (4), cuyo resultado es el par que va a tener que generar cada uno de los motores, se encontró de forma comercial el actuador mostrado en la figura 20. El motor DC presenta las características detalladas en la Tabla 18 e incorpora un encoder del cual se hablará en el subsistema electrónico.

**Figura 21**

*Motor Chihai DC 6 V, Gear motor*



Nota. Tomada de CHIHAI GM13 Encoder, Bangood.com,2019.



**Tabla 18***Especificaciones Técnicas Motor DC Chihai*


<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
Marca	Chihai
Relación de Reducción	1:86
Velocidad nominal	70 rpm
Corriente Nominal	0.18 [A]
Voltaje de Alimentación	6 [V]
Par Nominal	2 [kg cm]

Nota. Especificaciones de proveedor tomadas CHIHAI GM13 Encoder, Bangood.com,2019.

**Material de la Plataforma.** En secciones anteriores ha sido definido la arquitectura y componentes que serán integrados en la estructura y además se ha dimensionado los actuadores que se encargaran del movimiento del sistema. Sin embargo, con los requerimientos definidos es necesario seleccionar el material con el cual se va a llevar a cabo la estructura del robot. En la Tabla 19 se especifican opciones de materiales para la fabricación del prototipo.

**Tabla 19***Tipos de Materiales para Estructura Base*

<b>Variable</b>	<b>Material</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ilustración</b>
A	Metal	Posee propiedades específicas como plasticidad y resistencia, además de ser un buen conductor eléctrico	
B	Madera (MDF)	Material obtenido por la combinación de madera (fibras) y resinas sintéticas.	

Variable	Material	Descripción	Ilustración
C	Acrílico	Es un material plástico, flexible y resistente, que puede soportar condiciones adversas sin sufrir cambios	

**Análisis y Decisión.** Con el objetivo de seleccionar el material que va a necesitar la estructura base se plantea la matriz de la Tabla 20 en la cual se enlistan los parámetros de selección de peso con mayor ponderación ya que la estructura debe ser liviana, su resistencia a impactos no deseados y finalmente el costo. La opción seleccionada es el acrílico tomando como base que es un material liviano y resistente y que además presenta un costo relativamente bajo.

**Tabla 20 Matriz de Selección de Material para Estructura Base**

Criterios	Peso %	A		B		C	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Peso	50	2,0	1,0	3,0	1,5	4,0	2,0
Resistencia	25	5,0	1,3	3,0	0,8	4,0	1,0
Costo	25	3,0	0,8	5,0	1,3	4,0	1,0
Total		3,0		3,5		4,0	

### **Integración de Subsistema Mecánico**

A lo largo de la sección de diseño mecánico se han seleccionado cada uno de los elementos que formara parte de la estructura y sistema de locomoción del robot; ahora se genera su integración en un conjunto general formado de subconjuntos dependientes entre sí.

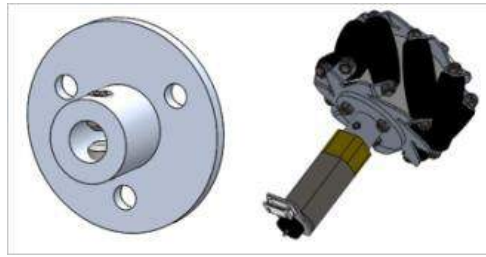
**Subconjunto de Movimiento.** Se compone por las llantas omnidireccionales UniHobby UH144 y el motor DC Chihai. Para establecer el ensamble de estos elementos es necesario un acople que se muestra en la Figura 22 (a) que a partir del uso de un pasador permite el ajuste del eje del motor permitiendo el acople de los elementos antes mencionados. Se debe ajustar



correctamente el pasador para evitar problemas como eje descentrado respecto a la rueda que genera momentos que pueden afectar el movimiento del robot y generar vibraciones innecesarias. En la figura 22 (b) muestra el ensamble completo del conjunto antes mencionado. Estos elementos son obtenidos comercialmente.

**Figura 22**

*Ensamble entre Llantas Omnidireccionales y Motor DC*

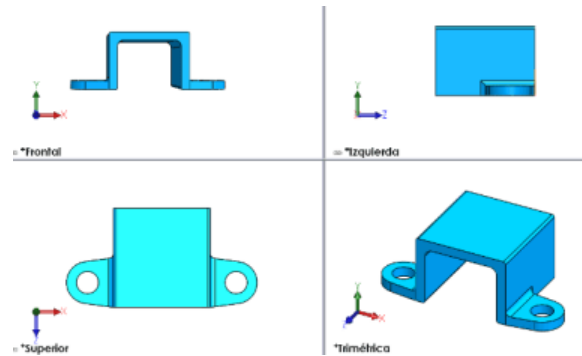


Nota. Imagen izquierda a) Acople de motor. Imagen derecha b) Subconjunto de movimiento.

**Subconjunto de Base Estructural.** Consta de la estructura base generada para el robot y 4 subconjuntos de movimiento; los cuales se ensamblan con un acople o soporte diseñado mostrado en la Figura 23. La Figura 24 (a) presenta el diseño de base que soportará todos los elementos del robot y la Figura 24 (b) presenta el subconjunto mecánico funcional del base ensamblado.

Figura 23

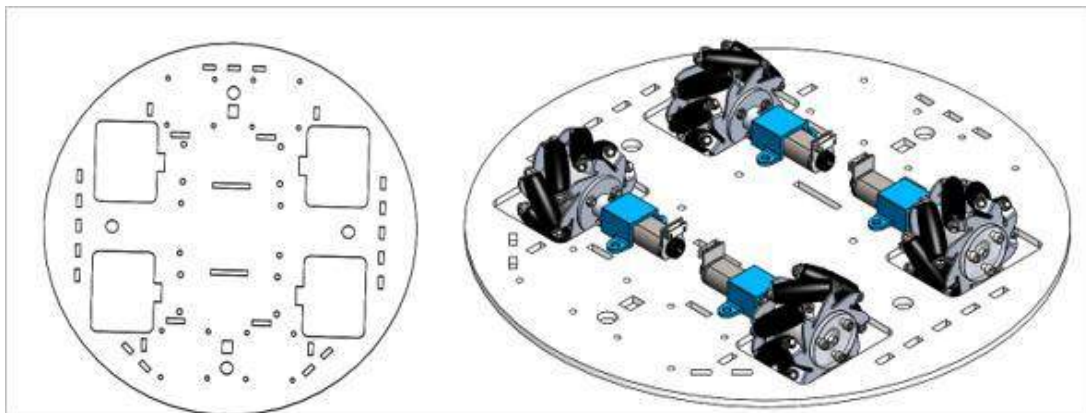
*Acople Base Estructural-Conjunto de Movimiento*



Nota. Los planos de construcción se los puede encontrar en el Apéndice 1A.

Figura 24

*Base estructural*



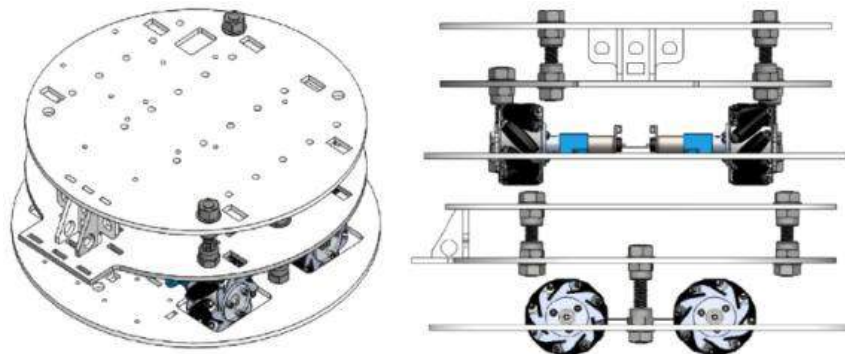
Nota. Imagen izquierda a) Base Estructural del Robot Móvil. Imagen derecha b) Subconjunto de Base Estructural para Movimiento. Los planos de construcción son detallados en el Apéndice 1A.

**Conjunto estructural mecánico.** El prototipo consta de 3 niveles, el primero que es aquel encargado del movimiento del robot, el segundo en el cual se ubica los sistemas de alimentación

y el tercero en el cual se coloca el nivel de control. La Figura 25 muestra el diseño del subsistema mecánico el cual se encuentra dividido en múltiples niveles como se mencionó anteriormente y sus planos de diseño se detallan en el Anexo. Se debe tomar en cuenta que el primer piso tendrá que soportar la carga total de 3 kg entre los niveles superiores y la cubierta (Figura 26). El segundo nivel soportará la carga del tercer nivel y el peso de los componentes de alimentación equivalente a 1.1 kg y el tercer nivel únicamente soportará el peso de las placas de control 0.3 kg.

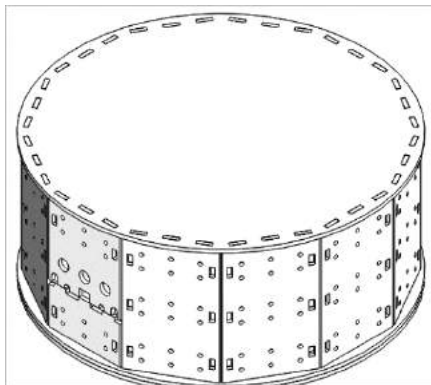
**Figura 25**

*Subsistema Mecánico del Robot*



**Figura 26**

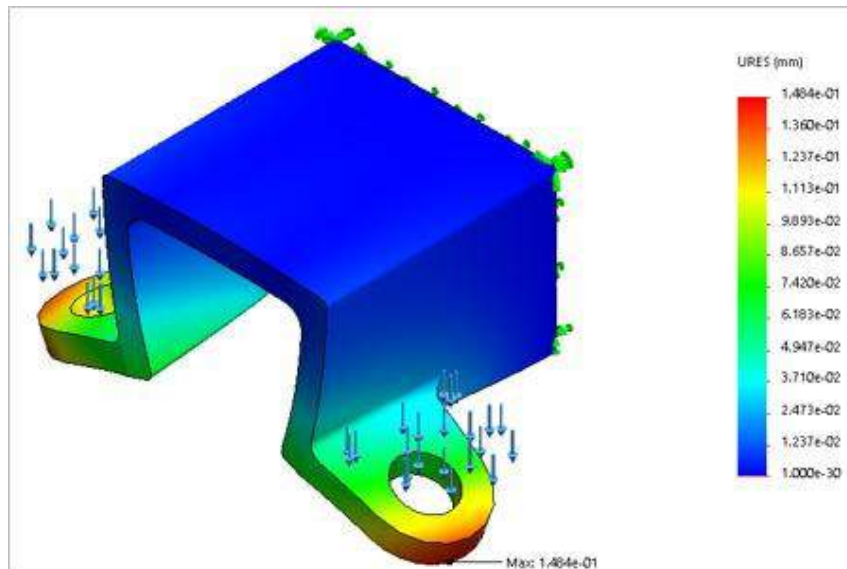
*Cubierta de robot*



### ***Simulación y validación de diseño***

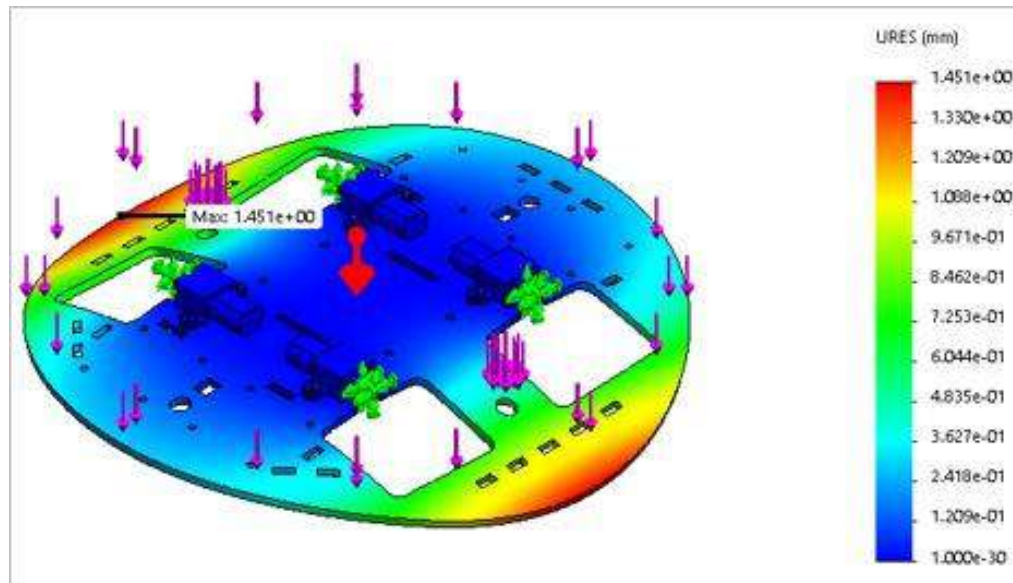
La validación del diseño mecánico se lo realiza a partir de una simulación de cargas mediante el uso del software SolidWorks. Para la realización de la simulación se toma en cuenta un estudio estático para garantizar el soporte de carga en los materiales que conforman la estructura mecánica. Los elementos comerciales no se realiza un estudio debido a que estos ya tienen garantizado sus características por el fabricante. El anexo detalla las simulaciones y resultados obtenidos y a continuación se presenta los resultados relevantes obtenidos.

**Soporte de motor.** El acople de motor es una pieza manufacturada por impresión 3D con material ABS y al someterlo a una carga de 0.75kg en sus sujeciones ya que aquí se concentrará el peso del robot. El resultado en el acople es satisfactorio al tener un desplazamiento o deformación máxima de 0.1mm en la zona más extrema. El factor de seguridad obtenida es con un mínimo de alrededor de 5 con lo que garantiza su funcionamiento. Los resultados detallados se encuentran en el Apéndice A1, sin embargo, se toma en consideración que la impresión se realiza con una densidad mayor al 80% y correcta adhesión en capas de forma perpendicular a la base de la pieza.

**Figura 27***Deformación de soporte*

Nota. Escala de deformación de 29.6149. Deformación máxima 0.1484 mm.

**Estructura.** La estructura base es la principal parte de la estructura que soporta al robot. Esta soporta carga de los niveles superiores y de la cubierta por lo que su distribución como se muestra en la Figura 28 y siendo satisfactorio los resultados al tener una máxima deformación de 1.45mm en los extremos. Esta deformación no afecta al funcionamiento del robot ya que los lugares donde se concentra las ruedas no existen deformación aparente. El factor de seguridad en la zona de concentración de esfuerzos que son los acoples es de promedió de 5 e ideal para el proyecto. Los detalles de la simulación se encuentran en el Apéndice A2.

**Figura 28***Deformación en estructura base*

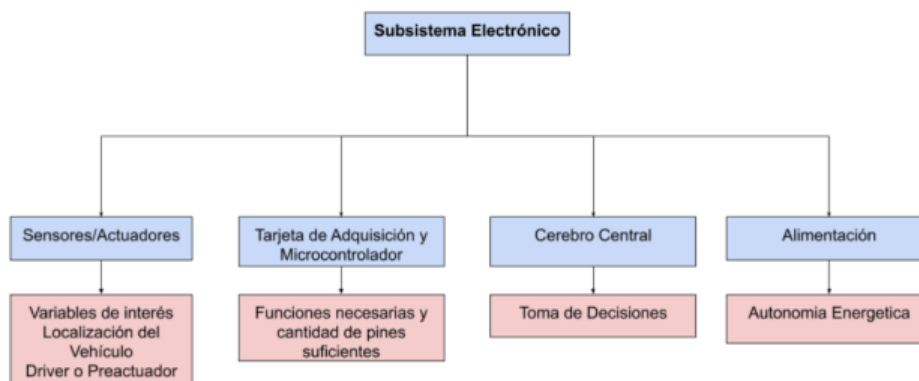
Nota. Escala de deformación 20.6832. Deformación máxima de 1.45mm.

### **Diseño del Subsistema Electrónico**

El diseño del subsistema consiste en el análisis de la instrumentación necesaria para el cumplimiento de los objetivos siguiendo una selección de sensores en función de las variables ubicadas en los requerimientos enumerados anteriormente. Es importante tener en cuenta que durante el diseño mecánico se ha tomado la selección del motor, por lo cual, es necesario la elección de un preactuador o driver acorde. Además, en esta sección se analiza la implementación ciertos elementos como la tarjeta de adquisición de datos y el microcontrolador del robot. La Figura 29 se aprecia un resumen de los principales elementos y componentes que forman parte de este subsistema.

Figura 29

Elementos y tareas para el diseño del subsistema electrónico



### Diseño

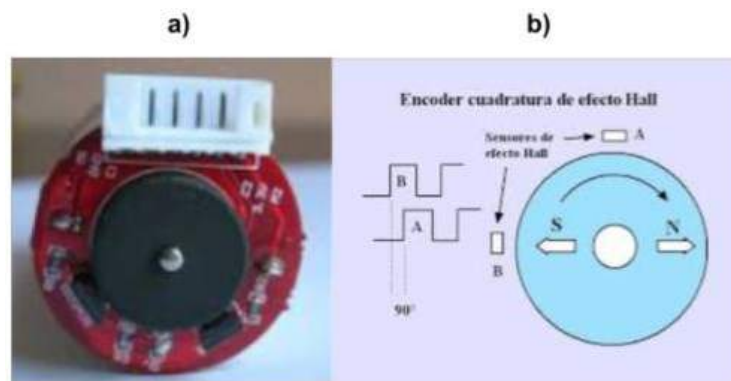
Uno de los requerimientos solicitados para el desarrollo del prototipo es que tenga un desplazamiento constante por lo cual es necesario el manejo de la variable de velocidad, además de obtener la localización del robot. La manera de obtener información de los parámetros es con el uso de sensores que permite obtener conocimiento de un entorno por medio de mediciones (Pallas-Areny, 2008).

**Sensor de Velocidad.** Se tiene una gran variedad de sensores para medir la velocidad, especialmente los sensores de rueda, que son dispositivos utilizados para medir el estado interno y la dinámica de un robot móvil. En la sección anterior se indicó que el motor adquirido estaba dotado de un encoder que permite medir la velocidad angular y la posición dentro de un motor o en el eje de una rueda o mecanismo de dirección llamados sensores propioceptivos y su estimación de posición es mejor en el marco de referencia del robot. En robótica móvil se usa el encoder de cuadratura con el sensor de efecto hall, donde se coloca dos pares magnéticos

desplazados 90 grados con respecto al original en términos del disco del rotor (Siegwart et al., 2011a). Un ejemplo de estos dispositivos se muestra en la figura 28.

**Figura 30**

*Encoder de efecto hall*






Nota. Encoder de efecto hall: a) Dispositivo de encoder de cuadratura; b) Funcionamiento de encoder. Tomado de Introduction to autonomous mobile robots, Siegwart, 2011.

**Sistema de Localización Local del Robot.** En el Capítulo II se enumeró varios sistemas de localización propioceptivos, en el cual se toman valores internos del robot a partir de las mediciones de los sensores, y exteroceptivo en el cual se obtiene información del entorno en el cual se mueve el robot aplicando sensores laser como el Lidar o ultrasónicos. En la Tabla 21 se colocan los principales sistemas de localización para el robot que sirven como candidatos para el diseño del robot móvil:



Tabla 21

Tipos de Sistemas de Localización Local

Variable	Tipo de Sistema de Localización	Descripción	Ilustración
A	Radar	Técnica para estimar el movimiento relativo de una plataforma mediante el análisis de escaneos obtenidos por el sensor de radar a bordo.	
B	Unidad Inercial	Determina la posición, orientación, altitud y velocidad lineal, relativo a un punto de partida dado. Pequeño y con bajo consumo de energía	
C	Lidar	Estima la posición y orientación de una plataforma mediante el seguimiento de los patrones de los láseres reflejados de los objetos circundantes	

Nota. Elementos obtenidos comercialmente en páginas de venta en línea mercadolibre.com.

**Análisis y Decisión.** La Tabla 22 muestra la matriz de selección enfocada al sistema de localización local, es decir, se llevará a cabo a partir del uso de sensores propioceptivos. La necesidad de precisión en el prototipo para alcanzar el objetivo final en trayectoria es un punto clave al igual que una respuesta rápida con el fin de evitar obstáculos presentes en el entorno por lo cual se tiene mayor ponderación en la matriz. En base a las consideraciones expresadas y a premisas que se han tomado a lo largo del artículo se obtuvo como opción viable la aplicación de una unidad inercial para el sistema de localización local principalmente por su rápida respuesta, su costo bajo y que es pequeña y a su vez liviana. Se puede observar que existe inconvenientes en cuanto a la precisión, pero se puede aplicar acondicionamientos digitales como filtros para mejorar su respuesta. En el mercado se presenta como opción el uso de la MPU 6050 es una

unidad de medición inercial o IMU de 6 grados de libertad pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes (A.S. Mohamed et al., 2019).

**Tabla 22**

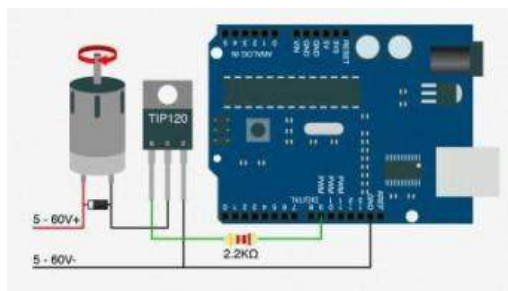
*Matriz de Selección Sistema de Localización Local*

Criterios	Peso %	A		B		C	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Precisión	40	4,0	1,6	3,0	1,2	4,0	1,6
Respuesta Rápida	40	4,0	1,6	5,0	2,0	3,0	1,2
Peso	10	4,0	0,4	5,0	0,5	4,0	0,4
Costo	10	5,0	0,5	5,0	0,5	4,0	0,4
Total			4,1		4,2		3,6

**Selección del Preactuador.** En el diseño mecánico se determinó el uso de un motor DC para el movimiento del robot, sin embargo, es necesario establecer y modular la velocidad del motor por lo cual se requiere el uso de un circuito de control capaz de regular este parámetro. Existe diferentes formas de realizar este control una de ellas es aplicando transistores que permitan la conmutación de media potencia como en la Figura 31 se muestra un ejemplo de la aplicación de este sistema.

**Figura 31**

*Circuito de control de Motor aplicando transistores TIP120*



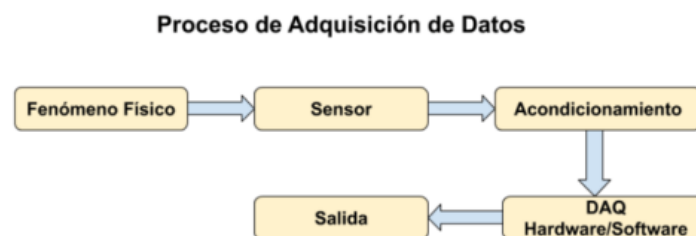
Nota. Circuito tomado de la web de múltiples autores con libre uso.

Tomando en consideración el presente circuito y la presencia de tarjetas electrónicas comerciales existentes en el mercado, se toma el driver L298N como elección de preactuador al ser el más robusto y económico. El preactuador cuenta internamente con 4 transistores que permiten el control de velocidad de 2 motores (STMicroelectronics, 2020) y son las suficientes para el funcionamiento del robot con la implementación de 2 unidades.

