



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS
APLICADAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA
PARA EXTERIORES TELEOPERADA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

PAÚL FABIÁN HERRERA BUCHELI

DIRECTORA: Ing. VERÓNICA PATRICIA GREFA AGUINDA, Msc.

D.M. Quito,

2016

DECLARACIÓN

Yo, Paúl Fabián Herrera Bucheli, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que las referencias bibliográficas han sido consultadas, las mismas que se incluyen en el documento.

La Universidad Internacional del Ecuador, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa vigente de la institución.



Paúl Fabián Herrera Bucheli

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paúl Fabián Herrera Bucheli, bajo mi supervisión.

Ing. Verónica Grefa, MSc.
Directora del proyecto

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO I	1
1.1	TEMA.....	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	PLATAFORMAS ROBÓTICAS Y SU DESARROLLO	1
1.3.1	PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL, ANTECEDENTES	2
1.3.2	SOFTWARE DE CONTROL	4
1.3.3	TELE OPERACIÓN.....	9
1.3.4	MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	11
1.3.5	CONTROLADOR PID	14
1.3.6	SISTEMA OPERATIVO UBUNTU.....	16
1.4	ESTADO DEL ARTE DE PLATAFORMAS MÓVILES	17
1.4.1	CLEARPATH ROBOTICS HUSKY.....	17
1.4.2	MEGA BOT	18
2	CAPÍTULO II	20
2.1	ESQUEMA Y FUNCIONAMIENTO.....	20
2.2	PROBLEMA.....	20
2.3	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	21
2.3.1	INTRODUCCIÓN	21
2.3.2	CASA DE LA CALIDAD	21
2.3.3	VOZ DEL USUARIO	21
2.3.4	VOZ DEL INGENIERO.....	22
2.3.5	IMPLEMENTACIÓN DE LA CASA DE LA CALIDAD	22
2.4	DISEÑO CONCEPTUAL	23
2.4.1	ANÁLISIS FUNCIONAL	24
2.4.2	DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES	24
2.4.3	MÓDULO DE CONTROL.....	25
2.4.4	MÓDULO ELÉCTRICO.....	25
2.4.5	MÓDULO MECÁNICO.....	25
2.5	ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN.....	26
2.5.1	PROCESO DE EVALUACIÓN DE SOLUCIONES.....	29
3	CAPÍTULO III	37
3.1	DISEÑO MECÁNICO.....	37
3.1.1	PESO DE LA PLATAFORMA	38

3.1.2	DIMENSIONAMIENTO DE MOTORES	39
3.1.3	SELECCIÓN DE CADENA Y PIÑONES PARA LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA	44
3.1.4	DISEÑO DE LOS EJES DE TRANSMISIÓN	47
3.1.5	DISEÑO DEL CHASIS DE LA PLATAFORMA	63
3.1.6	CARROCERÍA DE LA PLATAFORMA.....	68
3.2	DISEÑO ELECTRÓNICO, CONTROL Y COMUNICACIONES	69
3.2.1	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DE MOTORES.....	69
3.2.2	SELECCIÓN SENSORES DE LA PLATAFORMA	73
3.2.3	CONTROLADOR LÓGICO DE LA PLATAFORMA.....	77
3.2.4	ELEMENTOS DE LA ESTACIÓN BASE.....	78
3.2.5	DIMENSIONAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA....	83
3.2.6	DISEÑO DE CONTROL DE LA PLATAFORMA	85
3.2.7	INTERFAZ DE CONTROL	92
4	CAPÍTULO IV.....	103
4.1	CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA.....	103
4.1.1	MOTOR.....	103
4.1.2	EJE	107
4.1.3	CHASIS.....	111
4.1.4	CARROCERIA	112
4.1.5	RUEDAS	115
4.1.6	SHIELD ARDUINO.....	117
4.1.7	BANCO DE BATERÍAS.....	118
4.1.8	ENSAMBLAJE PLATAFORMA	121
4.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	122
4.2.1	ADQUISICIÓN DE SEÑALES Y CALIBRACIÓN DE SENSORES.....	122
4.2.2	AUTONOMÍA DE FUNCIONAMIENTO.....	124
4.2.3	ALCANCE EN EXPLORACIÓN	127
4.3	ANÁLISIS DE COSTOS	131
	CONCLUSIONES.....	133
	RECOMENDACIONES	134
	BIBLIOGRAFÍA	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Robot Shakey.....	2
Figura 1.2 Robot Cheetah del MIT	3
Figura 1.3 Plataforma móvil Guardian de la empresa Robotniks	5
Figura 1.4 Simulación de HUSKY en RViz.....	5
Figura 1.5 Robot manipulador ABB IRB 24000	6
Figura 1.6 Estructura de un paquete de ROS	7
Figura 1.7 Nodos conectados con estadísticas.....	8
Figura 1.8 Esquema de un brazo tele operado	10
Figura 1.9 Partes de un motor de corriente continua	11
Figura 1.10 Curva característica de un motor de imán permanente.....	12
Figura 1.11 Modulación por ancho de pulso	14
Figura 1.12 Respuestas a un escalón de distintos controladores	15
Figura 1.13 ROS en Ubuntu	16
Figura 1.14 HUSKY con equipamiento de exploración	17
Figura 1.15 Mega BOT en su configuración básica.....	19
Figura 2.1 Esquema de la Plataforma Móvil.....	20
Figura 2.2 Casa de la calidad de la plataforma	23
Figura 2.3 Módulo Funcional en el Nivel 0	24
Figura 2.4 Módulos Funcionales de la plataforma en nivel 1	25
Figura 3.1 Proceso de diseño y selección de elementos mecánicos	38
Figura 3.2 Fuerzas Aplicadas sobre la plataforma	41
Figura 3.3 Curvas características de los motores de la plataforma.....	43
Figura 3.4 Cuadro Velocidad vs Potencia cadenas de rodillos.....	46
Figura 3.5 Potencia para piñones ANSI 40	47
Figura 3.6 Secciones Eje de Transmisión	48
Figura 3.7 Eje ensamblado con sus elementos.....	49
Figura 3.8 Fuerzas y Reacciones en el Eje.....	50
Figura 3.9 Reacciones Plano XZ.....	52
Figura 3.10 Reacciones Plano YZ.....	53
Figura 3.11 Diagrama Esfuerzo Cortante Plano XZ	54
Figura 3.12 Diagrama Momento Flector Plano XZ	54