**Tarjeta de Adquisición de Datos.** Los datos del mundo físico son adquiridos por sensores o transductores para su procesamiento y sirve como puente entre entornos analógicos y digitales. Por lo general, los sistemas de adquisición de datos (DAQ) son sistemas adecuados para medir señales de corriente y voltaje (Sarma & Bezboruah, 2018). La Figura 32 esquematiza el proceso de adquisición de datos desde la medición de la variable con el sensor y acondicionamiento de la señal ya sea con circuitos externos o adquisición en la DAQ, incluyendo acondicionamiento digital y la salida entregada por el sistema.

**Figura 32**





*Proceso para sistemas de adquisición de datos.*



Se tiene una variedad de tarjetas de adquisición que pueden ser utilizadas en función de los requerimientos del sistema, especialmente, las tarjetas de desarrollo como Arduino y otros. La Tabla 23 presenta las tarjetas de desarrollo candidatas que se encuentran en el mercado actual.

Tabla 23

Opciones de Tarjeta de Adquisición de Datos

Variable	Tarjeta de Adquisición	Descripción	Ilustración
A	ESP32	Placa de Desarrollo Open Source con un microcontrolador de 32 bits de 38 pines. 24 son entradas digitales que pueden ser usados como interrupción y consta con comunicación serial, i2c, bluetooth y wifi. Su costo es bajo.	
B	Arduino MEGA	Tarjeta Open Source con controlador ATmega. Cuenta comunicación serial, posee módulos para bluetooth y wifi. Dispone de 4 pines de interrupción y 15 salidas PWM	
C	Arduino DUE	Cuenta con ARM Core microcontrolador de 32 bits. Todos sus pines de entrada digital son de interrupción (54) y posee la misma comunicación que el Arduino Mega y 12 pines con salida PWM	
D	MyRio	La licencia de este software es comercial (Labview), con procesador Dual Core ARM, 40 pines de interrupción, comunicación serial, wifi e i2c.	

**Análisis y Decisión.** La tarjeta de adquisición de datos es elegida en función de los sensores y actuadores que van a ser utilizados, especialmente el sensor de velocidad encoder. Al ser el encoder un sensor Hall de cuadratura es necesario 2 entradas digitales de interrupción y al tomar en cuenta que son 4 llantas, es necesario 8 pines de interrupción. Este requerimiento lo cumplen todas las tarjetas excepto Arduino mega que solo dispone de 4. Además, el preactuador seleccionado es el L298N el cual necesita 8 pines digitales y 4 salidas PWM requerimiento que todos los sistemas cumplen. El MPU 6050 tiene comunicación I2C con la tarjeta, propiedad que también se cumple. Por último, es necesaria la comunicación de la tarjeta de adquisición de datos

con el controlador del robot, por lo cual, es necesario una comunicación externa que los dispositivos Arduino no poseen integrados. Dadas estas consideraciones y en base a la matriz de selección mostrada en la Tabla 24, se concluye que la opción que cumple de mejor forma estos requisitos es la A que corresponde a la tarjeta ESP32, cuyas características muestra la Tabla 25.


**Tabla 24**

*Matriz de Selección de Tarjeta de Adquisición de Datos*

<b>Criterios</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Pines de Interrupción	+	-	+	+
Salidas PWM	+	+	+	+
Comunicación I2C	+	+	+	+
Comunicación Externa	+	-	-	+
Software Libre	+	+	+	-
Liviano	+	+	+	-
Bajo Costo	+	+	+	-
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>4</b>

**Tabla 25**

*Especificaciones de ESP32 (Tarjeta de Adquisición de Datos)*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ilustración</b>
Numero de Pines	38	
Voltaje de Alimentación	5 [V]	
Corriente de Operación	80 [mA]	
Temperatura de operación	-40 a 85 °C	
Módulos	I2C	
Comunicación	Wifi, Bluetooth	



Nota. Tomado de la página web del fabricante (Espressif, 2020)

**Tarjeta de Control.** La tarjeta de control es el sistema central del robot ya que será el encargado de recibir toda la información referente al mismo, interpretarla y tomar decisiones que

serán enviadas al ordenador o bróker central. El nexa generado con el bróker es bidireccional ya que se encargará de recibir señales de la unidad central y deberá entregarla al robot en un lenguaje que pueda entender para su funcionamiento. Por las tareas antes mencionadas, la tarjeta de control necesita una capacidad de procesamiento mayor a las tarjetas de adquisición de datos. En la Tabla 26 se analiza 2 opciones que se presentan comercialmente:

**Tabla 26**

*Opciones de Controlador del Robot*

Variable	Tarjeta de Control	Descripción	Ilustración
A	NUC	Microcomputador desarrollado por Intel. Dimensiones 11x11x3.5 cm. RAM hasta de 32 Gb y con un procesador Intel Core i3, puerto USB y HDMI. Comunicación por Wifi (Intel, 2019).	
B	Raspberry	Microcomputador con un CPU de 64 bits y comunicación wifi, bluetooth. Cuenta con pines Gpio para programación, con puertos USB y entrada HDMI (Raspberrypi.org, 2019)	

**Análisis y Decisión.** Los dos microcomputadores mostrados en la Tabla 26 muestran características similares en funcionamiento y ventajas que ofrece en conexión. Por un lado, el procesamiento de la NUC es mayor, un punto que podría ser clave en caso de que el robot en su sistema local trabajara con visión artificial y procesamiento de imágenes, sin embargo, toda esta funcionalidad se da de forma externa en un broker central por lo cual con el procesamiento que

ofrece raspberry pi es suficiente. Además, el costo del ultimo microcomputador mencionado es considerablemente menor y de igual forma el peso que ejerce. Con estas premisas se selecciona la raspberry pi como tarjeta de control del robot cuyas especificaciones técnicas del modelo comercial se resumen en Tabla 27.

**Tabla 27**

*Especificaciones Técnicas Raspberry PI 3B+*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Numero de Pines	40 pines GPIO
Voltaje de Alimentación	5 [V]
Corriente de Operación	2.5 [A]
Temperatura de operación	0 a 50 °C
Procesador	Cortex-A53 64-bit
Comunicación	Wifi, Bluetooth
Puertos USB	4
HDMI	Si

Nota. Datos técnicos tomados de la página oficial de Raspberry.org

**Dimensionamiento de Fuente de Alimentación del Sistema.** Con todos los elementos electrónicos seleccionados, se debe considerar cuidadosamente la fuente de alimentación, por lo cual, la Tabla 28 sintetiza las variables de voltaje y corriente necesarios para el dimensionamiento.

**Tabla 28**

*Consumo Energético Subsistema Electrónico*

<b>Elemento</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Corriente por elemento [mA]</b>	<b>Corriente Total [mA]</b>
Motor DC	6	180	720
MPU 6050	1	3.9	3.9
L298N	5-35	36	72
ESP32	5	80	80

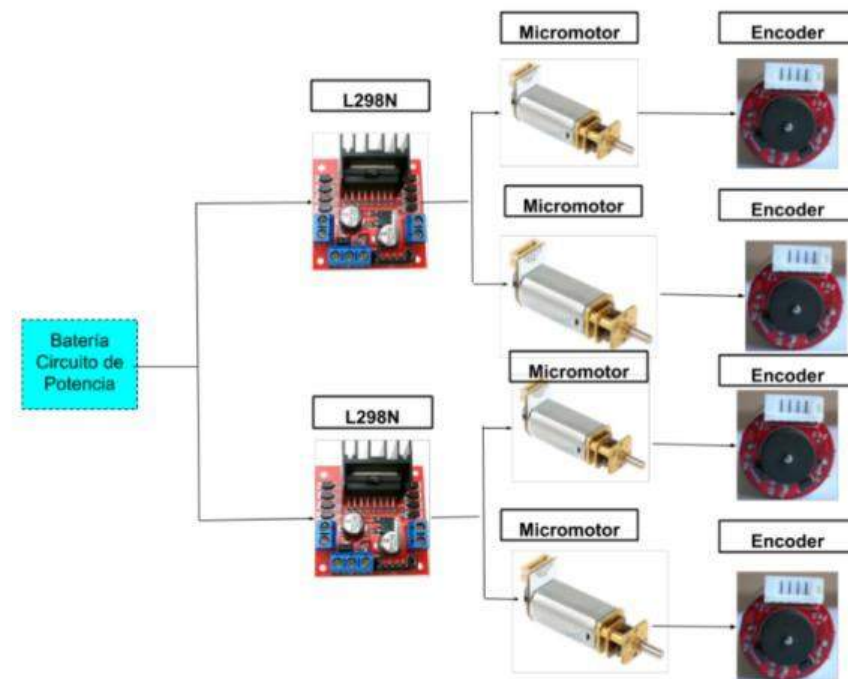
Elemento	Voltaje [V]	Corriente por elemento [mA]	Corriente Total [mA]
Raspberry Pi 3B+	5	2.5 [A]	2500
Gripper	5	18	18

Con el objetivo de separar el sistema de control del de potencia se realiza una distribución de los elementos, alimentándolos por separado para evitar fallos en el desempeño a causa de picos de corriente o caídas de tensión.

**Circuito de Potencia.** La distribución establecida para el sistema se esquematiza en la Figura 33, donde aprecia los elementos del circuito de potencia el cual cuenta de los preactuadores y los motores que están dotados con el encoder.

**Figura 33**

*Distribución de Elementos en Circuito de Potencia*

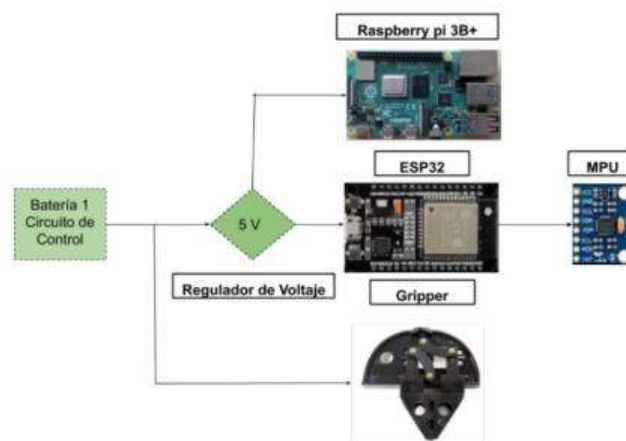




**Circuito de Control.** En la Figura 34 se puede apreciar el esquema general del circuito de control en el cual se tiene principalmente las tarjetas ESP32, Raspberry Pi, la unidad inercial y actuador aplicado en la sección de trabajo colaborativo que se verá en secciones posteriores. Debido a que las tarjetas de adquisición de datos y control requieren una entrada de voltaje de 5 V y un regulador de tensión.

**Figura 34**

*Distribución de Elementos en Circuito de Control*



**Determinación de fuente.** Apoyándose de los datos técnicos de los elementos electrónicos mencionados se realiza el análisis de corriente del sistema de potencia y control como se muestra en (5) y (6) para determinar su consumo.

$$I_{\text{CircuitoPotencia}} = 4 \cdot I_{\text{motor}} + 2 \cdot I_{\text{driver}} \quad (5)$$

$$I_{\text{CircuitoPotencia}} = 792 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{CircuitoControl}} &= I_{\text{ESP32}} + I_{\text{Raspberry}} + I_{\text{IMU}} + I_{\text{Gripper}} \\
 I_{\text{CircuitoControl}} &= 2601.9 \text{ mA}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Tomando como base que se necesita que el sistema funcione de forma autónoma un tiempo mínimo de 30 min, se realiza el análisis en función de (7).

$$\begin{aligned}
 \text{Capacidad}_{\text{bateria}} &= I_{\text{req}} \cdot t \\
 \text{Capacidad}_{\text{CircuitoControl}} &= 2601.9 \text{ mA} \cdot 0.5 \text{ h} = 1300.95 \text{ mAh} \\
 \text{Capacidad}_{\text{CircuitoPotencia}} &= 792 \text{ mA} \cdot 0.5 \text{ h} = 792 \text{ mAh}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

En función de los parámetros de capacidad teóricos presentados y la necesidad de un voltaje de trabajo de 6V y 5V principalmente, se opta por usar una batería Lipo 2s 7.4V de 1.5 Ah para el circuito de potencia debido a la necesidad de sobre corriente en los motores y para el circuito de control al no necesitar de un sobre pico de corriente, se opta por una batería NiMH de 7.4V y 3 Ah. La capacidad de estas baterías (Figura 35) proveen una mayor capacidad que provee teóricamente casi el doble de tiempo de funcionamiento necesario, garantizando el correcto funcionamiento.

**Figura 35**

*Fuentes de Alimentación Circuito de Control y de Potencia*



Nota. Fotografías obtenidas de Mercadolibre.com

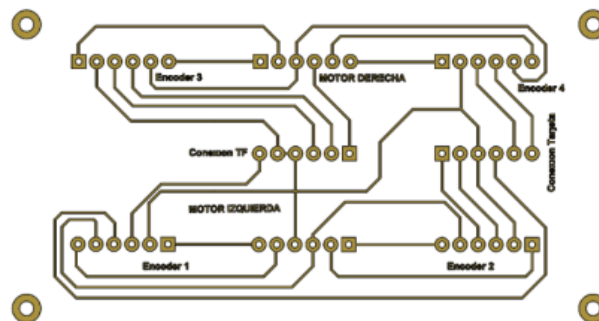
### ***Integración de Subsistema Electrónico***

En la sección de diseño del subsistema electrónico se han seleccionado cada uno de los elementos que permitirán la adquisición de datos, control y ejecución del sistema. Para su integración es necesario el diseño de placas PCB que permitan identificar la conexión de los elementos con el fin de implementar una estructura modular y organizada se ha dividido en 3 tarjetas y sus esquemas y planos detallados se presentan en el Apéndice C.

**Tarjeta de Integración del Sistema de Movimiento.** Tarjeta que se encarga de la integración de los elementos que permiten el movimiento y adquisición de datos del vehículo. La PCB se muestra en la Figura 36, y consta la inclusión de motores que se encuentran conectados previamente al driver L298N y los encoder de cada una de las llantas. Además, cuenta con pines de alimentación y energización de cada uno de los componentes.

**Figura 36**

*Tarjeta de Conexión PCB Sistema de Movimiento*



**Tarjeta Reguladora de Voltaje.** El objetivo de la tarjeta es la integración del regulador de voltaje a 5 V que alimenta sistemas como la ESP32 y la Raspberry ya que el voltaje de alimentación



## Integración Subsistema Electrónico y Subsistema Mecánico

Con los elementos electrónicos definidos y el sistema de conexión establecido mediante el uso de placas PCB se debe precisar el espacio en el cual los elementos serán ubicados, permitiendo un montaje efectivo dentro de la plataforma. En la sección de Subsistema Mecánico se indicó que la plataforma cuenta con 3 niveles y cada uno cuenta con un circuito de conexión detallado en Apéndice C.

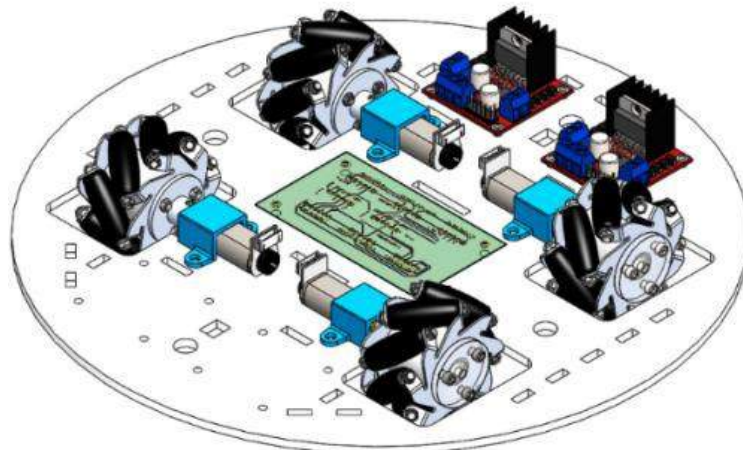
### *Primer Nivel*

El primer nivel se encuentra orientado a los elementos que se encargan de la locomoción del sistema, como se presenta en la Figura 39.

- **Subsistema Mecánico:** llantas, soportes, motores y plataforma base
- **Subsistema Electrónico:** Driver L298N, Placa de Integración del Sistema de Movimiento

**Figura 39**

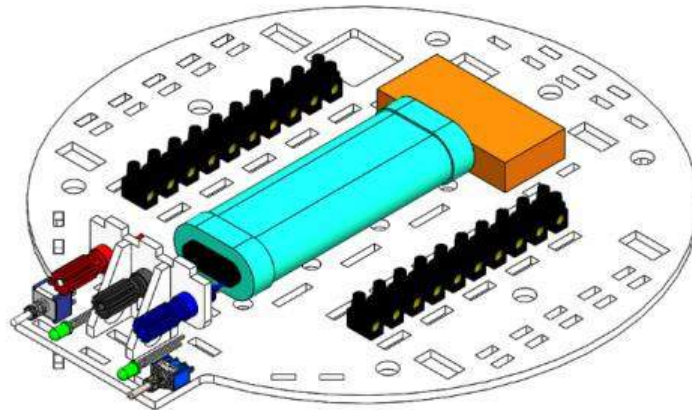
*Distribución electrónica y mecánica de Plataforma del Robot Nivel 1*



## ***Segundo Nivel***

**Figura 40**

*Plataforma del Robot Nivel 2*



En la Figura 40 se observa la distribución de elementos del segundo nivel de la plataforma, la cual está destinada específicamente a los elementos que se encargan de la alimentación del subsistema electrónico.

- **Subsistema Mecánico:** Plataforma del Segundo Nivel
- **Subsistema Electrónico:** Baterías Lipo de control y NiMH de potencia, borneras que faciliten la conexión y adaptadores banana para la carga del sistema.

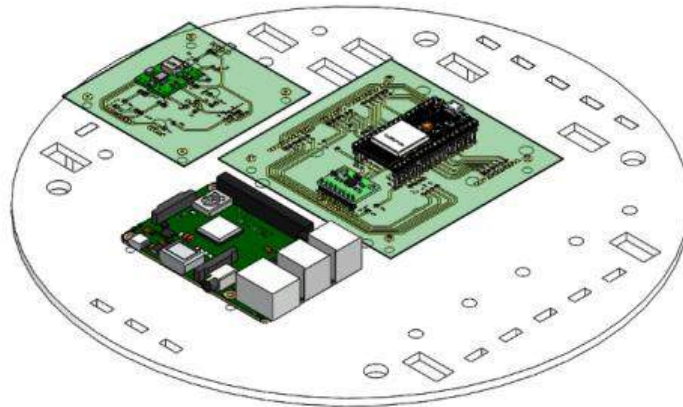
## ***Tercer Nivel***

El tercer nivel está orientado únicamente a la distribución de los elementos encargados del control del robot móvil y se puede evidenciar en la figura 39.

- **Subsistema Mecánico:** Plataforma del Tercer Nivel
- **Subsistema Electrónico:** Tarjeta Reguladora de Voltaje, Tarjeta de Integración DAQ e IMU y Raspberry Pi3 B+.

**Figura 41**

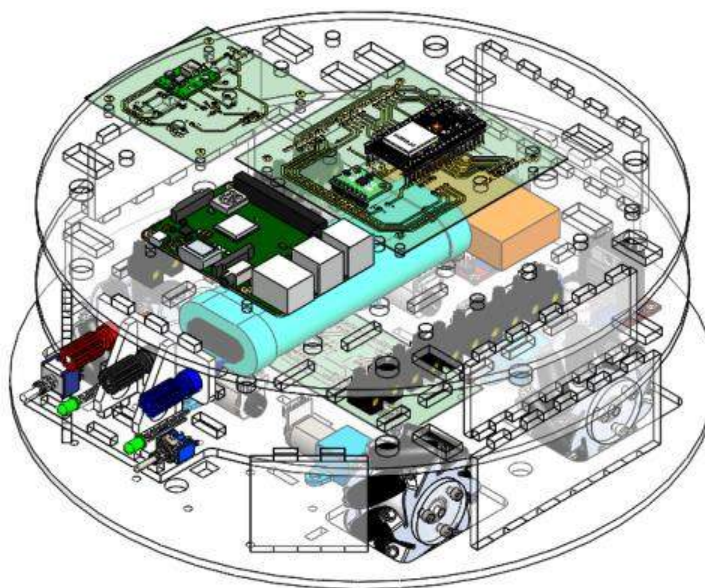
*Plataforma del Robot Nivel 3*



La Figura 42 se presenta el diseño del robot móvil en el cual se encuentra integrado los 3 niveles dotados con los elementos del subsistema mecánico y electrónico.

**Figura 42**

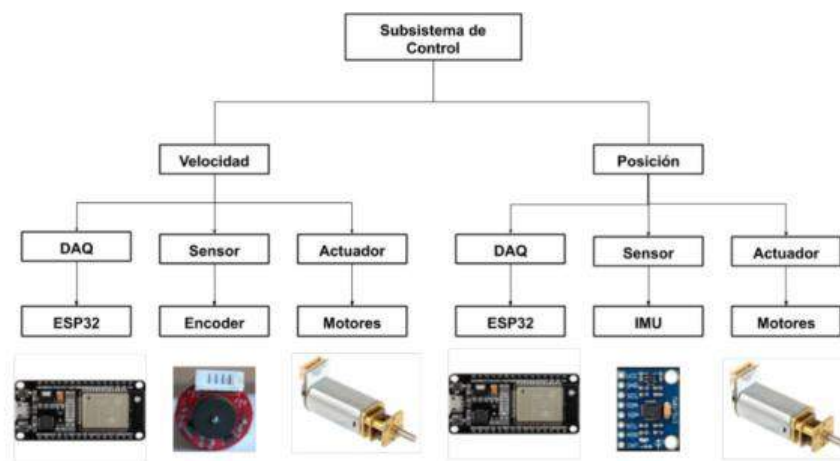
*Integración Subsistema Mecánico y Electrónico*



## Subsistema de Control

Figura 43

Diagrama de Subsistema de Control



El control se emplea para modificar el comportamiento de un sistema con el fin de tener un funcionamiento de forma específica y deseable con el tiempo (Sy Salim & Zainon, 2010). En el presente sistema es necesario tener control de 2 variables que son la velocidad y la posición del robot como se observa en la Figura 43. La implementación del control es realizada una tarjeta de desarrollo para la adquisición de datos obtenidos de los sensores encoder e IMU.

### **Control de Velocidad**

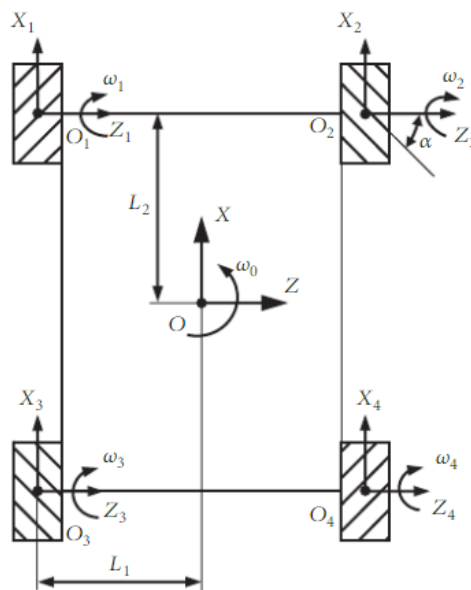
Uno de los requerimientos principales del sistema es el control de velocidad, seteado a 0.04 m/s, necesario para establecer el proceso de odometría del robot posteriormente aplicado en la localización. Es necesario establecer el modelo matemático del sistema con el fin de tomar decisiones para el diseño del controlador.