Figura 3.13 Diagrama Esfuerzo Cortante Plano YZ	55
Figura 3.14 Diagrama Momento Flector Plano YZ	55
Figura 3.15 Momento Flector Total	56
Figura 3.16 Par Torsión sobre el Eje	56
Figura 3.17 Diámetro mínimo del eje obtenido del software CAE	60
Figura 3.18 Diámetros y clasificaciones de carga rodamientos serie 02	63
Figura 3.19 Esquema de Apoyos y Fuerzas en viga	65
Figura 3.20 Viga Estáticamente Indeterminada.....	66
Figura 3.21 Diagrama de Fuerza Cortante en la Viga	66
Figura 3.22 Diagrama de Momento Flexionante en la Viga	67
Figura 3.23 Tabla de Inercias de Tubos Cuadrados	68
Figura 3.24 Carrocería de la plataforma.....	69
Figura 3.25 Descripción de las entradas y salidas del controlador Sabertooth 2x32	70
Figura 3.26 Selectores configurados para comunicación serial	72
Figura 3.27 Tarjeta con el paquete MPU-9150.....	74
Figura 3.28 Sensor de Presión BMP180	75
Figura 3.29 Encoder de Cuadratura	76
Figura 3.30 Cámara de Video Vigilancia	76
Figura 3.31 Mando de control Logitech F310.....	79
Figura 3.32 Tarjeta de video EasyCAP	80
Figura 3.33 Módulos SiK de Telemetría	81
Figura 3.34 Módulos de Transmisión de Video	82
Figura 3.35 Diagrama elementos de Control Plataforma	85
Figura 3.36 Diagrama de Flujo Arduino.....	86
Figura 3.37 Pestaña configuración comunicación serial	89
Figura 3.38 Configuración módulos en el programa 3DRRadio Config.....	92
Figura 3.39 Proceso de adquisición de imagen.....	94
Figura 3.40 Archivo info_plataforma.msg	98
Figura 3.41 Mensaje info_plataforma mediante el comando rosmsg	98
Figura 3.42 Archivo envio_plataforma.msg	99
Figura 3.43 Mensaje envio_plataforma mostrado en línea de comandos	100
Figura 3.44 Interfaz Realizada en RQT	100
Figura 3.45 Ventana de Video.....	101
Figura 3.46 Ventana de monitoreo de variables.....	102

Figura 4.1	Proceso de Instalación de Motores	104
Figura 4.2	Eje Motor silla de ruedas.....	105
Figura 4.3	Piñón del Motor de 28 dientes.....	105
Figura 4.4	Fotografía Eje de Motor con chaveta y bocín.....	105
Figura 4.5	Eje del motor con piñón asegurado.....	106
Figura 4.6	Soporte Motor	106
Figura 4.7	Eje Motor.....	107
Figura 4.8	Motor con Encoder	107
Figura 4.9	Eje de acero de 1.25 pulgadas.....	108
Figura 4.10	Eje maquinado en el torno	109
Figura 4.11	Canal chavetero	109
Figura 4.12	Piñón insertado en el eje.....	110
Figura 4.13	Eje con rodamientos y piñón	110
Figura 4.14	Chasis Pintado	111
Figura 4.15	Chasis con Ejes y Motores.....	112
Figura 4.16	Tapa Superior.....	113
Figura 4.17	Carrocería Capa Base.....	113
Figura 4.18	Carrocería capa final de pintura	114
Figura 4.19	Componentes instalados carrocería	114
Figura 4.20	Cableado Interno Carrocería	115
Figura 4.21	Conector Eléctrico Chasis	115
Figura 4.22	Bocín Ruedas plataforma.....	116
Figura 4.23	Rueda con Bocín.....	116
Figura 4.24	Aro reforzado	117
Figura 4.25	Vista Posterior Placa Circuito Impreso	117
Figura 4.26	Shield Arduino.....	118
Figura 4.27	Batería 12 V 7 Ah.....	118
Figura 4.28	Arreglo baterías.....	119
Figura 4.29	Banco de Baterías.....	120
Figura 4.30	Cargador de Baterías	120
Figura 4.31	Proceso de ensamblaje plataforma	121
Figura 4.32	Mediciones iniciales plataforma	123
Figura 4.33	Mediciones Finales Plataforma	124
Figura 4.34	Plataforma sobre Césped.....	125