**Modelo Cinemático.** El análisis cinemático del robot toma en cuenta la disposición de una plataforma simétrica de 4 ruedas omnidireccionales con rodillos a 45 grados. El sistema de coordenadas está configurado para coincidir con el centro de la plataforma. Los ángulos de inclinación de todos los rodillos son denotados con  $\alpha$  y las líneas diagonales que se observa en la Figura 42 indican la disposición de los rodillos en contacto con el suelo (Li et al., 2018).

**Figura 44**

*Sistema de Coordenadas Plataforma Móvil*



*Nota.* Imagen tomada de *Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn*, Li ,et al, 2018.

En el supuesto de que el rodillo no se deslice contra el suelo y la plataforma se mueva en el plano horizontal, la ecuación cinemática inversa del sistema puede establecerse mediante análisis de cinemática (8). (Tatar et al., 2014).

$$V_{iw} = \omega_{iw} \cdot R_w \quad (8)$$

El problema cinemático inverso se escribe en función de (9),(10) y (11)

$$V_w = J_0 \cdot V_0 \quad (9)$$

$$V_w = [V_{1w} \ V_{2w} \ V_{3w} \ V_{4w}]^T \quad (10)$$

$$V_0 = [v_x \ v_y \ w_z]^T \quad (11)$$

Se forma la matriz de transformación  $J_0$  expresada por (12)

$$J_0 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\tan \alpha} & -\frac{L_1 \cdot \tan \alpha + L_2}{\tan \alpha} \\ 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & \frac{L_1 \cdot \tan \alpha + L_2}{\tan \alpha} \\ 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & -\frac{L_1 \cdot \tan \alpha + L_2}{\tan \alpha} \\ 1 & -\frac{1}{\tan \alpha} & \frac{L_1 \cdot \tan \alpha + L_2}{\tan \alpha} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde  $\alpha$  tiene un valor de  $45^\circ$  y da como resultado (13)

$$J_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_1 + L_2) \\ 1 & 1 & (L_1 + L_2) \\ 1 & 1 & -(L_1 + L_2) \\ 1 & -1 & (L_1 + L_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

La ecuación (9) sobre la velocidad angular de las ruedas se amplifica en (14)

$$\begin{bmatrix} \omega_{1w} \\ \omega_{2w} \\ \omega_{3w} \\ \omega_{4w} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_w} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_1 + L_2) \\ 1 & 1 & (L_1 + L_2) \\ 1 & 1 & -(L_1 + L_2) \\ 1 & -1 & (L_1 + L_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

Desarrollando (14) se presenta las velocidades angulares de cada rueda en (15)

$$\begin{cases} \omega_{1w} = \frac{1}{R_w} \cdot (v_x - v_y - (L_1 + L_2) \cdot w_z) \\ \omega_{2w} = \frac{1}{R_w} (v_x + v_y + (L_1 + L_2) \cdot w_z) \\ \omega_{3w} = \frac{1}{R_w} (v_x + v_y - (L_1 + L_2) \cdot w_z) \\ \omega_{4w} = \frac{1}{R_w} (v_x - v_y + (L_1 + L_2) \cdot w_z) \end{cases} \quad (15)$$

A partir de (9) se obtiene la cinemática inversa en (16)

$$J_0^+ = (J_0^T \cdot J_0)^{-1} \cdot J_0^T$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} = \frac{R_w}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{L_1 + L_2} & \frac{1}{L_1 + L_2} & -\frac{1}{L_1 + L_2} & \frac{1}{L_1 + L_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{1w} \\ \omega_{2w} \\ \omega_{3w} \\ \omega_{4w} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Con (16) se obtienen las consideraciones de (17)

$$v_x = \frac{R_w}{4} \cdot (\omega_{1w} + \omega_{2w} + \omega_{3w} + \omega_{4w}) \quad (17)$$

$$v_y = \frac{R_w}{4} \cdot (-\omega_{1w} + \omega_{2w} + \omega_{3w} - \omega_{4w})$$

$$w_z = \frac{R_w}{4} \cdot \left( -\frac{1}{L_1 + L_2} \cdot \omega_{1w} + \frac{1}{L_1 + L_2} \cdot \omega_{2w} - \frac{1}{L_1 + L_2} \cdot \omega_{3w} + \frac{1}{L_1 + L_2} \cdot \omega_{4w} \right)$$

El robot dispone de 3 grados de libertad en función de  $v_x, v_y, w_z$  de las 4 ruedas que pueden ser asignadas de forma independiente. La dirección del movimiento resultante se define en (18) y la velocidad resultante en (19) del robot omnidireccional.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (18)$$

$$v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (19)$$

Con la aplicación de las ruedas omnidireccional es posible tener una variedad de movimientos a partir de la variación del giro de las llantas como se resume en la Figura 45. Además, en la Tabla 29 se identifican los movimientos que se llevaran a cabo y las velocidades necesarias para cumplir con los requerimientos del sistema.

**Figura 45**

*Tipos de Movimientos en Robots Plataformas Omnidireccionales*

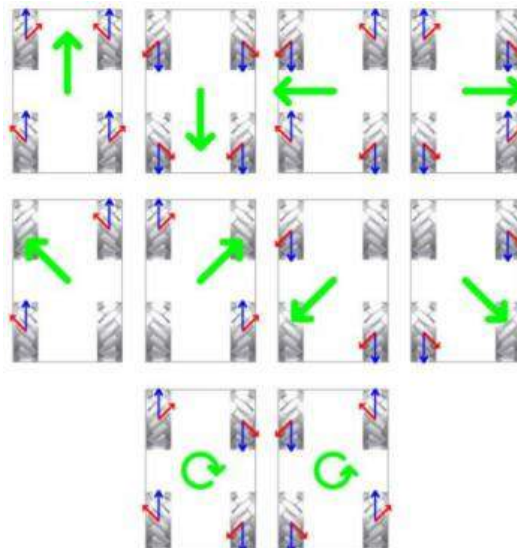


Tabla 29

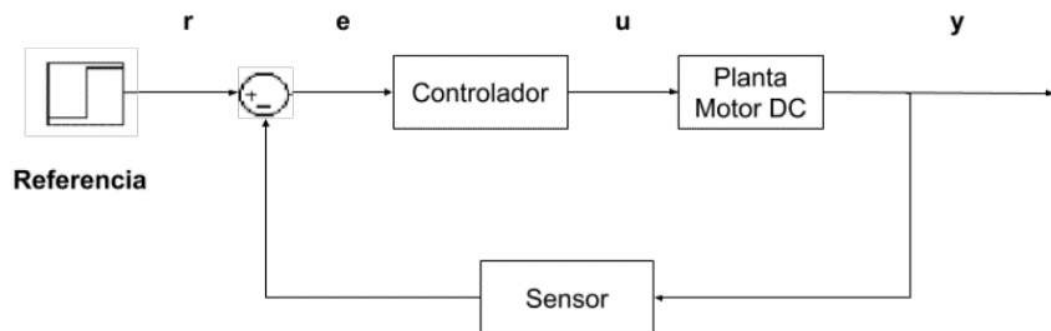
*Velocidades y Direcciones del Sistema del Robot Omnidireccional*

Variable	Descripción	$V_x$ [m/s]	$V_y$ [m/s]
A	Adelante	0.04	0
B	Atrás	-0.04	0
C	Derecha	0	0.04
D	Izquierda	0	-0.04
E	Diagonal/Izquierda-Adelante	0.04	-0.04
F	Diagonal/Derecha-Adelante	0.04	0.04
G	Diagonal/Izquierda-Atrás	-0.04	-0.04
H	Diagonal/Derecha-Atrás	-0.04	0.04

**Diseño del Controlador.** Para cumplir con el requerimiento del sistema y a partir del modelamiento cinemático mostrado anteriormente, se observa que la velocidad lineal del sistema está ligada con las velocidades angulares de las ruedas, por lo cual se plantea el lazo de control de la Figura 46. El control cuenta con una señal de referencia la cual será la velocidad planteada como requerimiento que es de 0.04 m/s; además de un bloque referente al controlador, una señal de retroalimentación obtenida del sensor (encoder) y finalmente el bloque de la planta que en el presente proyecto son los motores del robot.

Figura 46

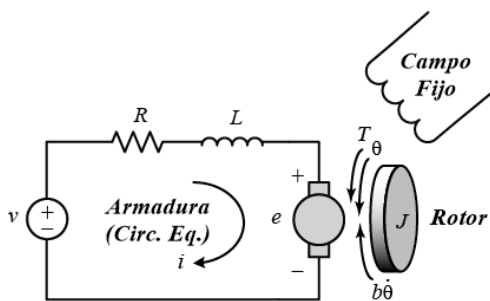
*Esquema de Diagrama de Control de la Variable Velocidad*



**Modelamiento Matemático de la Planta Teórico.** En el diseño del controlador inicialmente es necesario obtener la función de transferencia de la planta, en este caso el motor DC, que se comporta como se muestra en la Figura 45 y la cual posee una sección eléctrica y mecánica. Se toma (Garces & Gaviria, 2014) como referencia para el análisis y modelamiento de la planta.

**Figura 47**

*Motor DC controlado por Voltaje de Armadura*

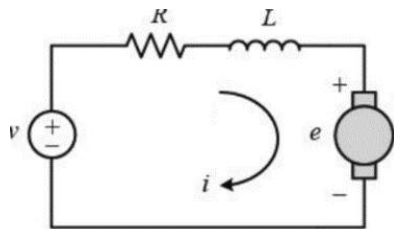


Nota. Diagrama obtenido de Control PID para el control de velocidad de un motor DC, Garcés & Gaviria, 2014.

**Componente Eléctrico.** Se toma en cuenta el circuito equivalente que existe en el motor representado en la Figura 48 y analizado por el método de mallas en (20).

**Figura 48**

*Circuito Eléctrico del Motor DC*

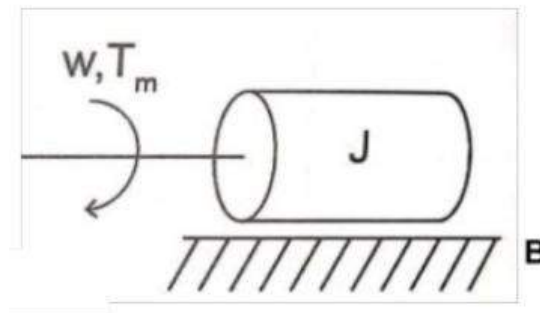


$$V(t) = R \cdot i + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (20)$$

**Componente Mecánico.** En el componente mecánico se toma en cuenta la Figura 49, el cual representa el acople del eje del motor a la carga que está llevando en este caso la rueda y se plantea

**Figura 49**

*Sistema Mecánico en Motor DC*



$$T_m(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) \quad (21)$$

Existe una relación proporcional entre el voltaje inducido en la armadura y la velocidad angular inducida en el motor en (22) y con la relación proporcional del torque a la corriente eléctrica en (23). Son llevadas al dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Laplace en (24) y se obtiene la función de transferencia de la planta en (25).

$$e(t) = k_a \cdot \omega(t) \quad (22)$$

$k_a$ : es la constante de generación del motor

$$T_m(t) = k_m \cdot i(t) \quad (23)$$

$k_m$ : es la constante mecánica del motor.

$$\begin{cases} L \cdot s \cdot I(s) = V(s) - R \cdot I(s) - E(s) \\ J \cdot s \cdot \omega(s) = T_m(s) - B \cdot \omega(s) \\ E(s) = k_a \cdot \omega(s) \\ T_m(s) = k_m \cdot I(s) \end{cases} \quad (24)$$

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_m}{LJs^2 + (RJ + LB)s + (RB + k_m k_a)} \quad (25)$$

**Modelamiento Practico de la Planta.** En el modelamiento práctico de la planta (motor DC) se establece una toma de datos con el uso del sensor (encoder) y la tarjeta de adquisición de datos (esp32) para observar su comportamiento ante una excitación de entrada escalón (entrada de voltaje) y con lo cual se obtendrá la función de transferencia que refleja su comportamiento. Se emplea el programa de identificación de planta del software Matlab (Fruk et al., 2013) obteniendo (26). Los datos detallados y tablas se visualizan en el Apéndice D.

$$Y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (26)$$



Tomando en cuenta que la planta representa a cada uno de los motores se obtiene los parámetros de  $K$  y  $\tau$  para cada una como se muestra en Tabla 30.

**Tabla 30**

*Parámetros de Funciones de Transferencia de las Plantas*

<b>Parámetro</b>	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>	<b>Motor 3</b>	<b>Motor 4</b>
$K$	0.084	0.083	0.084	0.083
$\tau$	0.096	0.093	0.095	0.094

**Controlador PID.** Para el controlador PID de la Figura 50 se opta por tomar la función de transferencia práctica (26) para reflejar la realidad del sistema. Además, aplicando el primer método de sintonización de Ziegler Nichols (Kushwah & Patra, 2014), se busca obtener los parámetros que serán aplicados en el controlador, tomando como base que para un PI serán como se describe en la Tabla 31.

**Tabla 31**

**Sintonización por el Método de Ziegler Nichols en Controlador PI**

<b>Tipo</b>	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<i>PI</i>	$0.9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0

Al reemplazar los parámetros señalados en las ecuaciones de la tabla, los cuales se adquieren de la curva generada por el comportamiento de la planta, se obtienen los valores de  $K_p$  y  $T_i$  para cada uno de los motores, posteriormente, se lleva a cabo el reemplazo en (27).

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} \quad (27)$$

Se lleva a cabo el cálculo del controlador del motor 1 que será replicado para el resto de las plantas.

$$k_p = 0.9 \cdot \frac{T}{L}$$

$$k_p = 0.9 \cdot \frac{0.66}{0.03} = 22$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{0.03}{0.3} = 0.1$$

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} = \frac{22}{0.1} = 220$$

A partir de los valores obtenidos de forma teórica se realiza una segunda aproximación mediante Matlab que permita mantener la velocidad de los motores constante a partir de una consigna previamente establecida (L. Wang et al., 2015). Con el método de sintonización se ha generado el controlador PI con los valores que se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32**

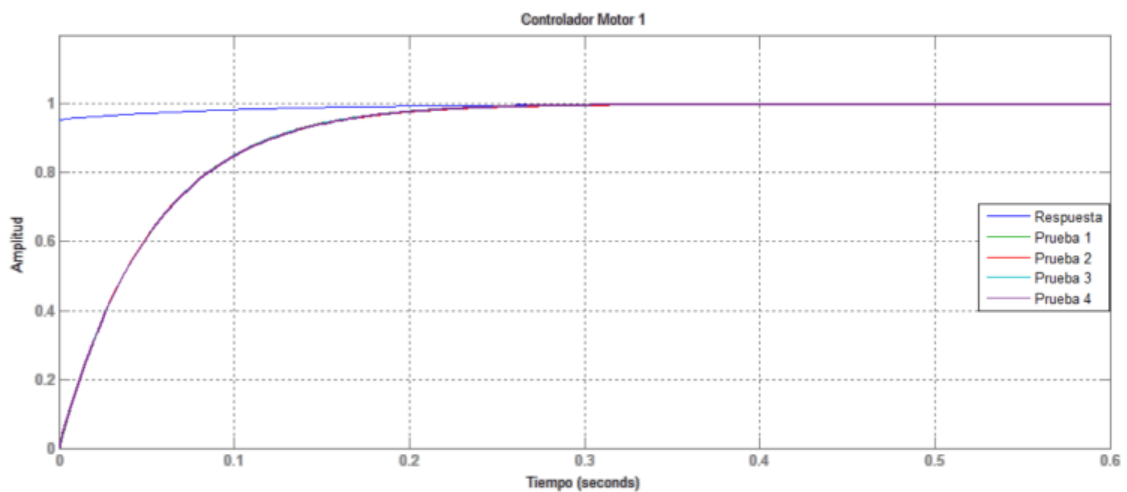
*Parámetros de Controlador PI para cada Planta*

Parámetro	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
$K_p$	21.38	20.74	20.79	20.48
$K_i$	227.57	276.45	221.00	183.35

Nota.  $k_d$  es cero en todos los motores y genera un controlador PI.

Figura 50

Prueba de Controlador PI para la Planta 1



Nota. Cada planta o motor es sometido a 4 pruebas y se presenta la planta con mejor resultado.

El comportamiento del sistema del motor 1 se muestra en la figura. Se observa que permite obtener una velocidad constante clave para el movimiento del robot móvil junto con la odometría. El proceso detallado de sintonización se presenta en el Apéndice D.

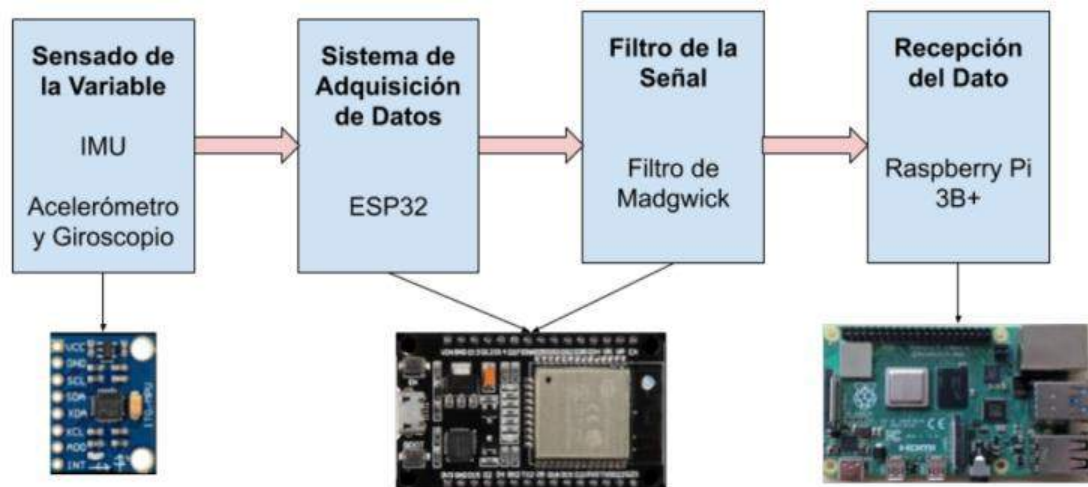
### **Control de Orientación**

Con el fin de evitar errores en la trayectoria se utiliza una unidad de medición inercial que consta de acelerómetros y giroscopios como se ha explicado en secciones anteriores. El sistema de adquisición de datos y de filtrado se lo lleva a cabo dentro de la esp32, aprovechando sus recursos. La Figura 51 muestra el proceso completo del sistema de adquisición en el cual se obtiene la señal física por medio de la IMU que será transmitida la esp32 acondicionando la señal

a partir de calibración y un filtro digital Madgwick. Finalmente, la señal procesada se envía al controlador que se encuentra montado en la Raspberry.

**Figura 51**

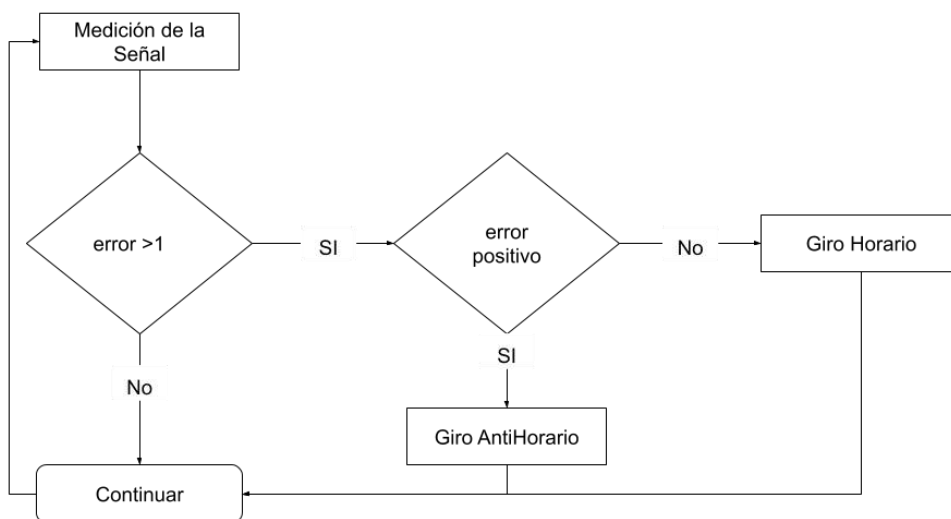
*Proceso del Control de Trayectoria*



**Flujo de Control.** La calibración de orientación del robot es un controlador ON/OFF que se encarga de accionar los actuadores con el fin de corregir el error. El flujo de este proceso se esquematiza en la Figura 52. Analizando el flujo en el caso de que el error sea mayor a  $1^\circ$ , se procede a analizar si el error es positivo o negativo y de esta forma se enviara una señal a los actuadores que permitirá el giro del robot en sentido horario o antihorario.

Figura 52

Control de Orientación del Robot



### Localización Local

Al momento de trabajar con robots autónomos uno de los requerimientos más importantes es estimar su posición y orientación en un instante de tiempo. El principal sistema de localización intrínseco de los robots móviles es partir del uso de odometría el cual puede mejorar considerablemente su funcionamiento al combinar las mediciones de las variables de posición (odometría de rueda) y orientación (IMU) a partir de un filtro de Kalman (Bravo et al., 2013).

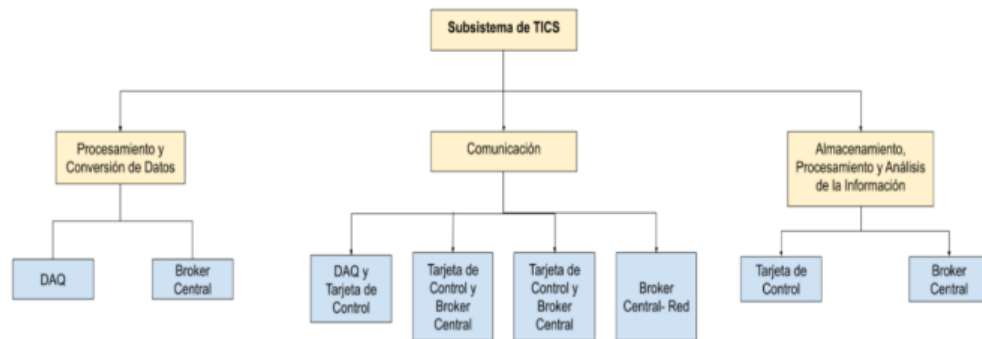
El valor de orientación es obtenido a partir de la IMU, por otro lado, es necesario estimar el desplazamiento lineal del robot lo cual se lleva a cabo a partir del uso de los encoder en las ruedas transformando el desplazamiento angular de la rueda en un movimiento lineal a partir del factor de conversión entre los “pulsos del encoder/distancia lineal” de la ecuación ... permitiendo conocer la posición del robot.

$$c_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n \cdot C_e} \quad (28)$$

### Subsistema Tics

**Figura 53**

*Aplicación del Subsistema Tics en el Sistema Multirobot*



El concepto de TIC (tecnología de la información y la comunicación) son aquellas que incluyen técnicas aplicadas para generar y procesar datos, convertir estos datos en información y luego almacenar, recuperar, procesar, analizar y transmitir esta información para la investigación y el desarrollo. Las tecnologías TIC como Internet, telefonía móvil, comunicaciones por satélite y televisión digital por cable son algunos de los ejemplos clásicos (Saini et al., 2015). Con el fin de incorporar las tareas antes mencionadas se elabora una aplicación detallada en la Figura 53.

#### ***Procesamiento y Conversión de Datos***

**Tarjeta de Adquisición de Datos (ESP32).** Primer proceso que se lleva a cabo dentro de los vehículos. La ESP32 tiene múltiples labores en el procesamiento y conversión de datos que se detallan a continuación:

- **Adquisición de Datos:** La ESP32 en primer plano presenta un funcionamiento de DAQ obteniendo los valores de los sensores de velocidad (encoder) de las 4 ruedas y de la IMU (MPU 6050).
- **Conversión de Datos:** Únicamente se recibe los datos en bruto de sensores, por lo cual es necesario llevar a cabo una conversión en variables utilizables como la velocidad de las ruedas y el ángulo de giro del vehículo, además, de las respectivas calibraciones de los sensores como en el caso de la IMU.
- **Control de Variables:** Establece los controladores que fueron mencionados en la sección anterior tanto para la velocidad como en el ángulo de giro de los vehículos.

**Tarjeta de Control (Raspberry).** Dentro de la tarjeta de control se encuentra varias funcionalidades principalmente enfocadas al procesamiento de la información para la aplicación en el subsistema de localización de cada uno de los robots generada a partir de odometría y además la toma de decisiones al controlar los vehículos móviles.

- **Procesamiento de distancia longitudinal:** Obtener el desplazamiento del robot móvil, a partir del uso de los pulsos generado por los encoder de las ruedas.
- **Procesamiento de orientación del robot:** Uso de sistema de referencia intrínseco del robot generado por la IMU, que a partir de la variación de los datos del sensor se obtiene el ángulo para su validación local.
- **Toma de decisiones:** Selección de la actividad a desempeñar relacionadas directamente con el movimiento de los robots dependiendo de las acciones que se van a llevar a cabo,

entre ellas el desplazamiento (adelante, atrás, diagonal, etc.), el frenado del sistema, el giro del robot móvil y el accionar del actuador.

**Broker Central.** Al ser un sistema centralizado todos los procesos y acciones son controlados desde un punto determinado, en este caso el bróker central (computador). Es el corazón de la aplicación y tiene tareas de control general, monitoreo del sistema, y toma de decisiones.

- **Monitoreo del Sistema:** Encargado de obtener información de interés de los robots como su velocidad, posición, y el estado de funcionamiento de los robots.
- **Control General:** Gestión de los modos de funcionamiento del robot (manual, automático e iot) de los cuales se hablará en secciones posteriores y la configuración de los parámetros con los cuales va a funcionar.
- **Toma de decisiones:** Principalmente enfocado en el modo automático. El sistema se encarga de la generación de rutas que los robots deben seguir evitando obstáculos dentro del entorno y además la planificación para que los vehículos lleven a cabo el proceso de clasificación, estableciendo condiciones de funcionamiento.

**ROS (Robot Operating System).** Las aplicaciones y tareas mencionadas de la tarjeta de control son desarrolladas con ROS, el cual es un entorno de programación de código abierto. Incluye ciertas características, entre ellas, la comunicación entre hardware y software, control de dispositivos, transmisión de mensajes y otras. Además, brinda herramientas y librerías para obtener, compilar, escribir y ejecutar código en varios equipos. Funciona bajo una estructura de



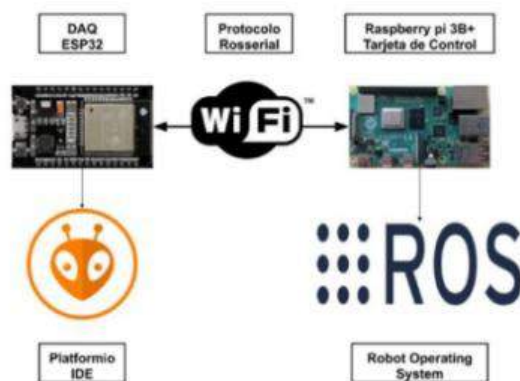
nodos suscriptor y publicador para el envío y recepción en base a canales virtuales llamados tópicos (Joseph, 2018).

### **Comunicación del Sistema**

**Comunicación entre la DAQ y la Tarjeta de Control.** Acorde a las especificaciones establecidas, existen ciertos procesos que son desarrollados por la ESP32 y raspberry, sin embargo, para el funcionamiento general es necesario el envío y recepción de datos entre ellos mostrados en Figura 54. Con el fin de reducir los tiempos de comunicación se opta por utilizar rosserial como un protocolo de comunicación de punto a punto a través de una línea de transmisión. Una de las ventajas que ofrece el sistema es la capacidad de multiplexar la información a diferentes tópicos y se puede acceder a este protocolo a partir de un puerto serial o un a toma de red. El número máximo de nodos suscriptores y publicadores que se puede tener es de 25 y tiene un máximo de 512 bytes de serialización lo cual es lo suficientemente grande para un microcontrolador con SRAM (*ROS Wiki, s. f.*).

**Figura 54**

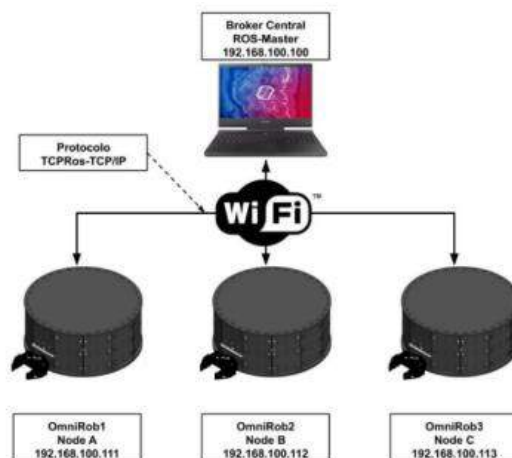
*Comunicación entre DAQ Y Tarjeta de Control*



**Comunicación Tarjeta de Control- Bróker Central.** La plataforma móvil cuenta con tres robots móviles de los cuales cada uno posee su respectiva tarjeta de control que a su vez este comunicado con la DAQ. Tomando lo antes mencionada como base, el bróker debe encontrarse en una comunicación constante con cada uno de los robots para su control y monitoreo. Además, como requerimiento principal es necesaria la comunicación inalámbrica entre robots y el computador central y con una compatibilidad directa con Ros. Con el fin mencionado, se opta por Rosmaster; nodo especial que se lanza cada vez que se inicia ROS. Maneja el registro, suscripciones y desconexión de cada nodo al conectarse a la red para que todos los mensajes puedan llegar con éxito a su objetivo y su estructura es de maestro-esclavo. Los nodos se conectan a otros nodos directamente; el maestro solo proporciona búsqueda de información, muy similar a un servidor DNS. El protocolo más común utilizado en un Rosmaster se llama TCPROS, que toma como base el protocolo TCP / IP estándar (Pandya, 2015). La Figura 55 representa la comunicación entre los elementos

**Figura 55**

*Comunicación entre Bróker Central y Tarjetas de Control de Cada Robot*







**Comunicación Bróker Central- Nube.** El sistema está dotado con una arquitectura iot para el monitoreo y control en tiempo real en cualquier parte del mundo. Con el fin de establecer una comunicación eficiente se emplea herramientas que han demostrado su validez para aplicaciones iot entre ellas una de las más importantes que es Node-Red. Dentro del proyecto brinda comunicación con Ros a partir de Snappy, que permite generar nodos publicadores y suscriptores en red para el intercambio de información (*Node-RED*, s. f.).

**Servicio IOT.** Con node-red se establece un nexo entre el bróker central y la red sin embargo al utilizar snappy únicamente se ha generado una comunicación local por lo cual es necesario generar comunicación entre node-red y un servidor externo que permita la comunicación con la nube. En la Tabla 33 se muestra los principales servicios que pueden ser utilizados para aplicaciones IoT.

**Tabla 33**

*Tipo de Servicios IOT*

Variable	Plataforma	Ventajas	Ilustración
A	AWS Plataforma lot	Conectividad Autenticación Desarrollo del Entorno Motor de Reglas Comunicación bajo el protocolo MQTT o HTTP	
B	Cisco lot	Conectividad Móvil Aprendizaje de Maquina para seguridad Comunicación bajo el protocolo MQTT	

Variable	Plataforma	Ventajas	Ilustración
C	Google Cloud	Conectividad Manejo de Dispositivos Comunicación bajo el protocolo MQTT y HTTP	
D	IBM Watson	Conectividad Manejo de Dispositivo Monitoreo de Dispositivo Manejo de Datos en tiempo real para analítica Permite el trabajo con blockchain Comunicación bajo el protocolo MQTT y HTTP	

**Nota.** Información obtenida de sus respectivas páginas oficiales de internet

Se tiene varias opciones de servidores orientados a la gestión de dispositivos IoT, sin embargo, al ser una funcionalidad básica la que se va a tener dentro del sistema, se tiene ciertos requerimientos. Debe tener comunicación con node-red, capacidad del monitoreo Y control de dispositivos, y un costo bajo por lo cual se plantea la matriz de selección de la Tabla 34. Los diferentes servicios que se tiene para el trabajo con dispositivos IoT comparten características y el factor fundamental recae en el costo del servicio. Al ser IBM una opción que ofrece una versión de prueba gratuita en la cual se incluye la capacidad de trabajo con 200 dispositivos con una capacidad de 400MB al mes lo convierte en una opción fiable para el desarrollo del servicio. IBM Watson lot es un servicio autogestionado generado en la nube que permite una fácil extracción de datos de los diferentes dispositivos, brinda varias funciones entre ellas registrar dispositivos, control, conectividad, monitoreo y almacenamiento de datos (Hurel, 2018).

**Tabla 34**

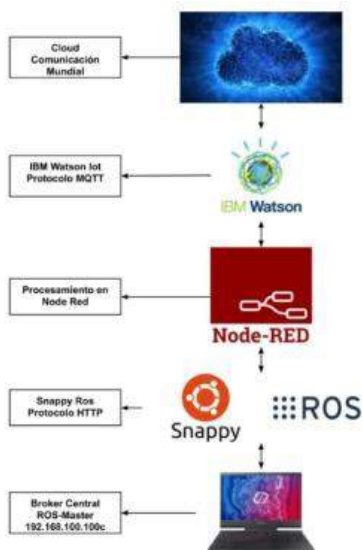
*Matriz de Selección de Servicios IOT*

Crterios	A	B	C	D
Conectividad	+	+	+	+
Monitoreo	+	+	+	+
Control	+	+	+	+
Costo	-	-	-	+
Total	3	3	3	4

**Integración Servicio IOT.** Al seleccionar el servicio para monitoreo y control de los robots en la nube se establece la estructura de la Figura 56, en la cual se tiene una comunicación entre el bróker y la herramienta node-red a partir del uso de snappy-ros; mientras que para la comunicación entre node-red y la nube se aplica el sistema autogestionado de Watson lot para envió y recepción de datos a partir de la creación de diferentes dispositivos.

**Figura 56**

*Integración en la Comunicación entre Bróker Central y la Nube*



### Subsistema de Localización Global



La localización global a implementar en la plataforma multirobot debe contar con los siguientes criterios:

- Localización en tiempo real de todo robot participante (Tiempo de procesamiento).
- Ser utilizable al cambiar el número de robot participantes y/o tamaño de entorno (Escalabilidad)
- Rango de error menor o igual al 5% en estimación de posición (Precisión)
- Obtener el mismo resultado bajo las mismas condiciones (Repetibilidad)
- Uso de elementos accesibles en el mercado con facilidad (Disponibilidad).
- Bajo costo de inversión
- Uso de recursos computacionales convencionales (Rendimiento).

Siguiendo los parámetros previamente mencionados y como se ha descrito en la sección anterior existen varios métodos de localización para un robot móvil, por lo cual cada uno ha sido analizado a profundidad resumiéndolos en la siguiente tabla:

**Tabla 35**

*Opciones para sistema de localización global*

Variable	Sistema de localización	Descripción	Ilustración
A	GPS	Sistema satelital global que utiliza señales de radio para determinar posición y velocidad con cobertura global.	
B	Visión Artificial	Captura y procesamiento de imágenes para estimación de localización según parámetros presentantes en estas.	

**Análisis y decisión.** Se ha realizado la comparación de las opciones de sistemas de localización global mediante la comprensión del estado del arte descrito y referenciado en la sección anterior, y los criterios mencionados al inicio de esta sección dando un peso significativo a la escalabilidad, costo y disponibilidad por ser quienes garantizan el alcance del presente proyecto. Todo el análisis se resume en la Tabla 36.

**Tabla 36**

*Comparación y decisión de Sistema de localización global*

Criterios	Peso %	A		B	
		Ca	Ep	Ca	Ep
Tiempo de procesamiento	10	2	0,2	4,5	0,45
Escalabilidad	20	3	0,6	5	1
Precisión	10	3	0,3	4	0,4
Repetibilidad	10	4	0,4	4	0,4
Disponibilidad	20	4	0,8	5	1
Costo	20	3	0,6	4	0,8
Rendimiento	10	4,5	0,45	3	0,3
Total	100		3,35		4,35

Como resultados del análisis se ha optado por el uso de visión artificial, cuya mayor fortaleza se encuentra en el procesamiento en tiempo real del entorno por medio de la captura de video. Sin embargo, su mayor debilidad es el rendimiento puesto que el procesamiento de imágenes dependiendo de varios parámetros necesita mayores recursos computacionales que otros sistemas de localización. La visión artificial aplicada en la localización consta de varios métodos, los cuales se estudian a continuación para establecer un correcto y funcional sistema de localización.

### ***Análisis y decisión del sistema de localización global por visión artificial***

Al usar visión artificial, para la localización global de la plataforma móvil, lo primordial a considerar es la iluminación, posición y número de cámaras de video que se implementarán para pensar el entorno donde los robots se desenvolverán.

**Posición de cámara y corrección de imagen.** La posición de la cámara genera diferentes tipos de planos de visualización y en forma general podremos encontrar un sin número de clasificación dependiendo de la aplicación. (Formacionaudiovisual, 2020), micrositio de aprendizaje de fotografía y video, resume con facilidad la variedad de planos de imagen dependiendo de la posición de la cámara desde un punto artístico y técnico cuyos principales se observan en la Figura 57. Para la estimación de posición de la plataforma móvil solo se analizará el plano picado y el plano cenital, ya que son los únicos con los cuales se logra captar correctamente el entorno.

Al estudiar el desempeño del plano picado y cenital mediante su utilización en (Reyes, 2019; Roos Hoefgeest Toribio et al., 2020) para estimación de posición de objetos en movimiento y se ha obtenido como preferencia el uso de una cámara en plano cenital. La conclusión llegada a tomar se da debido a la necesidad de una corrección de perspectiva si la imagen ha sido tomada en plano picado o inclinado.



Figura 57

Posición de cámara y formación de planos de visualización



Nota. Obtenido de (Berzgal, 2020) micrositio de aprendizaje de fotografía y video

Si bien, con un plano cenital no se debe corregir la perspectiva, la cámara debe ser calibrada en cualquier plano a utilizarse. La calibración debe ser implementada debido a la distorsión radial de la cámara (denominada “ojo de pez”). Por facilidad y funcionalidad se plantea la utilización de calibración por tablero de ajedrez (Cabrera et al., 2014) mediante la librería (OpenCV.org, 2014) con la cual se obtiene los parámetros de la cámara necesarios para el algoritmo de estimación de pose que se describirá más adelante:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad coef_{dis} = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] \quad (29)$$

**Dispositivos y configuración de entorno.** Al tener una posición de la cámara establecida se debe considerar el número de las mismas y el tipo de ambiente del entorno (Iluminación). El


número de cámaras dependerá del área del entorno a observar y alcance de visualización de los dispositivos. Al considerar el alcance del espacio de 3x2 m se ha optado por usar una cámara colocada a 2,80 m de altura que corresponde a la dimensión promedio del techo de una habitación siguiendo recomendaciones de (Pessacg & Fischer, 2017), donde explora la utilización de varias cámaras en diferentes posiciones.

En cuanto al ambiente del entorno o iluminación se establece el uso de luz frontal para provocar una iluminación con la menor cantidad de sombra y brillo, tomando como referencia (marketingbcnvision, 2017).

**Elección de cámara y accesorios.** Usar visión artificial sígnica implementar una cámara de video y la elección de la misma garantiza el correcto desempeño de cualquier aplicación. Dentro del mercado existen una gran variedad de modelos y marcas de cámaras de videos, así como, una extensa clasificación de las mismas. Para la elección adecuada del equipo de visión, propondremos una clasificación general: Cámara dedicada, Cámara USB, Cámara IP y Cámara DVR, las cuales resumimos en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Clasificación propuesta para cámaras de video en visión artificial*

Variable	Tipo de Cámara	Descripción	Ilustración
A	Dedicada	Cámaras de video destinadas a visión artificial. Cuentan con hardware y software exclusivo.(ACE, 2020; AISVISION, 2020)	




Variable	Tipo de Cámara	Descripción	Ilustración
B	USB	Cámaras con conexión USB al ordenador. Generalmente son denominadas cámaras web. (LOGITECH, 2020)	
C	IP	Cámaras de video con conexión ethernet de alta calidad. Cámaras fijas con necesidad de equipo de red con protocolo IP para su funcionamiento. (BASLER, 2020)	
D	DVR	Cámaras de uso general con conexión coaxial y protocolo TVI. Necesita de un sistema de administración de video DVR o tarjeta de video para su uso en el ordenador. (HIKVISION, 2020)	

Tabla 38



Decisión de cámara de video

Criterios	Peso %	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Calidad de imagen	20	5	1	2	0,4	4	0,8	4	0,8
Disponibilidad	10	2	0,2	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Escalabilidad	25	3	0,75	3	0,75	5	1,25	5	0,75
Funcionalidad	20	5	1	3	0,6	4	0,8	4	0,8
Costo	25	2	0,5	5	1,25	3	0,75	4	1
Total	100	3,45		3,5		4,1		3,85	

Al analizar cada clasificación de cámaras de video presentadas en la anterior tabla, se procede a elegir mediante la Tabla 38, tomando los siguientes parámetros de control: Calidad de recepción de imagen, disponibilidad en el mercado, escalabilidad, funcionalidad para visión artificial y costo. El mayor peso se dará a escalabilidad y costo siguiendo los objetos planteados para el presente proyecto. Mediante la Tabla 38 se ha elegido una cámara con DVR, la cual se describe en la siguiente tabla, junto con su DVR para conexión con el ordenador.

Tabla 39

*Especificaciones de equipo de video*

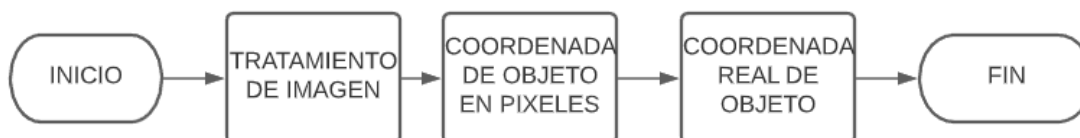
<b>DS-2CE16C0T-IRPFHD720pIR Bullet Camera</b>	
<p>1 megapixel alto rendimiento CMOS, Salida analogica HD, resolution sober 720 px, Conmutado dia/noche, DNR, Smart IR, distancia IR 20 [m], Elección TVI/AHD/CVI/CVBS, IP66. (SELNET, 2020)</p>	
<p>USB 2.0. Soporta formato de video NTSC, PAL. Entrada de video: 1 compuesto RCA, 1 S-Video. Entrada de Audio: Stereo audio (RCA). Dimensiones: (L)88mm x (W)30mm x (H)15mm. Alimentacion USB. Soporta de video en alta resolución NTSC: 720 x 480 @ 30fps PAL:720 x 576@ 25fps.(Banggood.com, 2020)</p>	

### ***Proceso para localización global***

La obtención de posición de cualquier objeto dentro del entorno que cubre la captura de la cámara de video es descrita en forma general en la Figura 58.

Figura 58

*Proceso de obtención de coordenada real de objeto dentro de entorno censado por cámara cenital*



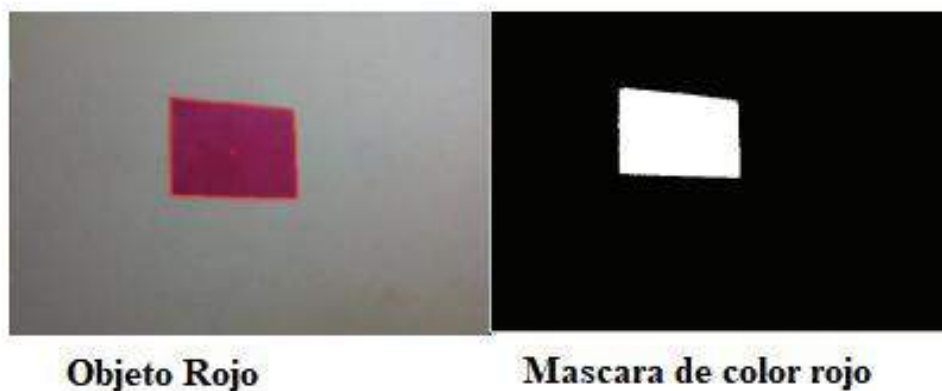
**Tratamiento de imagen.** Antes de obtener la posición de un objeto a partir de una imagen, esta debe ser tratada de modo que discriminemos objetos o información no referente a

lo deseado. El tratamiento se lleva a cabo mediante la obtención de una máscara por medio de la detección de color de imagen con modelo HSV cuyo resultado es una imagen binaria llamada máscara.(Barba Guamán et al., 2017)

La Figura 59 indica el proceso de máscara por medio del uso de OpenCV para obtener una máscara del color rojo. Por lo mencionado anteriormente, para el presente proyecto se debe usar marcadores de color para obstáculos, robots y objetos a clasificar. Estos datos se encuentran especificados en Anexos.

**Figura 59**

*Obtención de máscara binaria de objeto rojo por medio de librerías de OpenCV*



Nota. Tomado de Detection of moving objects through color thresholding, Barba, 207.

**Obtención de coordenada de objeto en pixeles.** Para la obtención de la coordenada de un objeto dentro de la imagen donde fue capturado y luego de proceder su tratamiento es mediante el uso de obtención del centroide del contorno del objeto dado por la fórmula (30):

$$C_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; C_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (30)$$

(30) considera un conjunto de puntos que forman el contorno del objeto, por lo cual antes de su aplicación se calcula el mismo de la máscara obtenida mediante el algoritmo de detección de contornos proporcionado por (OpenCV, 2016; OpenCV.org, 2017) y ayudado del algoritmo de contornos canny para obtener el gradiente de intensidad de la imagen expresado por (31) y luego obtener el borde de un objeto mediante discretización limitada por un umbral. La explicación e implementación detallada del algoritmo Canny se lo encuentra en (Rebaza, 2011).

$$\begin{aligned} \text{Gradiente\_borde}(G) &= \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \text{Angulo}(\theta) &= \tan^{-1} \left( \frac{G_y}{G_x} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

Implementada (31) y la función findContours() de OpenCV se obtiene las coordenadas (x,y) del contorno del objeto y al usar (30) se obtiene su centro (Cx,Cy). Sin embargo, se debe tener en consideración que se pueden detectar varios objetos con los mismos parámetros de color o en su defecto ruido que es tomado como pequeños objetos, por lo cual, se realiza un filtro. El filtro a tomar en este trabajo es el área. Mediante la medida del área de los diferentes contornos, nos limitamos solo al que esté dentro de un rango (Detallados en Apéndice E) y luego se implementa (30). Para la obtención del área nos ayudamos de la función contourArea() de (OpenCV.org, 2017).