Figura 4.35 Plataforma sobre Arena	125
Figura 4.36 Plataforma con GPS instalado	128
Figura 4.37 Plataforma prueba de alcance	128
Figura 4.38 Trayecto de prueba	129
Figura 4.39 Latencia Datos	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de datos nativos de ROS	9
Tabla 1.2 Características Físicas del HUSKY	18
Tabla 1.3 Características Mega BOT	19
Tabla 2.1 Soluciones para el Módulo de Control	26
Tabla 2.2 Soluciones para el Módulo Eléctrico.....	28
Tabla 2.3 Soluciones para el Módulo Mecánico	29
Tabla 2.4 Valores de Ponderación	30
Tabla 2.5 Criterios de evaluación del Módulo de Control	30
Tabla 2.6 Ponderación de criterios Módulo de Control.....	31
Tabla 2.7 Peso específico para el criterio "Software"	31
Tabla 2.8 Peso específico criterio "Alcance"	31
Tabla 2.9 Peso específico para el criterio "Licencias"	32
Tabla 2.10 Peso específico para el criterio "Soporte"	32
Tabla 2.11 Peso específico para el criterio "Compatibilidad"	32
Tabla 2.12 Posicionamiento de la solución	33
Tabla 2.13 Criterios específicos para el Módulo Mecánico	33
Tabla 2.14 Ponderación de los criterios específicos del Módulo Mecánico.....	34
Tabla 2.15 Peso específico criterio "Peso"	34
Tabla 2.16 Peso específico criterio "Mantenimiento"	34
Tabla 2.17 Peso específico criterio "Movilidad"	35
Tabla 2.18 Peso específico criterio "Costo"	35
Tabla 2.19 Posicionamiento solución Módulo Mecánico	35
Tabla 3.1 Peso estimado de la plataforma	39
Tabla 3.2 Coeficiente de Resistencia a la rodadura para distintos terrenos.....	40
Tabla 3.3 Características del Motor.....	43
Tabla 3.4 Características motores plataforma.....	44
Tabla 3.5 Factor de Servicio para Cadenas de Rodillos	45
Tabla 3.6 Factores de Esfuerzo	58
Tabla 3.7 Diámetros mínimos recomendados	59
Tabla 3.8 Comparativa dimensiones eje entre Software CAE y Diseño	60
Tabla 3.9 Vida de Rodamientos según Aplicación	61

Tabla 3.10 Factor de Carga Rodamientos	62
Tabla 3.11 Deflexión máxima vigas recomendada.....	64
Tabla 3.12 Conexiones Tarjeta Sabertooth 2x32	71
Tabla 3.13 Variables con Dispositivo de Medición	73
Tabla 3.14 Características Necesarias de Placa Arduino	77
Tabla 3.15 Comparativa tarjetas Arduino	78
Tabla 3.16 Consumo Componentes 5 V	83
Tabla 3.17 Consumo Componentes 12 V	83
Tabla 3.18 Consumo Motores 24 V.....	84
Tabla 3.19 Potencia Total Plataforma	84
Tabla 3.20 Conexiones Elementos de Control	87
Tabla 3.21 Configuración de selectores en la tarjeta Sabertooth 2x32	89
Tabla 3.22 Valores de configuración de los módulos de telemetría	91
Tabla 3.23 Variables mensaje info	97
Tabla 3.24 Variables mensaje envio_plataforma.....	99
Tabla 4.1 Dimensiones de la batería.....	118
Tabla 4.2 Características Eléctricas	119
Tabla 4.3 Características cargador de baterías.....	121
Tabla 4.4 Datos plataforma a nivel.....	122
Tabla 4.5 Datos plataforma inclinación de 15 grados (pitch).....	123
Tabla 4.6 Datos plataforma inclinación 15 grados (roll)	123
Tabla 4.7 Resultados Pruebas de Autonomía	126
Tabla 4.8 Capacidad del banco de baterías.....	126
Tabla 4.9 Latencia de los Datos de Transmisión de la Plataforma.....	129
Tabla 4.10 Materiales Prototipo.....	131
Tabla 4.11 Servicios de Fabricación	132