**Coordenada real de objeto.** Tener la coordenada en el plano de la imagen (coordenada en pixeles) del objeto a localizar no significa tener un punto de posición real, pues esta cambiará dependiendo de la localización de la cámara. Para lograr obtener la posición real del objeto referente a un punto de origen conocido se procede a implementar una reconstrucción del espacio 3D a partir del modelamiento de una cámara estenopeica detallada en (Quintana & Javier, 2019) y descrita como:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

De (32) se despeja X, Y, Z para obtener:

$$M = R^{-1}(A^{-1}sm - t) \quad (33)$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \text{ y } m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

La matriz A es propia de la cámara como se ha mencionado anteriormente, sin embargo, (R|t) son variables dependientes de cada entorno, por lo cual deben ser calculadas una vez montado el sistema. Para el cálculo de estas variables se opta por el algoritmo solvePnp y Rodrigues implementados en (Janković, s. f.; Lee et al., 2018) al utilizar la matriz y vector de (33) y 4 puntos conocidos sus coordenadas en pixeles y real. Para la estimación de la constante S, se debe optar por calcularla con puntos conocidos de Z para cada plano, sin embargo, como la

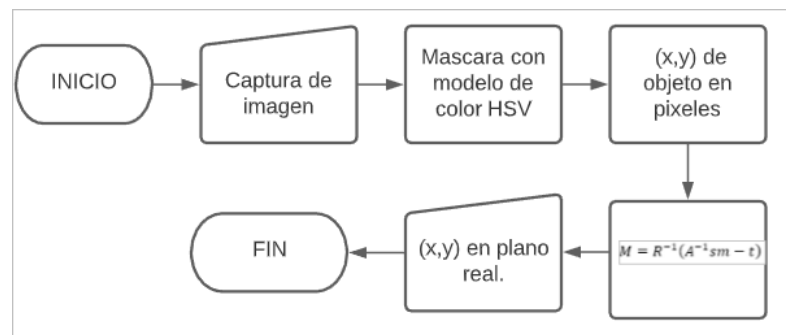
localización solo es requerida en el plano XY y los objetos se pueden considerar a la misma altura se opta por tener  $Z=0$  y por lo tanto se puede despejar  $S$  para todo el sistema y expresándolo en (34).

$$s = \frac{(R^{-1}t)_{31}}{(R^{-1}A^{-1}m)_{31}} \quad (34)$$

**Algoritmo de localización global.** La localización global sigue un camino secuencial, donde interfiere la calibración de la cámara, tratamiento de la imagen y aplicación matemática para obtener la posición de un objeto como se esquematiza en la Figura 60.

**Figura 60**

*Algoritmo de localización global*



### Subsistema de Planificación de Trayectoria

Al ser el objetivo final del sistema un proceso de clasificación de objetos dentro de un entorno controlado con obstáculos es necesario tomar en cuenta que debe existir una ruta que deberá ser generada por el bróker central para cada uno de los robots móviles, con el fin de alcanzar la meta tanto al recoger el objeto como al dejarlo en la zona de depósitos como se explicó



en la sección anterior. Con el fin de establecer que método de planificación de trayectoria deberá ser aplicado, se toma en cuenta ciertas premisas:

- El entorno será controlado con obstáculos fijos evitando de esta forma la existencia de movilidad dentro del entorno.
- El mapa será generado de forma global a partir del uso de la cámara en plano cenital como se explicó en la sección anterior.
- Los puntos de inicio, meta y obstáculos serán entregados por el bróker a cada uno de los robots obtenidos previamente por la cámara como se pudo explicar en la sección de localización global y con las premisas antes mencionadas se puede generar un detalle de lo que se tiene dentro del proceso de planificación que se encuentra en la tabla 36

**Tabla 40**

*Características del Planificador de Trayectoria*

<b>Criterios de Planificador</b>	
Planificación de Camino Global	Área de Trabajo Conocida
Basado en un Mapa	Genera una ruta factible antes de llegar a la meta
Navegación basada en Métodos Clásicos	Llevado a cabo fuera de línea
Respuesta relativamente lenta	

### ***Selección de Método de Planificación de Ruta***

Teniendo en cuenta las premisas de la Tabla 40 se da a conocer la necesidad de un método clásico que permita llevar a cabo la planificación de ruta y las características de los mismos son detallados en la Tabla 41.

Tabla 41

Métodos de Planificación de Trayectoria

Variable	Método	Características
A	Bread First Search	No usa ningún parámetro de distancia entre el robot y el punto de llegada Funciona bajo el método de ramificación entre la celda inicial y la vecina Puede realizar una exploración incluyendo movimiento diagonal o sin el variando la optimización de la ruta Requiere un costo computacional medio a
B	Dijkstra	Usa un método de grilla para hallar el camino más corto hasta el objetivo Su principal característica es que el siguiente vértice elegido es el más cercano del punto actual. Consumo en velocidad de cálculo alto Presenta una excelente precisión para hallar la ruta.
C	A*	Es un método basado en el funcionamiento de BFS y de Dijkstra Permite hallar el camino óptimo al objetivo Toma como base una función en la cual se considera los costos entre cada punto de búsqueda y el inicio del camino y el punto de búsqueda actual con el objetivo a
D	Campos Potenciales	Funciona bajo la premisa que existen 2 tipos de fuerzas generadas, la atractiva que se genera por el objetivo y la repulsiva generada por los obstáculos. Se establece una fuerza resultante con la cual se determina la dirección que debe seguir el robot Presenta simplicidad y eficiencia en su proceso de búsqueda Requiere un bajo costo computacional b

Nota. a) (LaValle, 2006) b) (Elia nadira et al., 2016)

Para la selección del método que presente una correcta funcionalidad del proceso se lleva a cabo una matriz de selección la cual se detalla en Tabla 42, en el cual se toma como base la capacidad del algoritmo de generar la ruta, el costo computacional que generará y finalmente que tan optimizado estará el camino.

Tabla 42

*Matriz de Selección del Método de Planificación de Trayectoria*

Criterios	Peso %	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Generación de Ruta	40	5,0	2,0	5,0	2,0	5,0	2,0	4,0	1,6
Menor Costo Computacional	40	3,0	1,2	3,0	1,2	3,0	1,2	5,0	2,0
Optimización	20	3,0	0,6	4,0	0,8	5,0	1,0	3,0	0,6
Total			3,8		4,0		4,2		4,2

**Análisis y decisión.** Dentro de la matriz de selección se observa que existen 2 opciones aplicables en el presente trabajo, el método de campos potenciales artificiales y A\*, que brindan ventajas diferentes en su funcionalidad dentro de la correlación de eficiencia vs costo computacional, además, los hace superiores a BFS y el de Dijkstra que no se manejan con heurísticas. El método de A\* ofrece la ventaja al encontrar una ruta para llegar a la meta siempre que exista, sin embargo, el costo computacional que genera es alto ya que se da un barrido entre todas las opciones. Mientras que el método de campos potenciales en aplicaciones complejas puede no hallar la ruta sin embargo para usos simples es óptimo en base a su bajo costo computacional.

### ***Integración de Subsistema de Planificación de Trayectoria***

El método seleccionado para la presente aplicación es el algoritmo de campos potenciales debido a su eficiencia en aplicaciones simples, su bajo costo computacional, y su simplicidad. El funcionamiento del algoritmo de generación de ruta se basa en que el obstáculo impondrá una fuerza repulsiva sobre un objeto, mientras que la ubicación del objetivo obtendrá una fuerza atractiva para él. Las fuerzas resultantes de los campos en el robot se utilizan para determinar la

dirección de la dirección, la sumatoria de fuerzas es la que se expresa en (35) (Elia nadira et al., 2016).

$$U(q) = U_{att}(q) - U_{rep}(q) \quad (35)$$

El campo atractivo es generado para arrastrar al robot hacia la meta de acuerdo a (36).

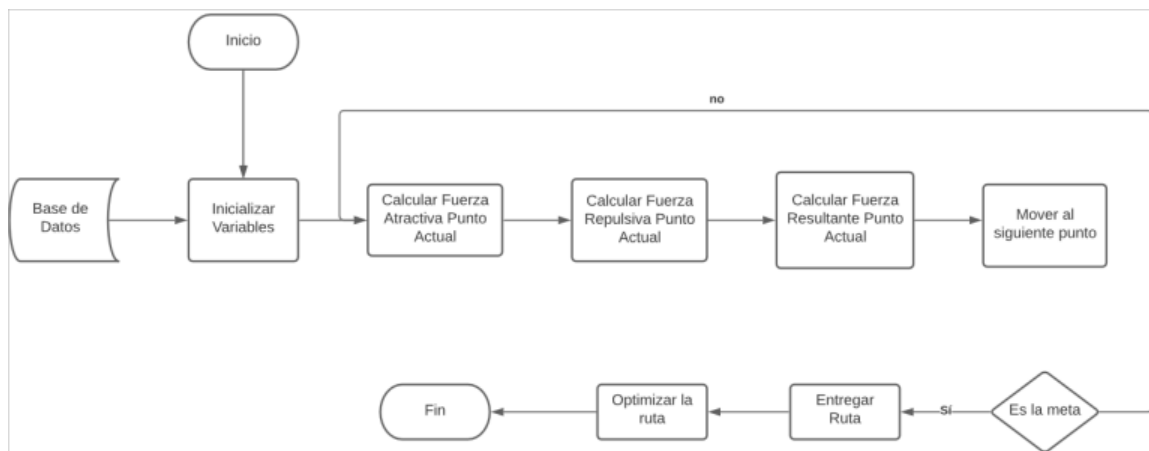
$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot (q - q_d)^2 \quad (36)$$

En la función potencial, el robot debe ser repelido lejos de obstáculos, pero si el robot está lejos de los mismos, su movimiento no debe verse afectado (elia nadira et al., 2016). La función del potencial de repulsión se muestra en (37).

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot k_b \left( \frac{1}{d(q)} - \frac{1}{d_0} \right), & d(q) \leq d_0 \\ 0, & d(q) \geq d_0 \end{cases} \quad (37)$$

Figura 61

Implementación de Algoritmo de Campos Potenciales



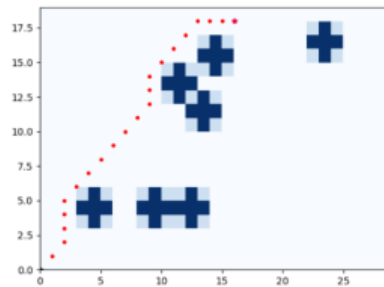
La Figura 61 describe el proceso de implementación del algoritmo de planificación de ruta en el cual se aplica la matemática descrita en secciones previas. En el diagrama de flujo se observa que se genera un barrido en cada uno de los puntos del espacio de trabajo para establecer una ruta segura y óptima.

### Validación

Es necesario aplicar un sistema de simulación del algoritmo en el cual se puede verificar su funcionamiento. En la Figura 62 se observa la aplicación del método en el cual parte de un punto inicial hasta una meta que al final es alcanzada dando como salida un conjunto de puntos que serán utilizados como ruta, además el entorno cuenta con 7 obstáculos que evitan que el robot pueda llegar al objetivo con una línea recta.

**Figura 62**

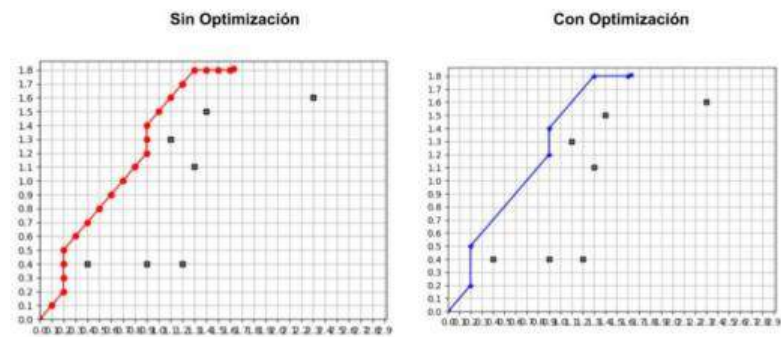
*Simulación del Método de Campos Potenciales*



Por otro lado, en la Figura 63 se observa que posterior a obtener la trayectoria se genera una optimización de puntos que se envían al robot, generando de esta forma un menor procesamiento. Al realizar un análisis comparativo de la salida del algoritmo sin la optimización y con el formato de salida optimo que es enviado al robot se tiene una clara diferencia al compararlos ya que en el primer resultado son generados 21 puntos y al ser optimizado únicamente son 7. Esto reduce el análisis computacional de sistema y principalmente en la aplicación real de los robots al no sobrecargar puntos de destino.

Figura 63

*Comparación de Algoritmo de Planificación de Trayectoria con Optimización*



### Integración global

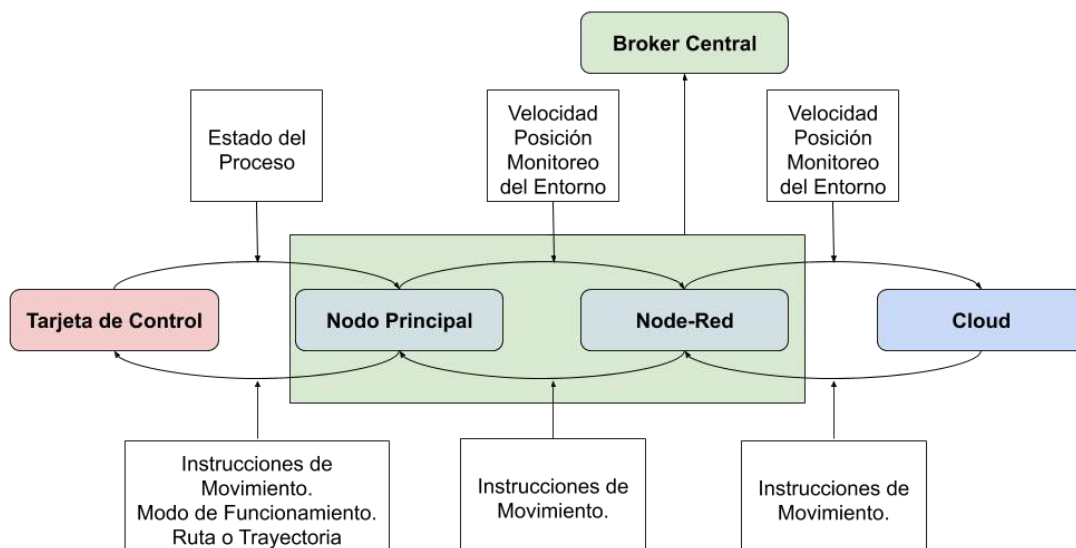
Analizar cada subsistema por separado y sus diferentes interrelaciones permite comprender el objetivo de su implementación y trabajo a realizar dentro del robot móvil y la plataforma móvil completa. Sin embargo, comprender su interrelación y funcionamiento independiente no describe el funcionamiento completo de la plataforma móvil, motivo por el cual se presenta los algoritmos de funcionamiento principales del sistema completo desde el global al específico, así como sus algoritmos secundarios detallados en el Apéndice E.

### **Algoritmo de funcionamiento global**

Todos los elementos interactúan enviando y recibiendo información entre sí. La Figura 64 y 67 muestra el esquema de comunicación entre nodos de cada tarjeta de desarrollo con el bróker y la nube. La relación de comunicación es homóloga a la estructura implementada de nodos con ROS y columna vertebral de todo el sistema. Cada subsistema funciona dependiente del otro, sin embargo, cada uno puede funcionar y ser probado independientemente como forma rápida y efectiva de detección y solución de errores.

Figura 64

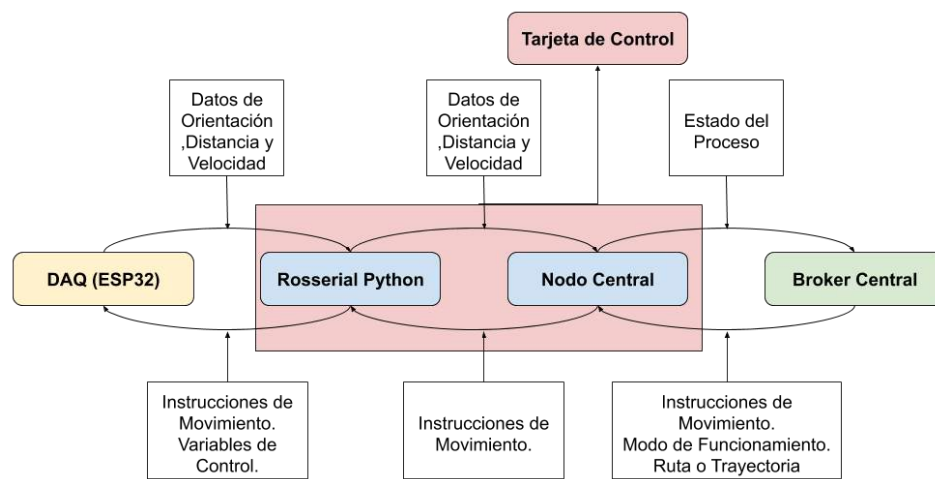
Configuración de comunicación y control en nodos entre control, bróker central y nube.



Nota. Tarjeta de control representa a la ESP32 y Raspberry de cada robot. Para ampliar el número de robots móviles solo se aumentan los nodos de tarjeta de control.

Figura 65

Configuración de comunicación y control del nodo de cada robot



Nota. El esquema es referente a la comunicación entre nodos de cada robot móvil para su funcionamiento.

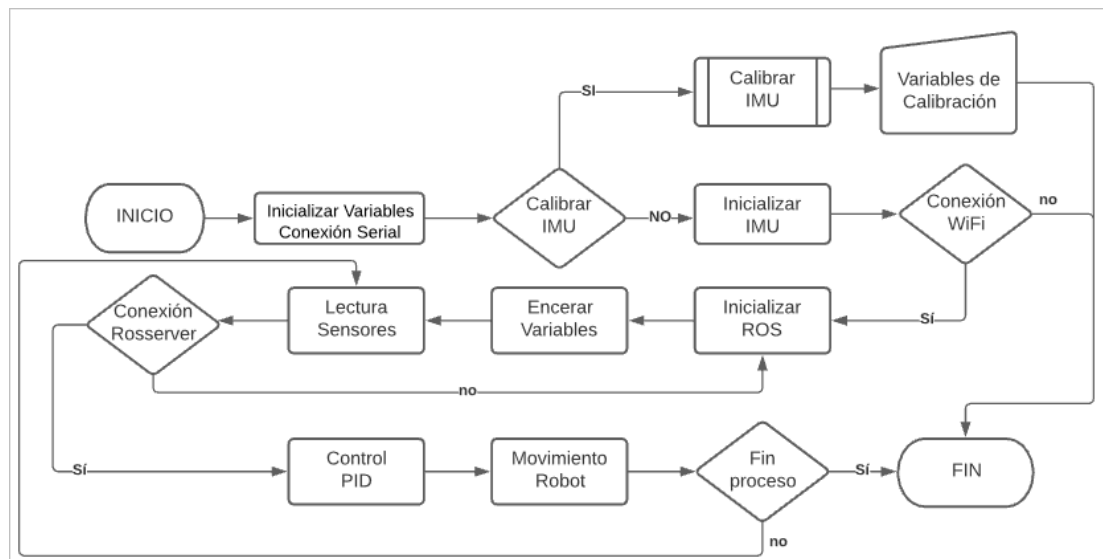


### Algoritmo de control de actuadores

La tarjeta de desarrollo ESP32 se encarga a nivel inferior del control, siendo esta la tarjeta de adquisición de datos para los sensores en uso y accionador de motores, incluyendo su control y supervisión. La Figura 66 presenta el proceso de acción de la tarjeta.

**Figura 66**

*Algoritmo de funcionamiento de la tarjeta ESP32 en el control de actuadores y adquisición de datos*



Nota. El proceso de calibración IMU es implementado mediante el método de iteración. El proceso de movimiento del robot es referente a cada movimiento omnidireccional posible dependiente del que elija la tarjeta de control Raspberry.

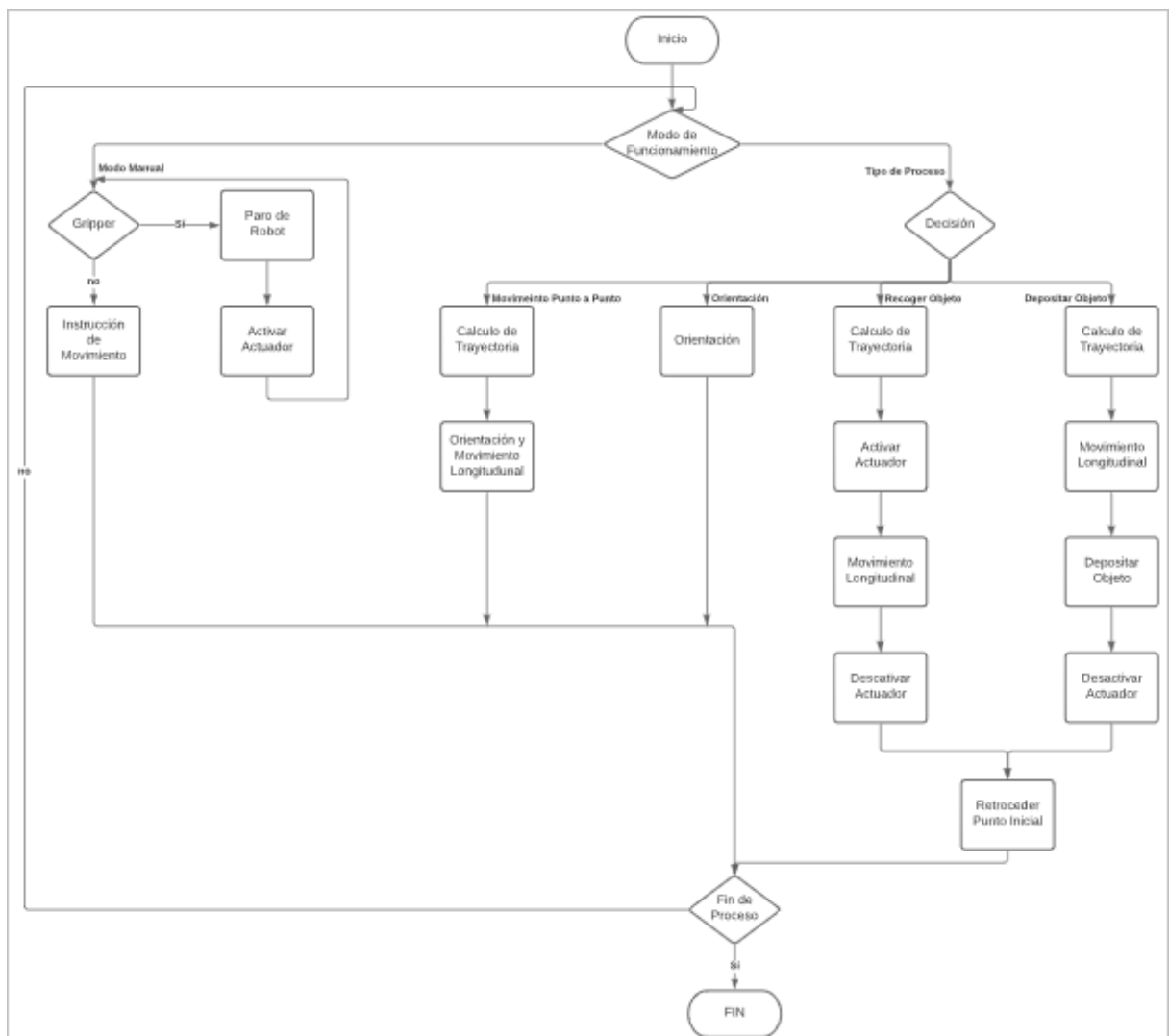
### Algoritmo de control individual

Cada robot que conforma el sistema posee un control implementado en la tarjeta raspberry pi3 B+, el cual mediante la implementación de ROS para la comunicación con la ESP32 se controla las diferentes funciones, esquematizadas en la Figura 67, del robot. Mediante la

creación de Nodos con ROS se puede controlar el robot desde la misma tarjeta o de otro ordenador conectado a la red.