RESUMEN

Se realiza el diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada usando el software ROS para su comunicación y control a distancia. La plataforma robótica tiene una velocidad máxima de desplazamiento de 3 km/h configurable remotamente mediante el interfaz HMI o el mando de control con un alcance máximo de 250m. Con un peso de 50 kg y 900x600x300 mm de dimensión la plataforma robótica utiliza 2 motores de corriente continua para su desplazamiento y cuenta con baterías de 24V 14 Ah para el sistema de alimentación, lo que le proporciona autonomía por un tiempo máximo de 1 hora en exteriores. La plataforma robótica ha sido diseñada bajo normas de protección para motores IP14 para resistencia al entorno e incluye sensores para la medición variables externas como temperatura, altura e inclinación; adicionalmente posee una cámara para la adquisición de imágenes desde el entorno. Finalmente, la interfaz HMI procesa la información capturada desde la plataforma y la muestra en pantalla en tiempo real permitiendo una fácil exploración.

ABSTRACT

The design and construction of a tele-operated platform robot for outdoor environments is presented, ROS software for communication and remote control is used in this design. The platform robot has a maximum travel speed of 3km/h which is remotely configurable by the HMI or the joystick at maximum reach of 250m. With 50 kg of weight and 900x600x300mm of dimension, the platform robot uses 2 DC motors for movement and a 24V 15Ah battery bank for its power supply which turn the platform in an autonomous system during 1 hour outdoors. It has been designed under IP14 protection standard for motors and it includes sensors to measure temperature, height and slope; in addition, a camera for image acquisition is included to recover the outdoor. Finally, the entire captured information is processed by HMI and displayed in real time allowing an easier exploration.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 TEMA

Diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada.

1.2 OBJETIVOS

General

- Diseñar y construir una plataforma robótica para exteriores teleoperada.

Específicos:

- Fundamentar las características y especificaciones técnicas de plataformas teleoperadas.
- Analizar y seleccionar alternativas para cada uno de los componentes que conforman la plataforma.
- Calcular y dimensionar los elementos y componentes mecánicos de la plataforma.
- Construir la plataforma teleoperada.
- Diseñar e implementar el control para el posicionamiento de la plataforma.
- Desarrollar e implementar la interfaz de comunicación con la plataforma.
- Realizar pruebas de funcionamiento de la plataforma.

1.3 PLATAFORMAS ROBÓTICAS Y SU DESARROLLO

En el marco teórico se definen conceptos necesarios para el desarrollo del proyecto de titulación, se incluyen los conceptos específicos de elementos del proyecto de los cuales se necesita una mayor comprensión.

1.3.1 PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL, ANTECEDENTES

Una plataforma robótica móvil se define como una máquina capaz de trasladarse en un ambiente para el que fue diseñada, estas pueden tener diferentes tipos de locomoción de acuerdo al entorno al que estén destinadas.

Los primeros robots móviles empezaron a desarrollarse a partir de la segunda guerra mundial en conjunto con el desarrollo de las computadoras. El primer robot móvil fue desarrollado en 1970 por el SRI (Stanford Research Institute) y su nombre era Shakey, su única función era moverse hacia un bloque y disponía de pocos sensores. Fue nombrado Shakey porque al trasladarse temblaba por la forma de su estructura como se muestra en la Figura 1.1 [1].

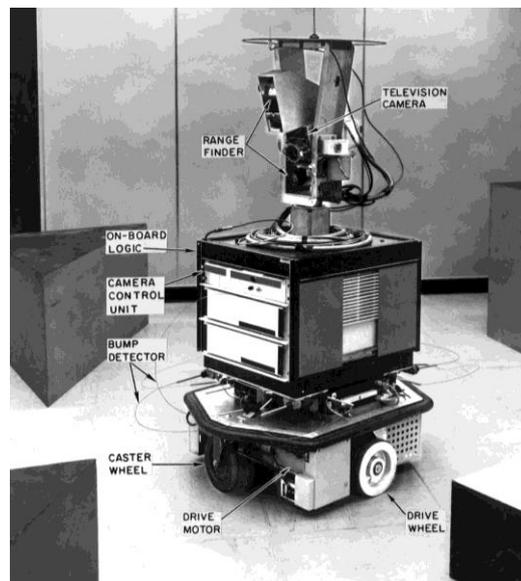


Figura 1.1 Robot Shakey

En los años 80 se mantuvo el desarrollo de estos robots pero todavía no tenían aplicaciones industriales.

El mayor desarrollo de esta área de la robótica se dio en la década de los noventa y uno de sus mayores y más populares exponentes fue el Rover Sojourner enviado en la sonda Pathfinder de la NASA. Este robot tuvo la misión de la exploración del planeta Marte y cumplió su misión exitosamente.