**Figura 67**

*Algoritmo de control independiente del robot*



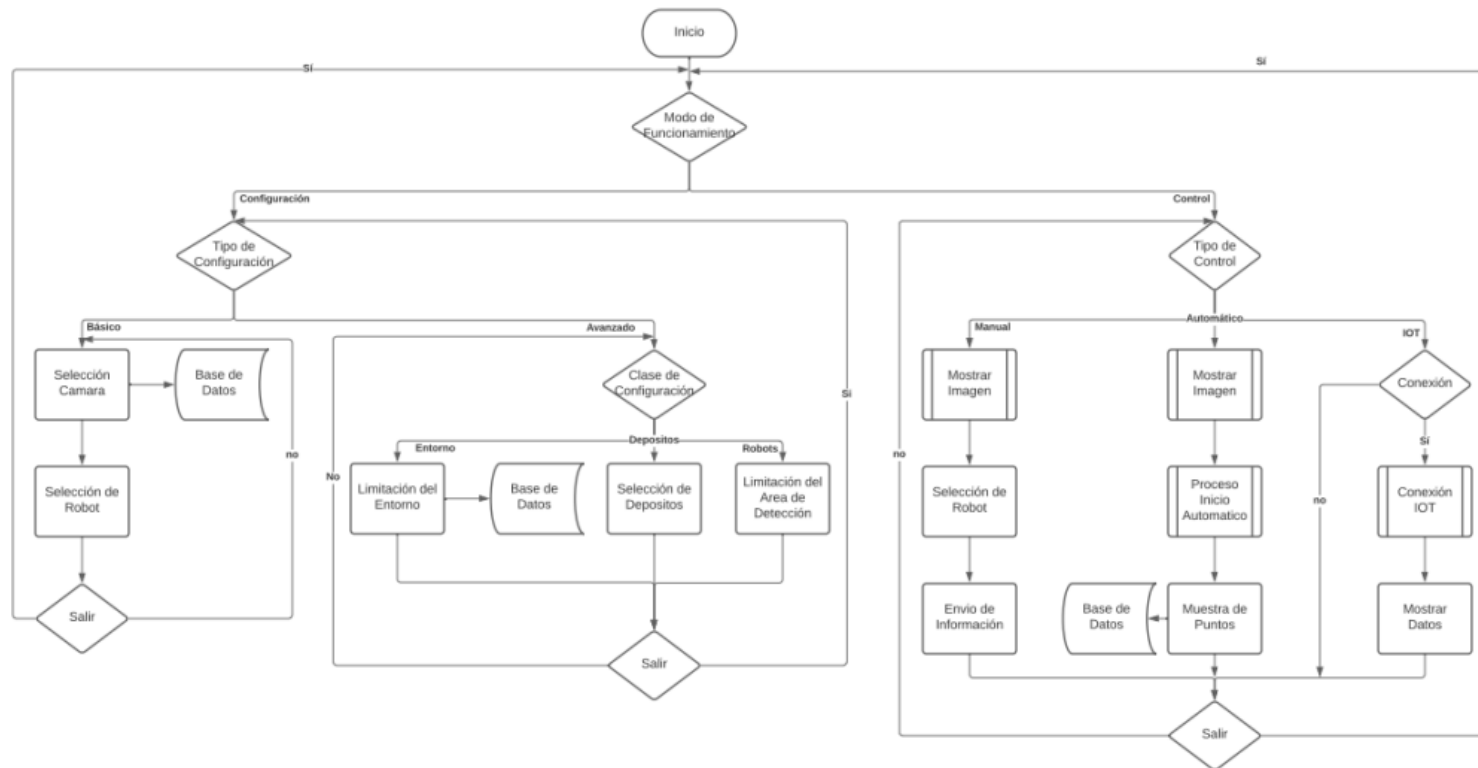
Nota. El algoritmo se programa mediante el uso de nodo para estructurar la programación y depurar adecuadamente.

Los procesos de movimiento son los detallados en secciones anteriores.

## Algoritmo de control central

Figura 68

Algoritmo de control del bróker para control y organización de los robots.



Nota. Los subprocesos de modo de control se detallan más adelante en el Apéndice.

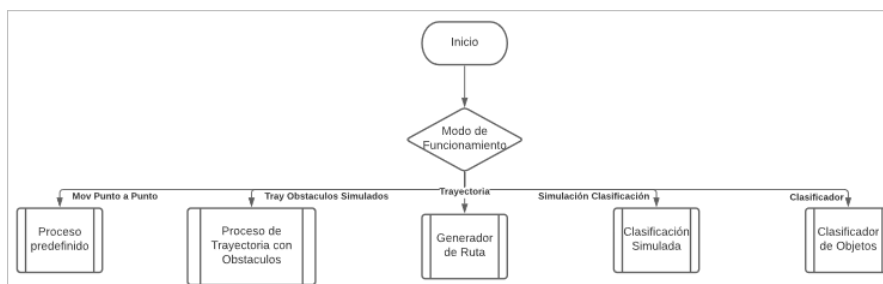
El control general y comunicación con la nube (internet de las cosas IoT) son organizados por el control central o bróker en un ordenador provisto de ROS mediante una la implementación de un HMI de fácil uso. El algoritmo es programado estructuralmente en nodos para cada función manual, automático e IoT. El HMI cuenta con modo de configuración donde se definen parámetros de cámara, límites de entorno, configuración para detección de la posición de robot y parámetros para cumplimiento de la aplicación de clasificación de objetos como posición de depósitos y elección de robots participantes.

**Modo manual.** En el Control manual se visualiza el entorno y localización del robot a manejar. Cada dirección y giro posible del sistema detallados anteriormente se lo puede realizar, al igual que la abertura y cierre del gripper. Cada comando a utilizar se establece como un botón gráfico para uso simple del HMI.

**Modo automático.** Al usar el modo automático se tiene 5 procesos a elegir; los 3 primeros permiten comprobar el movimiento punto a punto y generación de ruta del robot. Los 2 últimos se establecen para permitir realizar la aplicación de clasificación por múltiples robots.

**Figura 69**

*Algoritmo general del modo automático del sistema multirobot.*

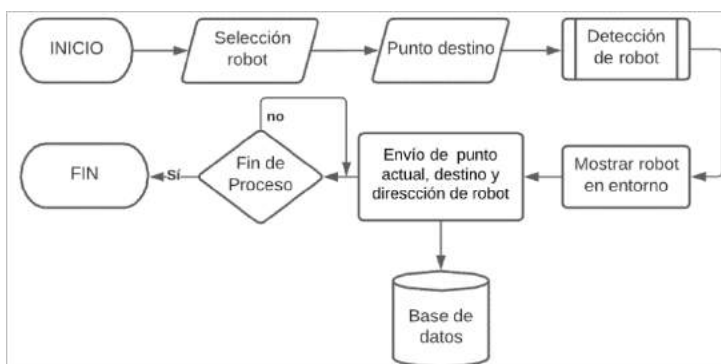


**Nota.** Los subprocesos del modo automático representan los tres movimientos autónomos de los robots y su aplicación.

**Movimiento punto a punto.** En este modo se selecciona un robot y se establece un punto de destino generando tres puntos (posición robot, dirección, destino) destinados al control individual para su movilización. Los puntos son enviados a una base de datos para su reconocimiento por el control individual del robot seleccionado. Al finalizar el proceso se pueden guardar los datos para su análisis.

**Figura 70**

*Proceso de movimiento de robot de punto a punto*

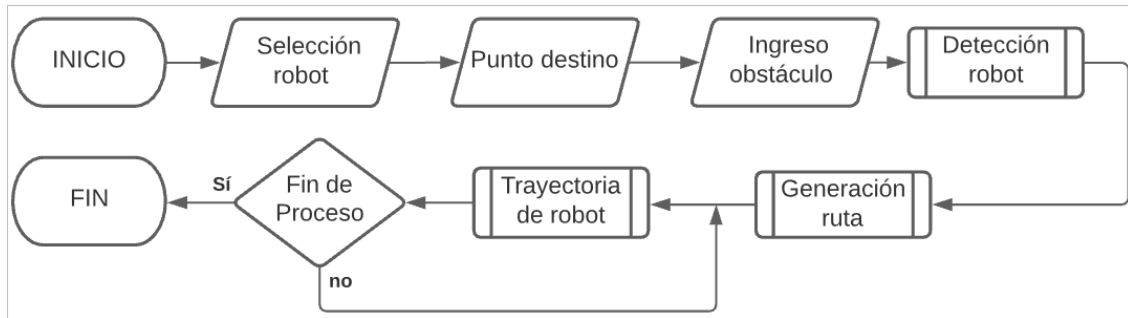


Nota. Subproceso de detección de robot especificado en anexo.

**Trayectoria con obstáculos simulados.** Se escoge el robot, se establece un punto destino y se colocan objetos simulados para generar una ruta que llegue al destino deseado. Como se plantea en la elección de generación de ruta, se implementa campos potenciales, sin embargo, también se puede seleccionar el método de A\* para situaciones de no solución del anterior método. Al finalizar el proceso se puede guardar los datos y observar gráficamente la trayectoria del robot teórico y práctico.

Figura 71

Proceso automático para trayectoria con obstáculos simulados

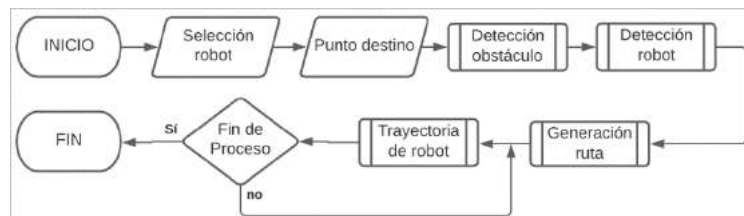


Nota. Subproceso detección de robot especificado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Generación de ruta detallado sección previa. Subproceso trayectoria se hace referencia en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

**Trayectoria con obstáculos reales.** El funcionamiento es similar al simulado con la diferencia que detecta obstáculos colocados en el entorno de desarrollo.

Figura 72

Proceso automático para trayectoria con obstáculos reales.



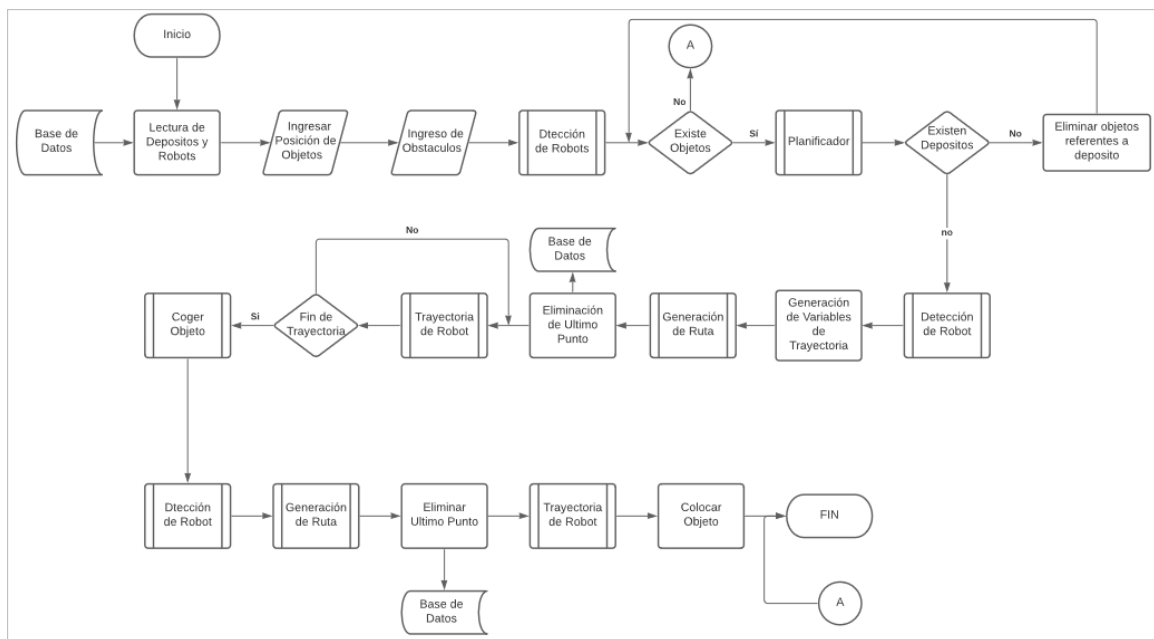
Nota. Subproceso de detección de obstáculo detallado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Subproceso detección de robot especificado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Generación de ruta detallado en sección previa. Subproceso trayectoria se hace referencia en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

**Aplicación de clasificación de objetos simulada.** La aplicación del sistema multirobot como se ha mencionado es la clasificación de objetos por colores. Se implementan 3 objetos (rojo, azul y celeste) que serán colocados en sus respectivos depósitos por los robots participantes en el entorno. Este modo descrito en la figura implementa una simulación de los objetos y obstáculos para la prueba de la aplicación.

**Figura 73**

*Proceso de clasificación de objetos con obstáculos y objetos simulados.*

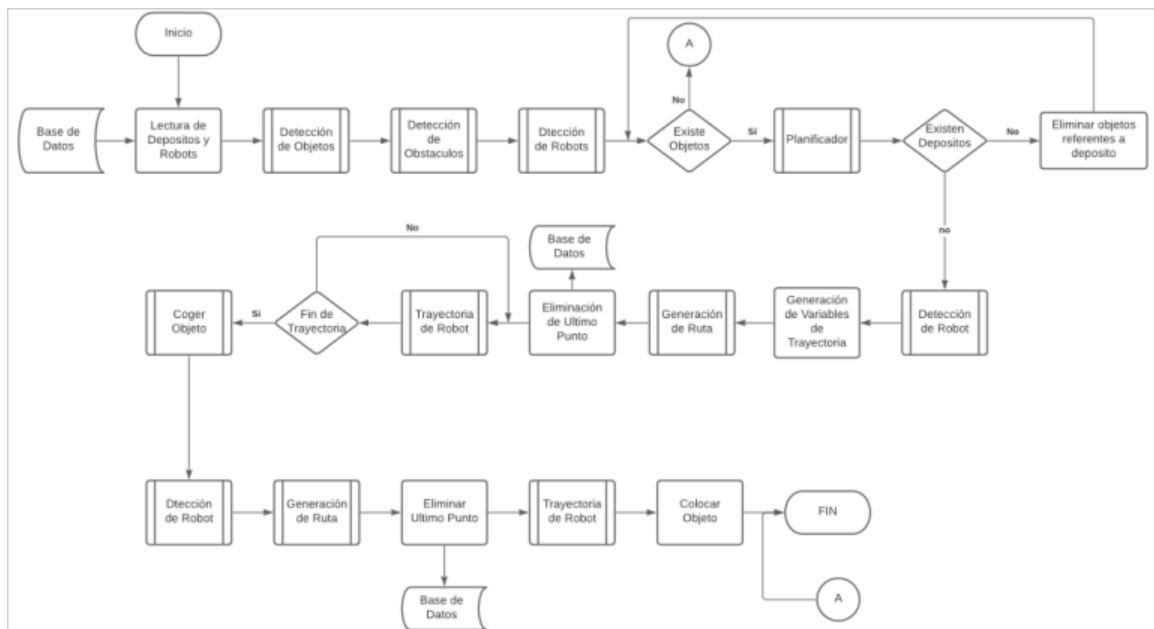


*Nota.* Detección de robots detallado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Planificador detallado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Detección de robot detallado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Generación de ruta detallado en sección previa. Trayectoria de robot detallado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Coger objeto hace referencia a opción de proceso del controlador detallado en Figura 68.

**Aplicación de clasificación de objetos reales.** Proceso similar al de utilizar simulación, pero con objetos reales y objetos implementados en el entorno.

**Figura 74**

*Algoritmo de clasificación de objetos.*



*Nota.* Detección de objetos detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Detección de obstáculos detallados en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Detección de robots detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Planificador detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Detección de robot detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Generación de ruta detallado en la sección previa. Trayectoria de robot detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Coger objeto hace referencia a opción de proceso del controlador detallado en Figura 68.

### 3.1.1. Modo IoT



En el modo IoT se establece conexión mediante Node-Red para su control manual y visualización de entorno en cualquier parte del globo como se explica en la sección de comunicación del sistema0.

## Capítulo IV

### Implementación y Resultados

El capítulo describe el proceso de fabricación de los prototipos en hardware y software y del entorno de pruebas utilizado, por otro lado, se muestran los resultados que validan el funcionamiento de cada uno de los subsistemas detallados en el capítulo III a partir de pruebas basadas en la literatura.

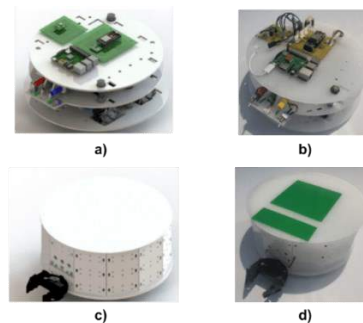
#### Construcción e Implementación

En secciones previas se ha establecido el diseño del sistema que necesitaran los robots móviles para su funcionamiento. Para implementarlo es necesario tomar en cuenta el hardware de los vehículos y el software para el control, los cuales se detallarán a continuación.

#### Hardware

Figura 75

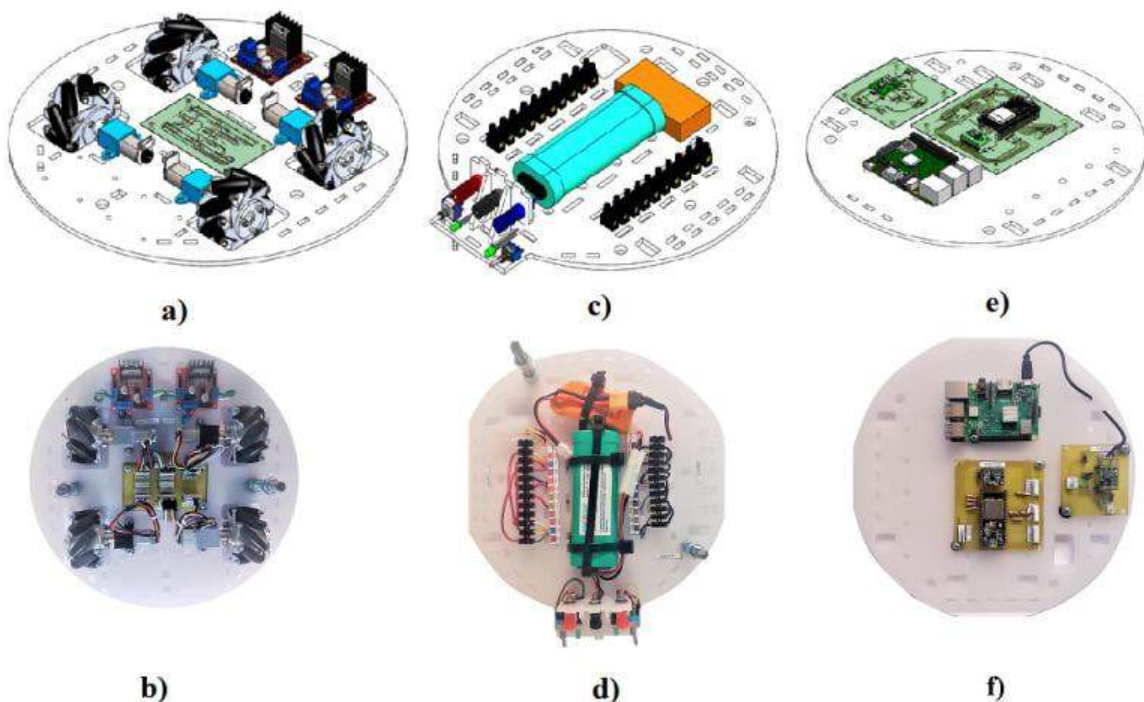
*Comparación de diseño y resultados de Robot Omnidireccional*



**Nota.** a) Diseño Estructura Interna, b) Implementación Estructura Interna, c) Diseño Estructura Interna, d) Implementación Estructura Externa

Figura 76

Comparación entre diseño y bases de prototipo construido.



**Nota.** a) Diseño de base inferior, b) Implementación de base inferior, c) Diseño de base intermedia, d) Implementación de base intermedia, e) Diseño de base superior, f) Implementación de base superior

Dentro del presente proyecto es necesario tomar en cuenta la fabricación de los robots móviles y el entorno dentro del cual se han llevado a cabo las pruebas. En la sección anterior se ha especificado que el sistema multirobot estará dotado de 3 vehículos con las mismas especificaciones técnicas. En la Figura 75 y Figura 76 se puede observar un análisis comparativo entre el diseño y la fabricación. Como se puede observar en la Figura 75 y Figura 76, los prototipos fabricados cumplen con los parámetros de la fase de diseño desde su estructura modular la cual se encuentra dotado de 3 pisos. Cada planta ha sido distribuida como se ha detallado en la sección

de diseño mecánico, en la Tabla 43. se muestra una breve descripción de las partes del robot que han sido fabricadas

**Tabla 43**

*Fabricación de los Prototipos*

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>Proceso de Fabricación</b>
Bases del Robot	Acrílico	Corte Laser
Soporte de Motor	ABS	Impresión 3D (FDM)
Placas PCB	Fibra de Vidrio	Grabado con Ácido
Cubierta	Acrílico	Corte Laser

En el Apéndice B se pueden encontrar los planos mecánicos para la réplica del prototipo. Posterior a la implementación de los robots se obtienen las siguientes características que se especifican en la Tabla 44

**Tabla 44**

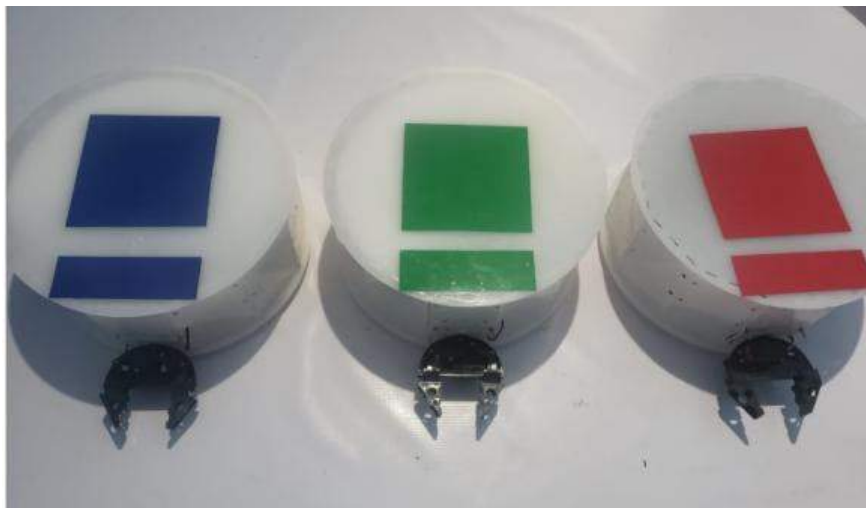
*Especificaciones Técnicas de los Prototipos*

<b>Especificaciones Técnicas</b>	
Diámetro del Robot	335 [mm]
Altura el Robot	163.98 [mm]
Peso	2.87 [kg]
Autonomía Energética	45 [min]

Con los detalles antes mencionados se han generado los 3 robots que conforman el sistema que del proyecto los cuales se pueden observar en la Figura 77

**Figura 77**

*Implementación de Prototipos para Sistema Multirobot*



Por otro lado, el entorno del sistema consta de 3 partes principales como se observar en la Figura 78. En primer lugar, el suelo en el cual se va a colocar los robots para su funcionamiento que facilita el proceso de detección, la cámara ubicada en la parte superior-central del entorno en forma fija para obtener un plano cenital permita cubrir toda área de trabajo. Los obstáculos que serán evitados por los robots y finalmente los objetos a clasificar

En la Tabla 45 se muestra un resumen de las partes del entorno en la cual se ha incluido parámetros importantes para el proceso de posterior de visión artificial como el color. Además, en la figura 79 se puede observar una imagen del entorno completamente montado en el cual se observan características como el bloque de luz solar con el fin de mantener un control para facilidad de la detección tanto de obstáculos, objetos y finalmente vehículos.