Los robots móviles más comunes son los vehículos de locomoción estos usan ruedas o bandas para poder movilizarse, los diferentes tipos de locomoción son los siguientes:

- Diferencial
- Triciclo
- Ackerman
- Síncrona
- Omnidireccional
- Por cintas de deslizamiento

Cada sistema de locomoción tiene sus ventajas y desventajas por ejemplo un sistema por cintas de deslizamiento usa orugas para su desplazamiento lo que le brinda una ventaja en superficies irregulares.

Existen también un grupo de robots móviles que usan patas para su locomoción, estos representan un desarrollo muy avanzado debido a la complejidad en todos los sistemas necesarios para su movimiento.

Existen robots como el Cheetah del MIT que demuestran las capacidades de estos robots como en la Figura 1.2 [2].

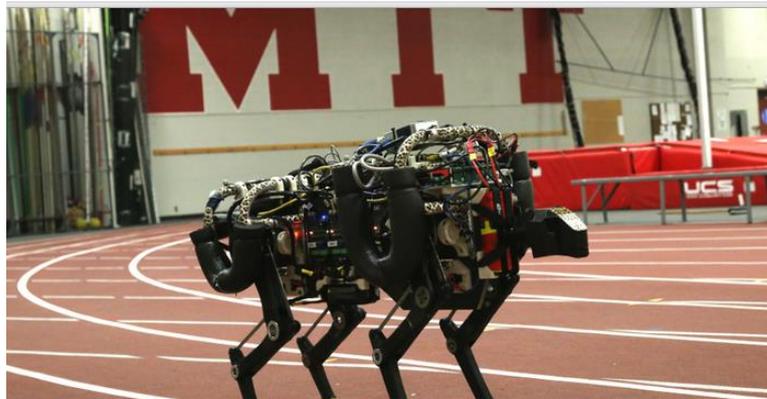


Figura 1.2 Robot Cheetah del MIT

Con el actual desarrollo de la tecnología se ha permitido desarrollar robots móviles asequibles y con aplicaciones para el uso cotidiano, tales como:

- Aspiradoras Automáticas
- AIBO (Robot con forma de perro de la marca Sony)
- Cortadores de Césped
- ASIMO (Robot Humanoide de la Honda)
- Drones

1.3.2 SOFTWARE DE CONTROL

El software de control es el conjunto de herramientas, programas y rutinas de control que permiten el control y desarrollo de una determina tarea.

En el desarrollo de la plataforma se usa el sistema operativo para robots ROS.

1.3.2.1 ROS

ROS.org en su sitio web [3] menciona que ROS es un sistema operativo para desarrollar aplicaciones para robots, ROS provee diferentes herramientas para el desarrollo de robots de diferentes características, entre estas herramientas se encuentran: librerías específicas, controladores para dispositivos, protocolos de comunicación.

ROS está presente en diferentes tipos de robots en los que se incluyen: manipuladores móviles, robots móviles, manipuladores, vehículos autónomos, robots sociales, humanoides, vehículos aéreos autónomos, vehículos autónomo acuáticos y otros.

Entre los robots que pueden usar ROS para su funcionamiento se encuentran los robots de las compañías Clearpath Robotics, Erle, FESTO, Robotniks.

Robotniks es una empresa especializada en el desarrollo e investigación de robots móviles, manipuladores y brazos robóticos. Disponen de varios robots de investigación enfocados a distintas áreas como la plataforma móvil Guardian que se muestra en Figura 1.3 [4], con esta plataforma se pueden realizar distintas actividades que se enlistan a continuación:

- Búsqueda y desarrollo
- Navegación en exteriores e interiores
- Búsqueda de explosivos
- Vigilancia remota
- Mapeo y mediciones remotas



Figura 1.3 Plataforma móvil Guardian de la empresa Robotniks

La Plataforma Móvil puede ser controlada desde ROS con el paquete Robotnik Automation Guardian [5] que contiene librerías para la tele operación, odometría y navegación. También se puede realizar el control de manipuladores instalados en el Guardian a través de la integración de otras librerías.

La compañía Clearpath robotics provee una máquina virtual con ROS instalado y los paquetes necesarios para realizar simulaciones del robot HUSKEY, para la conexión física y la operación del robot.

En la máquina virtual provista en la página web [6] se puede realizar una simulación como se muestra en la Figura 1.4.