Tabla 45

*Entorno de Pruebas para Trabajo Colaborativo*

Elemento	Dimensión [mm]	Ubicación	Material	Color
Base	2920x1860	Parte Inferior	Lona Font	Blanca
Cámara	ABS	Superior-Central	Varios	Blanco
Obstáculos	10	Sobre la Base	Cartón Prensado	Café
Objetos	Acrílico	Sobre la Base	Cartón Recubierto	Azul-Rojo-Celeste

Figura 78

*Entorno Controlado para el Sistema Multirobot*



## Software

Figura 79

*Pantalla Principal Sistema Multirobot*



El sistema presenta una interfaz HMI la cual cuenta inicialmente con una pantalla de inicio que se observa en la Figura 79. Existen 3 subpantallas relacionadas la primera al funcionamiento,

la segunda configuración de los robots y el entorno y la tercera instrucciones sobre el uso de la interfaz.

**Figura 80**

*Interfaz HMI Pantalla de Configuración*



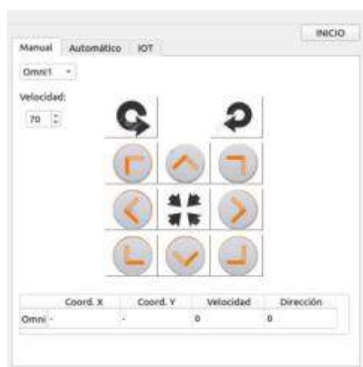
Dentro de la pestaña de configuración como se observa en la Figura 80 se tiene la posibilidad de escoger la cámara con la cual se desea establecer la visualización del proceso y los robots omnidireccionales que participaran en el funcionamiento del sistema, además permite tener una retroalimentación constante de los robots y la validación del correcto funcionamiento de la cámara.

Por otro lado, al iniciar el proceso de funcionamiento se genera la posibilidad de trabajar con 3 modos de funcionamiento como se muestra en la Figura 81. los cuales son el modo manual, automático y modo iot. En el modo manual el usuario tiene la capacidad de controlar al robot que seleccione y controlado la velocidad de movimiento, con la posibilidad de desempeñar 10

movimientos tanto de desplazamiento como giro. Además, se tiene parámetros de visualización como la posición en x-y dentro del entorno, velocidad y orientación.

**Figura 81**

*Interfaz HMI Modo de Funcionamiento Manual*



Dentro del modo automático de igual manera existe una subdivisión y se observa en la Figura 82. Las diferentes variaciones de los modos de funcionamiento se presentan en la Tabla 46.

**Tabla 46**

*Resumen Clasificación de Modos Automáticos de Funcionamiento*

Parámetro/Modo	Punto a Punto	Trayectoria Obstáculos Simulados	Trayectoria	Clasificador Simulado	Clasificador
Control de Robots	1	1	1	3	3
Obstáculos Simulados	No	Si	No	Si	No
Detección de Obstáculos	Si	No	Si	No	Si
Detección de Objetos	No	No	No	No	Si
Objetos Simulados	No	No	No	Si	No



Figura 82

Interfaz HMI Modo Automático de Funcionamiento

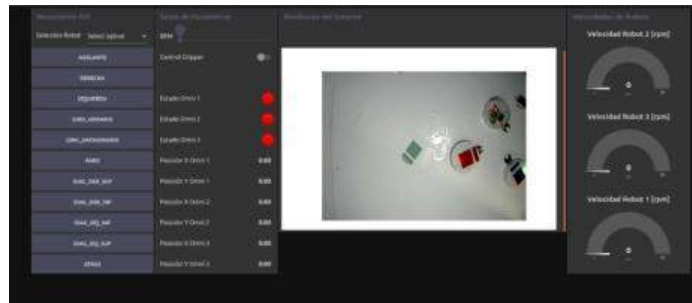


Finalmente se tiene acceso a un tercer modo de funcionamiento que permite el control remoto de los robots desde cualquier parte del mundo y tiene interfaz que se observa en la Figura 83

La interfaz permite cuenta de dos partes el control asociado a la selección, movimientos del robot, y a la visualización de parámetros como el estado (encendido/apagado), posición, velocidad y finalmente el monitoreo de los robots en el entorno.

Figura 83

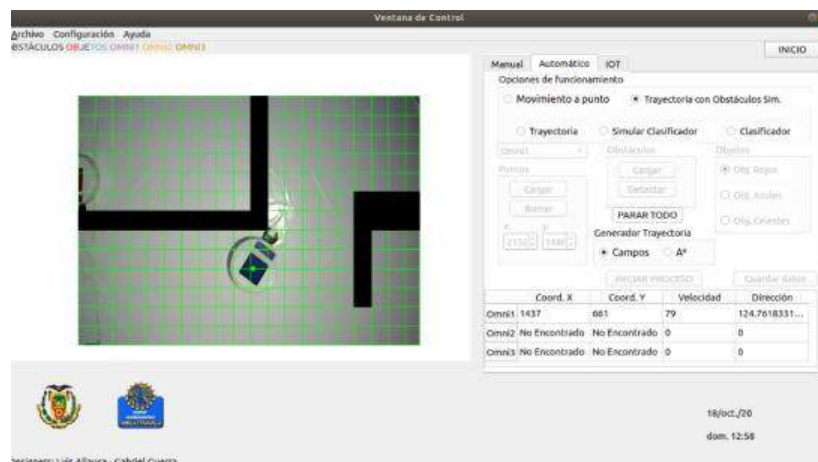
Interfaz HMI Modo de Funcionamiento IOT



En la Figura 84 se puede apreciar el funcionamiento del sistema de trayectoria con obstáculos simulados en el cual, se tiene un área de visualización con los obstáculos (color negro), el vehículo identificado (Omni1), el método de planificación de trayectoria seleccionado (campos potenciales) y finalmente las variables de monitoreo (posición, velocidad y orientación).

Figura 84

Funcionamiento del Modo de Trayectoria con Obstáculos Simulados



## Pruebas de Funcionamiento

Con el fin de validar sistema se ha llevado a cabo una serie de pruebas enfocadas al funcionamiento en diferentes áreas listadas a continuación.

- Odometría
- Corrección de Odometría con Visión Artificial
- Planificador de Trayectoria
- Trabajo Colaborativo

### *Odometría Trayectoria Vertical*

En base a la literatura, existe pruebas que permiten obtener especificaciones técnicas de los robots, para la presente se enfoca en el desplazamiento del robot en una trayectoria recta hacia el frente sin ningún tipo de variación angular. En la Tabla 47 se muestra el error existen al tener una variación de la meta que será de 60 a 100 [cm] respectivamente con un total de 3 réplicas para cada uno de los robots. Los valores mostrados en la tabla representan el promedio de las réplicas y están expresados en centímetros

**Tabla 47**

*Distancias en Trayectoria Recta a Diferentes Metas*

<b>Distancia Teórica/ Real</b>	<b>Robot 1</b>	<b>Robot 2</b>	<b>Robot 3</b>
60	59,66	59,91	60,13
65	63,67	63,27	63,56
70	68,5	68,67	68,67
75	72,67	73,46	73,04
80	77,33	77,11	77,95
85	82,33	81,21	82,66

<b>Distancia Teórica/ Real</b>	<b>Robot 1</b>	<b>Robot 2</b>	<b>Robot 3</b>
90	93,33	89,11	92,67
95	91,66	91,95	91,33
100	104,33	104,89	105,06

Por otro lado, en la Tabla 48 se lleva a cabo un análisis de los errores existentes en cada robot con el fin de establecer la variación que existe. Para lo cual se utilizará la métrica de la meta a 100 [cm] como base para obtener el mayor error existente.

**Tabla 48**

*Errores en Trayectoria Recta a Diferentes Metas*

<b>Error [%]/ Prototipo</b>	<b>Robot 1</b>	<b>Robot 2</b>	<b>Robot 3</b>
60	0,56	0,15	0,22
65	2,05	0,99	1,48
70	2,14	1,90	1,90
75	3,11	2,05	2,22
80	3,14	2,66	2,45
85	3,33	3,21	2,56
90	3,51	3,61	2,61
95	3,70	4,46	2,75
100	4,33	4,89	5,06

Un ejemplo de cálculo se puede apreciar en la ecuación ....tomando como base el robot 3 con la distancia de 100 [cm]

$$Error = \frac{|Valor_{Real} - Valor_{Medido}|}{Valor_{Real}} \cdot 100$$

$$Error = \frac{|100 - 105.06|}{100} \cdot 100\% = 5.06 \text{ [%]}$$

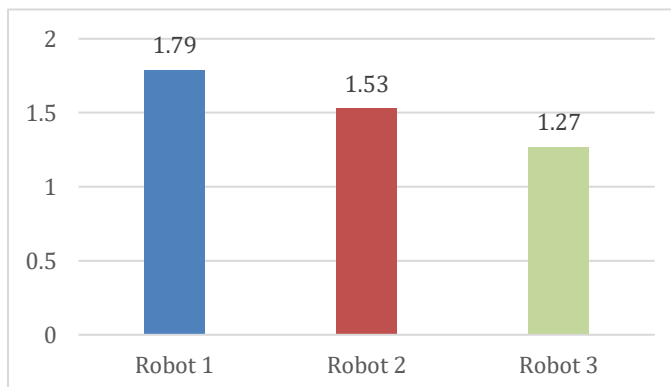
Como se puede observar en la Tabla 48 al llevarse a cabo el desplazamiento máximo de 100 [cm] se obtendrá un error porcentual máximo de 5,06 [%] el cual puede afectar al sistema en caso de que inicialmente se tenga este sistema de localización intrínseco sin embargo en secciones futuras se podrá apreciar la mejora al aplicar un método de validación de visión artificial.

### ***Odometría Trayectoria con Variación Angular***

En este segundo caso se genera una serie de pruebas en el cual se valida la orientación que tiene el robot en el entorno al trabajar con trayectorias que presenta una variación en ángulo como, se ha llevado un total de 12 pruebas con cada uno de los robots. Un resumen de los resultados se puede evidenciar en la Figura 85. Donde se tiene la variación angular en promedio de las pruebas realizadas. Se puede notar que la máxima variación existente es de 1.79° presentada por el robot 1.

**Figura 85**

*Variación en ángulo teórico vs practico*

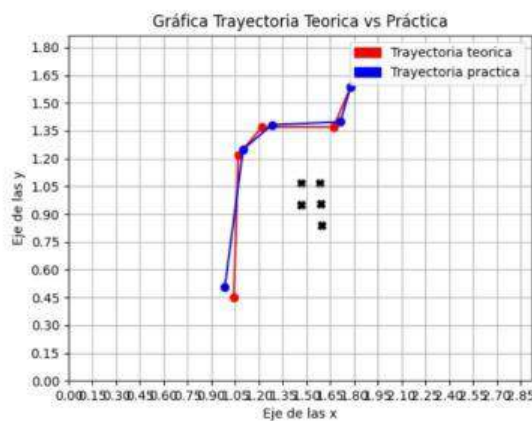


### ***Corrección de Odometría con Visión Artificial***

En secciones anteriores se ha explicado que el proceso cuenta con un sistema de visión artificial que funciona como un sistema de localización global y que permite mejorar la localización del robot al desempeñar sus labores. El presente proceso se ha aplicado a trayectorias que el robot debe seguir permitiendo una variación mínima para su óptimo funcionamiento como se muestra en la Figura 86

**Figura 86**

*Seguimiento de Trayectoria Generada Teórica vs Real*



Para validar el subsistema de localización global con visión artificial se ha llevado a cabo una serie de 9 pruebas para cada robot con el objetivo de analizar la variación existente en la posición final. En la Tabla 49 se pueden observar los valores de los errores existentes para cada robot en la trayectoria.

**Tabla 49***Errores generados en Seguimiento de Ruta con Localización Externa*

<b>Error/ Prototipo</b>	<b>Robot 1</b>	<b>Robot 2</b>	<b>Robot 3</b>
Absoluto X [cm]	1.2	4.31	3.13
Absoluto Y [cm]	2.5	3.25	3.6
Relativo X [%]	1.38	4.49	2.75
Relativo Y [%]	4.21	6.38	5.54
Total [%]	2.8	5.43	4.14

Se puede observar que se tiene error entre el 2.8 y 5.43 % generadas en trayectorias promedio a los 2.7 [m], al establecer un análisis comparativo con el resultado que se hubiera obtenido al generar un proceso de seguimiento de ruta netamente con la odometría intrínseca del robot se obtiene los resultados que se muestra en la Tabla 50 y se aprecia que existe una mejora de 238.5% entre el sistema de odometría intrínseca con el de visión artificial.

**Tabla 50***Análisis Comparativo Localización Local vs Global*

	<b>Localización Local [%]</b>	<b>Localización Global [%]</b>
Robot 1	9.22	2.8
Robot 2	9.93	5.43
Robot 3	10.34	4.14
Promedio	9.83	4.12

**Planificación de Ruta**

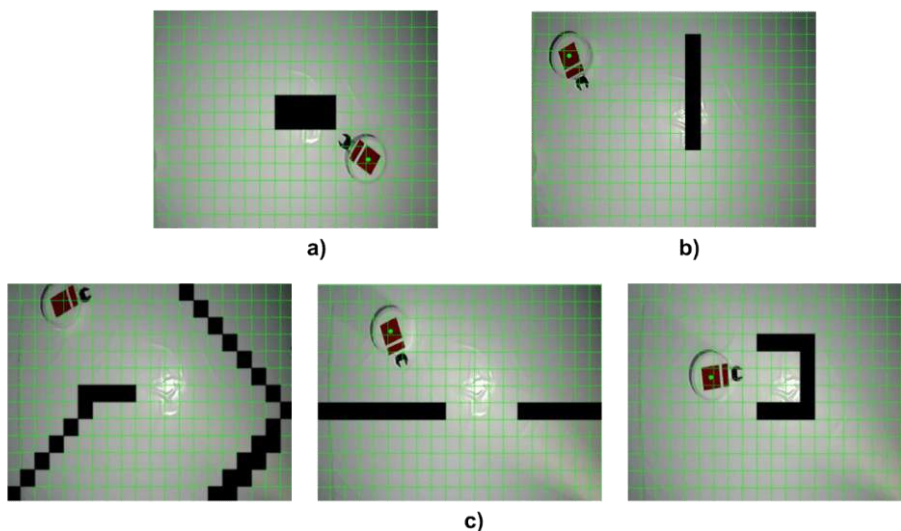
En secciones pasadas se ha comentado sobre el proceso de planificación de ruta que permita un desplazamiento autónomo de los robots, dentro del sistema se han implementado 3 algoritmos de planificación que ya se han descrito a lo largo del documento que son:

- Campos Potenciales
- Campos Potenciales Modificado
- A\*

Se ha establecido un análisis comparativo entre los 3 métodos de planificación de trayectoria para visualizar su funcionamiento para lo cual se ha llevado a cabo 9 casos de estudio haciendo replicas con cada uno de los robots. Los escenarios se encuentran divididos en simple, medio y complejos de forma equitativa y realizando variaciones como se observa en la Figura 87.

**Figura 87**

*Casos de Prueba para Planificación de Trayectoria a) Casos Simples, b) Casos Intermedios, c) Casos Complejos*



La literatura indica varias métricas que se pueden analizar al trabajar con planificación de ruta, las pruebas han sido enfocadas al desempeño de los tres algoritmos para obtener un camino solución desde la posición inicial a la final evadiendo los obstáculos, lo cual se visualiza en la Tabla 51. Donde se asigna 1 si el algoritmo ha resuelto el problema, caso contrario tendrá 0



Tabla 51

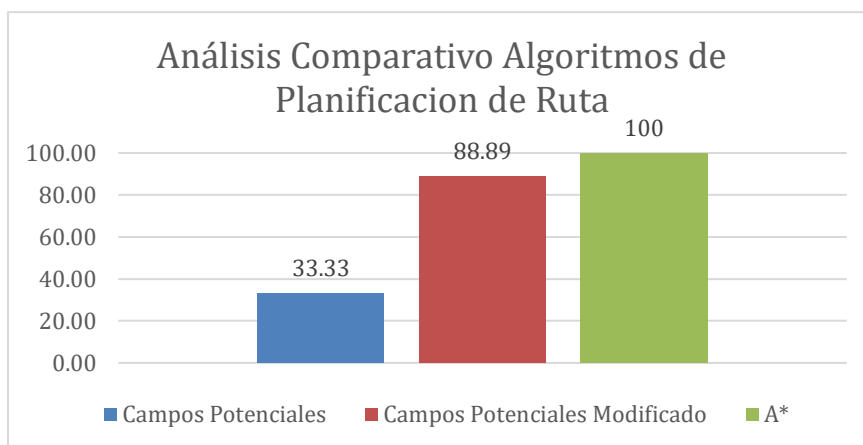
Comparación de la Capacidad de Encontrar Ruta

Dificultad	Caso	Campos Potenciales	Campos Potenciales Modificado	A*
Simple	1	1	1	1
	2	1	1	1
	3	1	1	1
	4	0	1	1
Medio	5	0	1	1
	6	0	1	1
	7	0	0	1
Complejos	8	0	1	1
	9	0	1	1

Como se puede observar en la Figura 88 existe una gran diferencia en la capacidad de hallar la ruta por parte de los algoritmos, teniendo al algoritmo de A\* con una capacidad resolutive del 100% esto se debe al hecho de que realiza un barrido completo de todo el entorno.

Figura 88

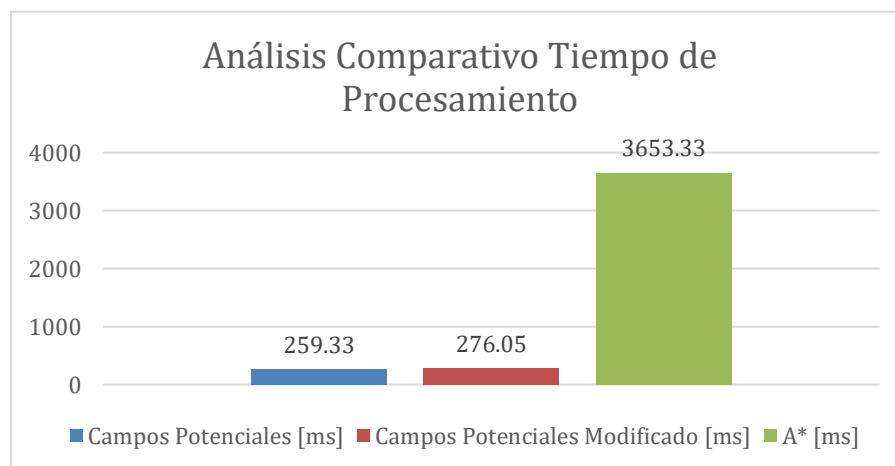
Comparación de la Capacidad de Encontrar Ruta



Por otro lado, es necesario analizar el costo computacional que representan los algoritmos al momento de hallar solución, esto es traducido al tiempo de procesamiento que se tiene para cada caso en función de la complejidad que represente la prueba. Como se puede observar en la Figura 89 se analiza el tiempo computacional en promedio de cada uno de los algoritmos para los casos de prueba en los cuales se tuvo solución en función de la Tabla 51. Se observa que el costo computacional que requiere el algoritmo de A\* es 13.23 veces mayor a Campos Potenciales Modificado que es el segundo caso con mayor cantidad de casos resueltos.

**Figura 89**

*Comparación del Costo Computacional en Algoritmos de Planificación de Ruta*



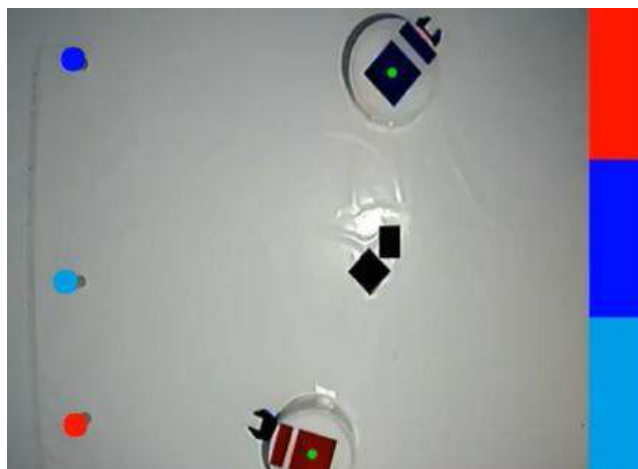
### **Trabajo Colaborativo**

El sistema presenta la capacidad de realizar clasificación de objetos en función del color que se tenga (círculos) y colocarlo en el depósito que le corresponder (rectángulos) como se muestra en la Figura 90 simulando un sistema de paletizado similar al proceso de Amazon, En el

presente caso de prueba se ha desarrollado con 1, 2 y 3 robots para establecer un análisis comparativo en función de ciertas características que se aprecian en la Tabla 52.

**Figura 90**

*Caso de Prueba para Sistema Multirobot*



**Tabla 52**

*Análisis Comparativo con Parámetros de Tiempo y Capacidad de Clasificación*

<b>Cantidad de Robots/Parámetros</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Completa Clasificación	Si	Si	Si
Tiempo de Clasificación[ <i>min</i> ]	10,25	8,22	5,43

En el presente caso de estudio se puede observar que sin importar la cantidad de robots que se utilicen en el trabajo de clasificación la tarea se cumple, pero con diferencias de tiempo que son claras. Al realizar una tarea con un robot se tiene un tiempo de clasificación de 10,25 [*min*] que equivale a 1.24 veces más de lo que toma realizarlo con 2 robots y 1.88 veces más al realizarlo con 3 es decir la cantidad máxima de prototipos disponibles. Esto ejecutándose en una sola tarea de clasificación. A simple vista puede parecer una variación baja sin embargo si se

analiza desde el punto de vista del tiempo de consumo energético por cada robot como se muestra en la Tabla 53.