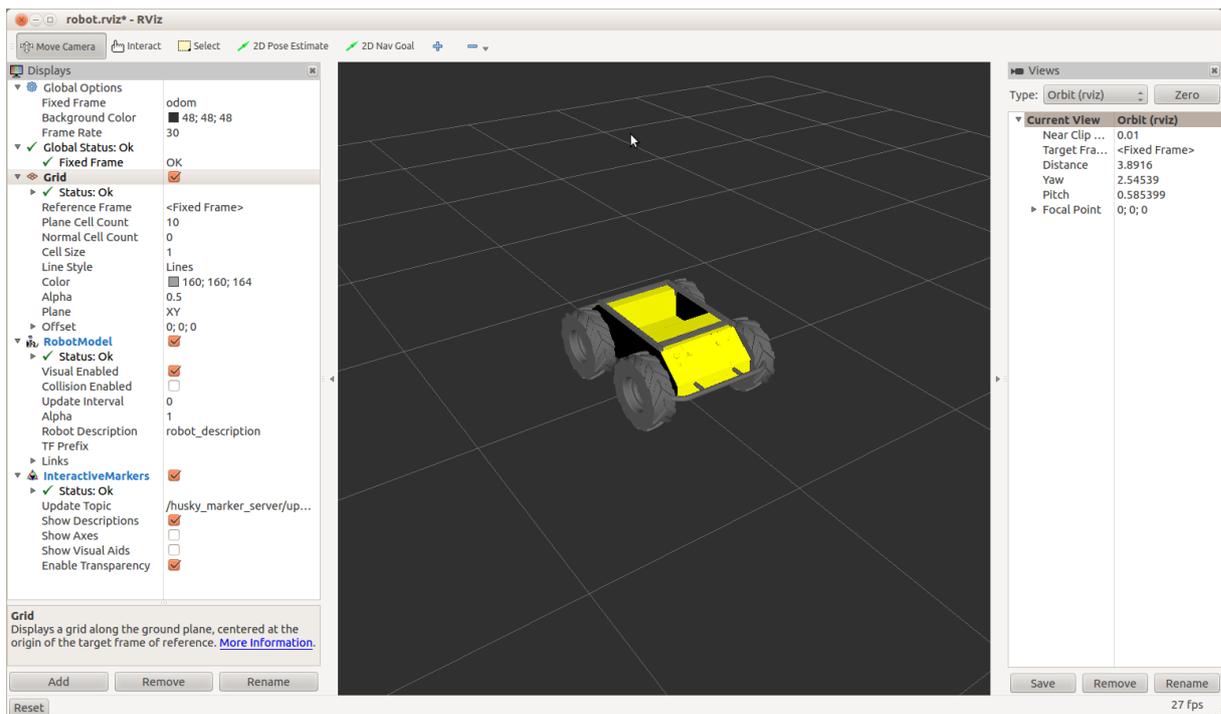


Figura 1.4 Simulación de HUSKY en RViz

En el ambiente industrial ROS es usado en manipuladores de las marcas ABB y FANUC.

Además brinda un paquete para la comunicación a través de nodos con los controladores de robots industriales ABB. También se pueden realizar simulaciones de los robots a través del paquete ABB RobotStudio [7].

En la Figura 1.5 se muestra un robot manipulador de la marca ABB, este robot puede realizar las siguientes funciones:

- Soldadura
- Ensamblaje
- Cortes
- Pegado y sellado
- Pulido
- Empaquetamiento
- Manejo de material



Figura 1.5 Robot manipulador ABB IRB 24000

A continuación se describen las partes principales de la arquitectura y elementos de ROS.

1.3.2.1.1 Paquete

En ROS se define a un paquete como la estructura básica de organización del entorno. Un paquete de ROS puede contener librerías, ejecutables, scripts o código de programación. La estructura de un paquete de ROS se describe en la Figura 1.6.

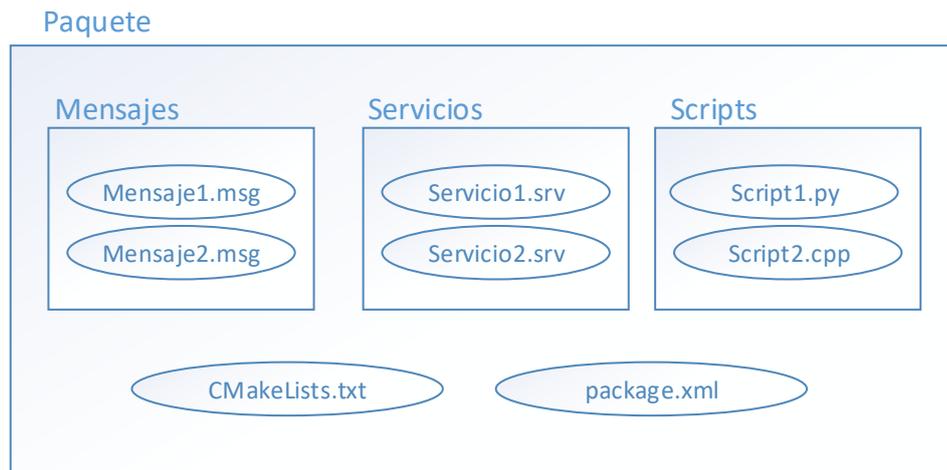


Figura 1.6 Estructura de un paquete de ROS

En la Figura 1.6 se muestra la estructura básica de un paquete de ROS, a continuación se da una breve descripción de cada elemento:

- **Mensajes:** Es una carpeta con nombre “msg” que contiene los mensajes personalizados del paquete. Cada mensaje se guarda dentro de la carpeta con el nombre del mensaje con la extensión .msg.
- **Servicios:** Es una carpeta que contiene los servicios del paquete, esta carpeta tiene nombre “srv”. Los servicios se guardan con su nombre con la extensión .srv.
- **Scripts:** En esta carpeta de nombre “scripts” se tiene los ejecutables para la creación de nodos. Los scripts se guardan dentro de esta carpeta.
- **CMakeLists.txt:** Este archivo de texto contiene información para la creación de mensajes y servicios y las dependencias del paquete.
- **Package.xml:** Este archivo contiene información acerca del paquete tales como nombre, creador y/o licencia.

1.3.2.1.2 Nodo

Un nodo se define como un proceso que realiza cálculos. En la estructura de ROS se tiene varios módulos que se comunican a través de tópicos para transportar la información entre sí.

El sistema de control de un robot generalmente contiene varios nodos que trabajan en conjunto y se dividen las acciones necesarias para el funcionamiento del robot.

Por ejemplo un robot puede tener los siguientes nodos:

- Nodo de la interfaz gráfica
- Nodo del control de motores
- Nodo de localización
- Nodo de lectura de sensor de luz
- Y demás nodos

Los Nodos de ROS dan varias ventajas entre las que se encuentran:

- Tolerancia a errores
- Segmentación de código
- Desarrollo simultáneo

En la figura 1.7 [8] se muestran varios nodos conectados con flechas y mostrando la frecuencia con la que se publican los mensajes y el nombre del mensaje que se envía a cada nodo.

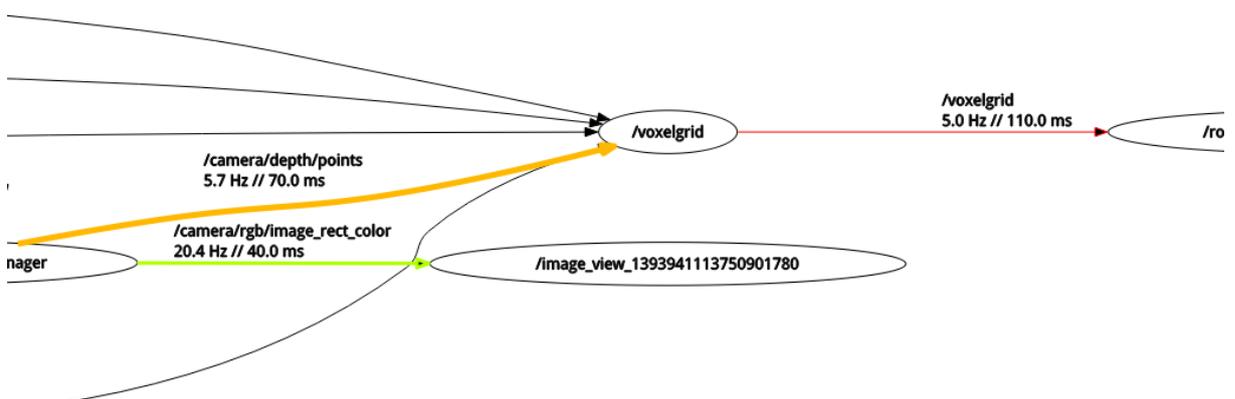


Figura 1.7 Nodos conectados con estadísticas

1.3.2.1.3 Mensaje

Los nodos se comunican entre sí mediante la publicación de mensajes en tópicos.

Un mensaje es una estructura simple de datos que contiene información sobre el tipo de datos que se publican en un tópico.

Los mensajes también suelen incluir un tipo de mensaje especial llamado “Header” que contiene información que se incluye automáticamente como estampa de tiempo y un id único secuencial que se incrementa con cada publicación de un mensaje.

Los tipos de datos que se pueden incluir en un mensaje se detallan en la Tabla 1.1 adaptada de [9].

Tabla 1.1 Tipos de datos nativos de ROS

Dato Primitivo	Serialización	C++	Python
bool (1)	unsigned 8-bit int	uint8_t (2)	bool
int8	signed 8-bit int	int8_t	int
uint8	unsigned 8-bit int	uint8_t	int (3)
int16	signed 16-bit int	int16_t	int
uint16	unsigned 16-bit int	uint16_t	int
int32	signed 32-bit int	int32_t	int
uint32	unsigned 32-bit int	uint32_t	int
int64	signed 64-bit int	int64_t	long
uint64	unsigned 64-bit int	uint64_t	long
float32	32-bit IEEE float	float	float
float64	64-bit IEEE float	double	float
string	ascii string (4)	std::string	string
time	secs/nsecs unsigned 32-bit ints	ros::Time	rospy.Time
duration	secs/nsecs signed 32-bit ints	ros::Duration	rospy.Duration

1.3.3 TELE OPERACIÓN

Un sistema tele operado es aquel con el que se puede operar un robot a distancia a través de un mando (teclado, ratón, joystick) desde una estación base u otro robot que

sea capaz de tomar las órdenes del operador y transmitir las para replicarlas en el robot esclavo.