**Tabla 53**

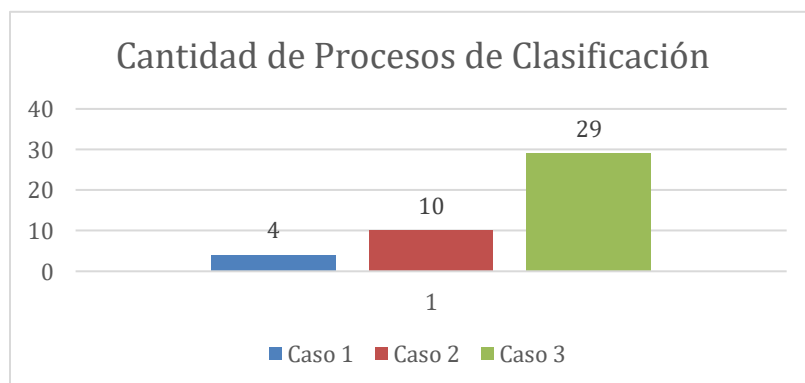
*Tiempo de Funcionamiento de Cada Robot en Proceso de Clasificación*

<b>Caso/Cantidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tiempo por robot en Caso 1 [min]	10,25	inactivo	inactivo
Tiempo por robot en Caso 2 [min]	4,11	4,11	inactivo
Tiempo por robot en Caso 3 [min]	1,54	1,54	1,54

Se aprecia que en el primer caso si se trabaja con 1 solo robot se consumirá un tiempo 10,25 [min] por robot al trabajar, en el segundo caso será de 4,11 [min] y finalmente con todos los prototipos de 1,54. Transformando esto a cantidad de trabajo definiendo como base la autonomía energética de 45 [min] se tiene la cantidad de procesos que se puede desempeñar en cada caso de forma teórica como se muestra en la Figura 91. Si se compara entre el primer caso que incluye la clasificación con un solo robot vs el sistema multirobot con 3 prototipos, existe una mejora clara con el trabajo colaborativo siendo 7.25 veces mejor

**Figura 91**

*Comparación en base a la Cantidad de Procesos de Clasificación en 45 [min]*



## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

Se ha implementado un sistema con tres robots omnidireccionales de 335 [mm] de diámetro y 163.98 [mm] de altura con un peso de 2.87 kg cada uno con una red centralizada, dotado de planificación de trayectoria con el algoritmo de campos potenciales como base y A\* como soporte del proceso. Además, cuenta con una arquitectura IOT comunicada a partir del protocolo MQTT para el trabajo de clasificación de objetos según el color.

El sistema opera dentro de un entorno controlado de 2.92 [m] de longitud y 1.86 [m] de ancho para su funcionamiento en plano x-y, con un sistema de localización intrínseco del robot y un error máximo de 9.22 % en una trayectoria con una ruta promedio de 2.7 [m].

La aplicación cuenta con un sistema de localización global mediante el uso de visión artificial destinado a la localización del robot a partir de su seguimiento punto a punto durante la trayectoria y obteniendo un error máximo del 4.12 % en una ruta promedio de 2.7 [m].

Se ha implementado dentro de la aplicación dos algoritmos de planificación de trayectoria. El método de campos potenciales modificado con una capacidad de resolución de 88.89 % y un costo computacional de 276.05 [ms] y el de A\* que funciona como soporte en caso de que el primero no encuentre ruta con una capacidad de generación de trayectoria del 100 % pero con un tiempo computacional de 3623 [ms].

Se ha implementado un proceso de clasificación de objetos por color con el fin de validar la aplicación del sistema multirobot. Dicho sistema está basado en la distancia euclidiana

existente entre cada uno de los robots y el objetivo a clasificar en el cual el algoritmo selecciona aquel con menor valor para su posterior movimiento, asegurando la coordinación de los prototipos con un 100% de efectividad.

El sistema se encuentra dotado con una red centralizada que comunica los robots en una configuración maestro-esclavo a través del protocolo de comunicación TCP/ROS y a su vez transmite información de forma externa, destinada al control en la nube mediante el protocolo MQTT con un tiempo promedio de entrega de 680 [ms] por proceso.

El sistema multirobot tiene como tarea un proceso para la clasificación de objetos en función del color, que mediante el uso de tres prototipos desempeña la labor en un tiempo de 5.43 minutos en promedio. Mejorando en 1.88 veces la velocidad de la aplicación en contraposición a una tarea realizada por un solo robot.

### **Recomendaciones**

El número actual de prototipos existentes en el proyecto no permiten realizar análisis a gran escala por lo cual se propone la implementación de un mayor número de robots en una red descentralizada y arquitectura iot con protocolo de comunicación http. El cambio permite validar y comparar el funcionamiento en conjunto de la aplicación de clasificación de objetos por color.

Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado las mejores opciones de elementos tomando en cuenta su disponibilidad y costo. Para mejorar el desempeño del robot se sugiere una mejora en el hardware enfocadas a la robustez y control del prototipo, que influye directamente en la localización intrínseca del robot u odometría.

Para mejorar la efectividad del proceso de localización global se debe implementar variaciones del algoritmo de calibración de cámara basada en detección de cuadrícula de ajedrez, circular y perspectiva. Las variaciones deben tomar en cuenta la proporcionalidad del tamaño del entorno de trabajo consiguiendo una reducción en el error menor a 4.12% en la detección y seguimiento de ruta del robot.

Implementar variaciones del algoritmo de planificación de ruta como el de Dijkstra, Bézier, ruta probabilística, etc, que permita mejorar la capacidad de resolución del 88,89% obtenido del método de campos potenciales implementado en el proyecto.

Con el fin de mejorar la coordinación de los prototipos en el proceso de clasificación, se propone incorporar al algoritmo de planificación los parámetros de distancia euclidiana hasta el objetivo y las trayectorias de ruta de los robots participantes.

Aumentar el área de trabajo facilitando la movilidad de los robots dentro del entorno que permita tener varios casos de prueba que validen los resultados actuales de mejora de 1.88 veces el tiempo de clasificación de un sistema con un único robot.

### **Trabajos Futuros**

Implementar un sistema multirobot con un mayor número de prototipos (mínimo 5), los cuales, aprovechando su estructura modular disponen de diferentes sensores de mapeo como el lidar, ultrasónicos y cámara para mejorar su localización intrínseca. El sistema facilita la incorporación de algoritmos de planificación de trayectorias más rápidos y eficientes como la planificación del movimiento del robot mediante predicción visual profunda (Sarkar et al., 2019), para mejorar la adaptabilidad de los prototipos a entornos con obstáculos en movimiento y

complementándolo con el uso de predictores. El sistema deberá estar dotado de una arquitectura iot, pero con la incorporación de diferentes protocolos de comunicación como Coap, Http, Mqtt, etc, que permita establecer un análisis comparativo en la funcionalidad de monitoreo y control.



### Bibliografía

- ACE. (2020). *Cámara matricial ace | Visión Artificial*.  
<http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen/vision-artificial/camaras-para-vision-artificial/camaras-matriciales-ace/>
- Aguirre Aymara, B. G., & Moyano Cabezas, C. J. (2019). *Diseño e implementación de un sistema multirobot descentralizado para realizar trabajo colaborativo con aplicaciones logísticas, flexibles y escalables*. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/18719>
- AIA. (1984). *Asociación de imágenes automatizadas—Automated Imaging Association—Qwe.wiki*. [https://es.qwe.wiki/wiki/Automated\\_Imaging\\_Association](https://es.qwe.wiki/wiki/Automated_Imaging_Association)
- AISVISION. (2020). *Cámaras de Visión Artificial*. <https://www.aisvision.com/es/vision-artificial/camaras-de-vision-artificial/>
- A.S. Mohamed, S., Haghbayan, M.-H., Westerlund, T., Heikkonen, J., Tenhunen, H., & Plosila, J. (2019). A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems. *IEEE Access*, *PP*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929133>
- Atiya, S., & Hager, G. D. (1993). Real-time vision-based robot localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *9*(6), 785-800. <https://doi.org/10.1109/70.265922>
- Ayache, N. (1991). *Artificial vision for mobile robots: Stereo vision and multisensory perception*. MIT Press.

- Banggood.com. (2020). *USB 2.0 Converter Audio Video Grabber Capture Adapter for Computer NTSC PAL*. Wwww.Banggood.Com. [https://www.banggood.com/USB-2\\_0-Converter-Audio-Video-Grabber-Capture-Adapter-for-Computer-NTSC-PAL-p-1023676.html](https://www.banggood.com/USB-2_0-Converter-Audio-Video-Grabber-Capture-Adapter-for-Computer-NTSC-PAL-p-1023676.html)
- Barba Guamán, L. R., Calderón Córdova, C., & Quezada Sarmiento, P. (2017). *Detection of moving objects through color thresholding* (p. 6). <https://doi.org/10.23919/CISTI.2017.7975755>
- BASLER. (2020). *Cámaras fijas IP y Domos*. <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen/vision-artificial/camaras-para-vision-artificial/camaras-fijas-ip-y-domos/>
- Ben-Ari, M., & Mondada, F. (2018). *Robotic Motion and Odometry*. En M. Ben-Ari & F. Mondada (Eds.), *Elements of Robotics* (pp. 63-93). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1_5)
- Berenson, D., Abbeel, P., & Goldberg, K. (2012). *A Robot Path Planning Framework that Learns from Experience*. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3671-3678. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224742>
- Berzgal. (2020). *Alturas, Angulaciones y Movimientos de Cámara—Lenguaje Audiovisual/Sol Berzgal*. <https://sites.google.com/site/lenguajeaudiovisualsolberzgal/alturas-angulaciones-y-movimientos-de-camara>

- Bravo, V. A. O., Arias, M. A. Ni., & Cardenas, J. A. C. (2013). Análisis y aplicación del filtro de Kalman a una señal con ruido aleatorio. *Scientia et Technica*, 18(1), 267-274.  
<https://doi.org/10.22517/23447214.8241>
- Cabrera, L., Campos, R., & Castro, J. (2014). *Pasos críticos en la estimación de pose en cámara: Una evaluación usando la biblioteca LTI-LIB2*. ResearchGate.  
<https://doi.org/10.18845/tm.v0i0.1656>
- Cardin, O. (2019). Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. *Computers in Industry*, 104, 11-21.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.002>
- Chen, H. (2017). Applications of Cyber-Physical System: A Literature Review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 02, 1750012.  
<https://doi.org/10.1142/S2424862217500129>
- Chen, X., Chen, Y. Q., & Chase, J. (2009). *Mobiles Robots—Past Present and Future*.  
<https://doi.org/10.5772/6986>
- Cheng, Y., Maimone, M., & Matthies, L. (2005). *Visual odometry on the Mars Exploration Rovers*. 1, 903-910 Vol. 1. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2005.1571261>
- Colaborativa, U., & Casalet, M. (2018). *La digitalización industrial: Un camino hacia la gobernanza colaborativa. Estudios de casos*.

Darmanin, R., & Bugeja, M. (2017, julio 5). *A Review on Multi-Robot Systems categorised by Application Domain*. <https://doi.org/10.1109/MED.2017.7984200>

Du, S., Sun, W., & Gao, Y. (2014). An investigation on MEMS IMU error mitigation using rotation modulation technique. *27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2014*, 3, 1822-1838. <https://doi.org/10.3390/s16122017>

*Eight teams earn DARPA funds for 2014 robotics finals*. (s. f.). [Www.Army.Mil](http://www.army.mil). Recuperado 4 de noviembre de 2020, de [https://www.army.mil/article/117612/eight\\_teams\\_earn\\_darpa\\_funds\\_for\\_2014\\_robotics\\_finals](https://www.army.mil/article/117612/eight_teams_earn_darpa_funds_for_2014_robotics_finals)

Elia nadira, S., Omar, R., & Hailma, C. K. N. (2016). *Potential field methods and their inherent approaches for path planning*. 11, 10801-10805.

elia nadira, S., Omar, R., & Hailma, C. K. N. (2016). *Potential field methods and their inherent approaches for path planning*. 11, 10801-10805.

ESP32 38 Pines ESP WROOM 32. (s. f.). *CDMX Electrónica*. Recuperado 26 de julio de 2020, de <https://www.cdmxelectronica.com/producto/esp32-38-pines-esp-wroom-32/>

Espressif. (2020). *Wi-Fi & Bluetooth MCUs and AIoT Solutions | Espressif Systems*. <https://www.espressif.com/>

Formacionaudiovisual. (2020, julio 13). *Planos según la posición de la cámara: Cenital y nadir* | *Blog de Formación Audiovisual*. <https://www.formacionaudiovisual.com/blog/cine-y-tv/planos-segun-la-posicion-de-la-camara-cenital-y-nadir/>

Fruk, M., Vujisić, G., & Špoljarić, T. (2013). Parameter identification of transfer functions using MATLAB. *2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 571-576.

Garces, L., & Gaviria, J. L. R. (2014). *Control PID para el control de velocidad de un motor DC*. [/paper/Control-PID-para-el-control-de-velocidad-de-un-DC-Garces-Gaviria/1468b23ca5175d3818faa5d0ec01fdcb91026753](https://doi.org/10.1109/ICIIInfS.2012.6304778)

García, M. I., & Prada, A. L. (2010). *Sistema de Visión Artificial*. 9.

Gautam, A., & Mohan, S. (2012, agosto 6). *A Review of Research in Multi-Robot Systems*. 2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems, ICII 2012. <https://doi.org/10.1109/ICIIInfS.2012.6304778>

González Bonifaz, D. E., & Verdugo Cabrera, A. del C. (2018). *Diseño e implementación de una arquitectura IOT para robótica colaborativa*. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/14730>

Greer, C., Burns, M., Wollman, D., & Griffor, E. (2019). *Cyber-physical systems and internet of things* (NIST SP 1900-202; p. NIST SP 1900-202). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1900-202>

- Haque, S., Aziz, S., & Rahman, M. (2014). Review of Cyber-Physical System in Healthcare. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 20. <https://doi.org/10.1155/2014/217415>
- HIKVISION. (2020). *Cámara Turbo HD*. hiknow. <https://www.hikvision.com/es-la/products/Turbo-HD-Products/Turbo-HD-Cameras/>
- Horvath, I., & Gerritsen, B. (2012, mayo 7). *CYBER-PHYSICAL SYSTEMS: CONCEPTS, TECHNOLOGIES AND IMPLEMENTATION PRINCIPLES*.
- Hurel, L. M. (2018). *Architectures of security and power: IoT platforms as technologies of government*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28293.29920>
- Intel. (2019). *Intel® NUC: Mini PC de factor de forma pequeño*. Intel. <https://www.intel.com/content/www/xl/es/products/boards-kits/nuc.html>
- Janković, M. (s. f.). *Pose estimation & camera movement tracking*.
- Jiménez, J. G., & Baturone, A. O. (1996). Estimación de la posición de un robot móvil. *Automática*, 29, 3-18.
- Joseph, L. (2018). Programming with ROS. En L. Joseph, *Robot Operating System for Absolute Beginners* (pp. 171-236). Apress. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3405-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3405-1_5)
- Kehoe, B., Patil, S., Abbeel, P., & Goldberg, K. (2015). A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2376492>

- Khoshnevis, B., & Bekey, G. (1998). Centralized sensing and control of multiple mobile robots. *Computers & Industrial Engineering*, 35(3), 503-506. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00144-2)
- Klancar, G., Zdesar, A., Blazic, S., & Skrjanc, I. (2017). *Wheeled Mobile Robotics: From Fundamentals Towards Autonomous Systems*. Butterworth-Heinemann.
- Kushwah, M., & Patra, A. (2014, junio 1). *PID Controller Tuning using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor*.
- LaValle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>
- Lazea, G., & Lupu, A. E. (1997). *Aspects on path planning for mobile robots*.
- Lebegue, X., & Aggarwal, J. K. (1993). Significant line segments for an indoor mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(6), 801-815. <https://doi.org/10.1109/70.265923>
- Lee, D. H., Lee, S. S., Kang, H. H., & Ahn, C. K. (2018). Camera Position Estimation for UAVs Using SolvePnP with Kalman Filter. *2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN)*, 250-251. <https://doi.org/10.1109/HOTICN.2018.8606037>
- Li, Y., Dai, S., Zheng, Y., Tian, F., & Yan, X. (2018, enero 28). *Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn* [Research Article]. *Journal of Robotics; Hindawi*. <https://doi.org/10.1155/2018/9373580>

- LOGITECH. (2020). *Cámaras Web*. <https://www.logitech.com/es-mx/webcams?filters=3801>
- marketingbcnvision. (2017, abril 11). Sistemas de iluminación para aplicaciones de visión artificial (Parte II). *Blog de Bcnvision*. <https://www.bcnvision.es/blog-vision-artificial/iluminacion-vision-artificial2/>
- Maza, I., & Ollero, A. (2001). *Robótica. Manipuladores y Robots Móviles* (pp. 422-440).
- Mester, G. (2014, octubre 15). *Introduction to Cloud Robotics*.
- Mohamed, S. A. S., Haghbayan, M., Westerlund, T., Heikkonen, J., Tenhunen, H., & Plosila, J. (2019). A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems. *IEEE Access*, 7, 97466-97486. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929133>
- Moiescu, M. A., Sacala, I. S., & Dumitrache, I. (2016). *A cyber physical systems approach for robotic systems design*. 57(1), 6.
- Murray, R. M., Li, Z., & Sastry, S. S. (2017). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation* (1.ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315136370>
- Node-RED*. (s. f.). Recuperado 4 de octubre de 2020, de <https://nodered.org/>
- OpenCV. (2016). *Contour Features—OpenCV-Python Tutorials 1 documentation*. [https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_contours/py\\_contour\\_features/py\\_contour\\_features.html](https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_contours/py_contour_features/py_contour_features.html)



OpenCV.org. (2014). *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. Camera Calibration. [https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html?](https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html?)

OpenCV.org. (2017). *Structural Analysis and Shape Descriptors*. [https://docs.opencv.org/3.4.1/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga17ed9f5d79ae97bd4c7cf18403e1689a](https://docs.opencv.org/3.4.1/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga17ed9f5d79ae97bd4c7cf18403e1689a)

Owen, T. (1994). *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint by Olivier Faugeras* The MIT Press. doi:10.1017/S0263574700018063

Parker, L. (2008). Multiple Mobile Robot Systems. En *Springer Handbook of Robotics* (pp. 921-941). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_41)

Pessag, F., & Fischer, T. (2017). *Localización externa para robots móviles utilizando múltiples cámaras*. 6.

Quintana, C., & Javier, C. (2019). *Determinación de distancias entre objetos de una imagen*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7750>

Raspberrypi.org. (2019). *Raspberry Pi 3 Model B+*. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>

Rebaza, J. V. (2011). *Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny*. 8.

Ren, K., Wang, C., & Wang, Q. (2012). Security Challenges for the Public Cloud. *IEEE Internet Computing*, 16, 69-73. <https://doi.org/10.1109/MIC.2012.14>

- Reyes, E. (2019, marzo 19). *Seguimiento y estimación de posición de objetos en el plano utilizando cámaras Pan & Tilt*. <http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/365>
- Roos Hoefgeest Toribio, S., Fernández García, Á., Álvarez García, I., & González de los Reyes, R. C. (2020). Localización de robots móviles en entornos industriales usando un anillo de cámaras. *XL Jornadas de Automática: libro de actas (Ferrol, 4-6 de septiembre de 2019)*, 849-858. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497169.849>
- rosserial—ROS Wiki*. (s. f.). Recuperado 4 de octubre de 2020, de <http://wiki.ros.org/rosserial>
- Rubio, F., Valero, F. J. P., & Llopis-Albert, C. (2019). *A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications*. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
- Sahin, E., Girgin, S., Bayindir, L., & Turgut, A. (2008). *Swarm Robotics* (pp. 87-100). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74089-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74089-6_3)
- Saini, D., Prakash, L., & Gaur, H. (2015, julio 1). *Information Communication Technologies for Research and Academic Development*.
- Saito, R., Watanabe, K., & Nagai, I. (2015). *Laser odometry taking account of the tilt on the laser sensor*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244648>
- Sandler, B. Z. (1999). *Robotics: Designing the mechanisms for automated machinery* (2nd ed). Academic Press.
- Sarkar, M., Pradhan, P., & Ghose, D. (2019). Planning Robot Motion using Deep Visual Prediction. *arXiv:1906.10182 [cs]*. <http://arxiv.org/abs/1906.10182>

- Sarma, P., & Bezboruah, T. (2018). *A Real-Time Data Acquisition System for Monitoring Sensor Data*. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i6.539542>
- SELNET. (2020). *DS-2CE16C0T-IRPF – Selnet*. <http://www.selnet-sa.com.ar/producto/ds-2ce16c0t-irpf-2/>
- Shabalina, K., Sagitov, A., & Magid, E. (2018). *Comparative Analysis of Mobile Robot Wheels Design* (p. 179). <https://doi.org/10.1109/DeSE.2018.00041>
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011a). *Introduction to autonomous mobile robots* (2nd ed). MIT Press.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011b). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press.
- Solano, J. D. T. (1991). *Integración multisensorial para reconocimiento y localización de objetos en robótica* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Zaragoza]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=12254>
- Solin, A., Cortes, S., Rahtu, E., & Kannala, J. (2017). *Inertial Odometry on Handheld Smartphones*.
- Srinivas, P., & Kumar, A. (2017). Overview of architecture for GPS-INS integration. *2017 Recent Developments in Control, Automation Power Engineering (RDCAPE)*, 433-438. <https://doi.org/10.1109/RDCAPE.2017.8358310>
- STMicroelectronics. (2020). *L298—Datasheet*. STMicroelectronics. <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>

Sy Salim, S. N., & Zainon, M. (2010). *Control Systems Engineering*.

Tatar, M., Popovici, C., Mandru, D., Ardelean, I., & Plesa, A. (2014). *Design and development of an autonomous omni-directional mobile robot with Mecanum wheels*. 1-6.

<https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857869>

TT Motor. (2020). *Cuál es la diferencia entre los motores de la CC, del servo y del paso—Noticias—Motor de TT (Shenzhen) Co. Industrial, Ltd.* TT Motor Product classification features.

[http://www.usattmotor.com/news/what-s-the-difference-between-dc-servo-step-](http://www.usattmotor.com/news/what-s-the-difference-between-dc-servo-step-8387158.html)

[8387158.html](http://www.usattmotor.com/news/what-s-the-difference-between-dc-servo-step-8387158.html)

UdeSantiagoVirtual. (2019). *Robótica industrial* (Vol. 1-Primera).

<http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24819>

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2004). *Diseño y desarrollo de productos*.

VDI Standars. (2004). *VDI 2206—Design methodology for mechatronic systems*.

[https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/homevdi-2206-design-](https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/homevdi-2206-design-methodology-for-mechatronic-systems)

[methodology-for-mechatronic-systems](https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/homevdi-2206-design-methodology-for-mechatronic-systems)

Vukobratović, M., Đurović, M., Hristić, D., Karan, B., Kirćanski, M., Kirćanski, N., Stokić, D., Vujic, D., & Živković, V. (1989). *Introduction to Robotics*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-](https://doi.org/10.1007/978-3-642-82997-0)

[82997-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-82997-0)

Wan, J., Yan, H., Suo, H., & Li, F. (2011). Advances in Cyber-Physical Systems Research. *TIIS*, 5,

1891-1908. <https://doi.org/10.3837/tiis.2011.11.001>

Wang, L., Chai, S., Yoo, D., Gan, L., & Ng, K. (2015). *PID and predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB/Simulink*. John Wiley & Sons.

Wang, Z., Shi, Z., Li, Y., & Tu, J. (2013). The optimization of path planning for multi-robot system using Boltzmann Policy based Q-learning algorithm. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1199-1204.  
<https://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739627>

Yandún, A., & Sotomayor, N. (2012). *Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil*.

Yousif, K., Bab-Hadiashar, A., & Hoseinnezhad, R. (2015). An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics. *Intelligent Industrial Systems*, 1.  
<https://doi.org/10.1007/s40903-015-0032-7>

Zamora-Izquierdo, M., Tomás-Balibrea, L., Barberá, H., & Skarmeta, A. (2000). *Navegación Planificada de un Robot Móvil en Entornos Interiores Desconocidos*.

Zhang, J., & Singh, S. (2014, julio 1). *LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time*.  
<https://doi.org/10.15607/RSS.2014.X.007>

## Anexos