En la Figura 1.8 [10] se puede observar un esquema de tele operación de un brazo robótico a través de la realimentación de video mediante un conjunto cámara monitor.

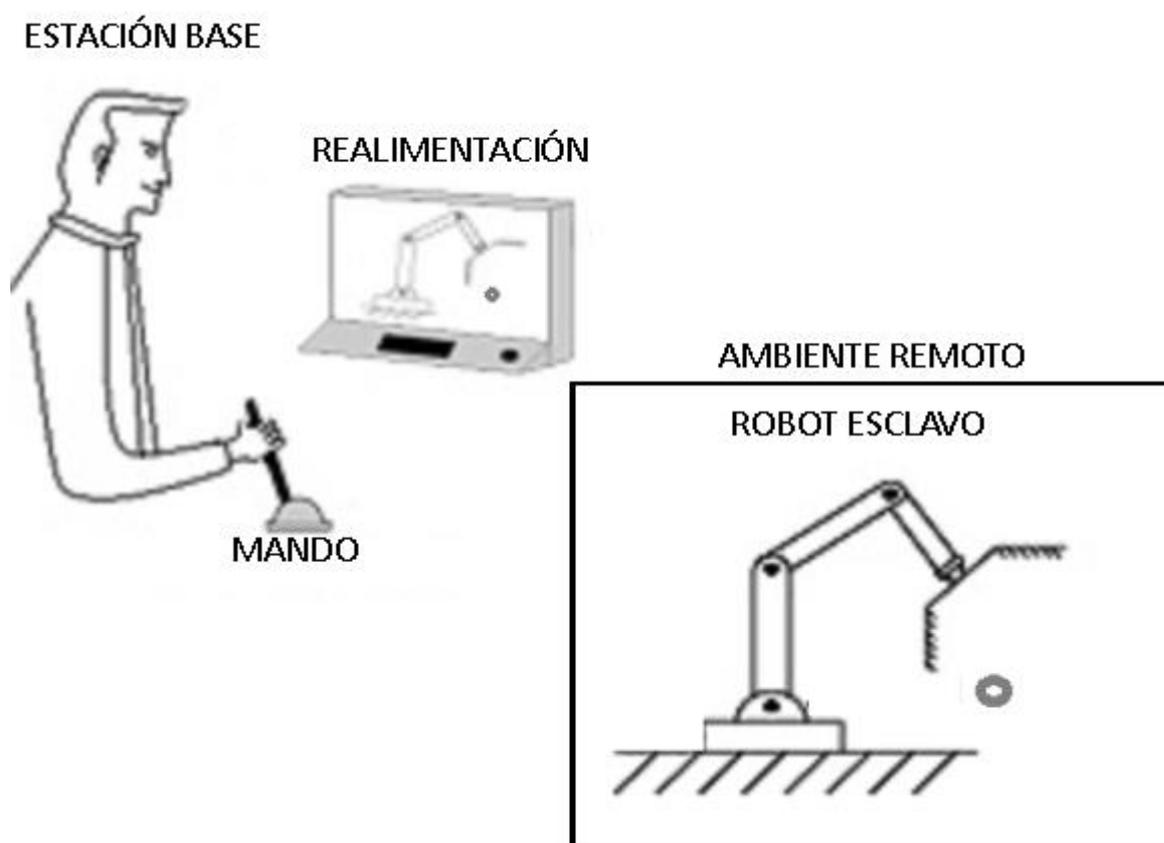


Figura 1.8 Esquema de un brazo tele operado

La tele operación se realiza debido a la distancia que existe entre el operador y el robot esclavo o por que las condiciones del ambiente no son aptas para que un operador maneje el robot localmente.

Para obtener una tele operación satisfactoria se debe tener transparencia en la comunicación, esto implica que la comunicación no puede ser inestable, la inestabilidad puede ser causada por fenómenos eléctricos o por retrasos en la comunicación.

La tele operación implica una operación transparente en la cual las órdenes del operador son replicadas en el robot esclavo sin ningún tipo de modificación en las

mismas, a pesar de ser transparente tiene retrasos por la comunicación entre el robot y el dispositivo de control.

1.3.4 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Un motor de corriente continua es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, este tipo de motores trabaja con una fuente de energía continua como baterías, fuentes reguladas de alimentación y rectificadores.

El motor de corriente continua se compone de 2 partes, el estator y el rotor. El estator contiene el devanado principal de la máquina sean estos imanes permanentes o electroimanes y también entrega soporte mecánico al motor mientras el rotor genera el movimiento a través de la alimentación por escobillas.

Se puede visualizar las partes de un motor de corriente continua en la Figura 1.9 [11]. Es posible controlar el torque y la velocidad de estos motores mediante la variación del voltaje a la entrada del rotor y estator.

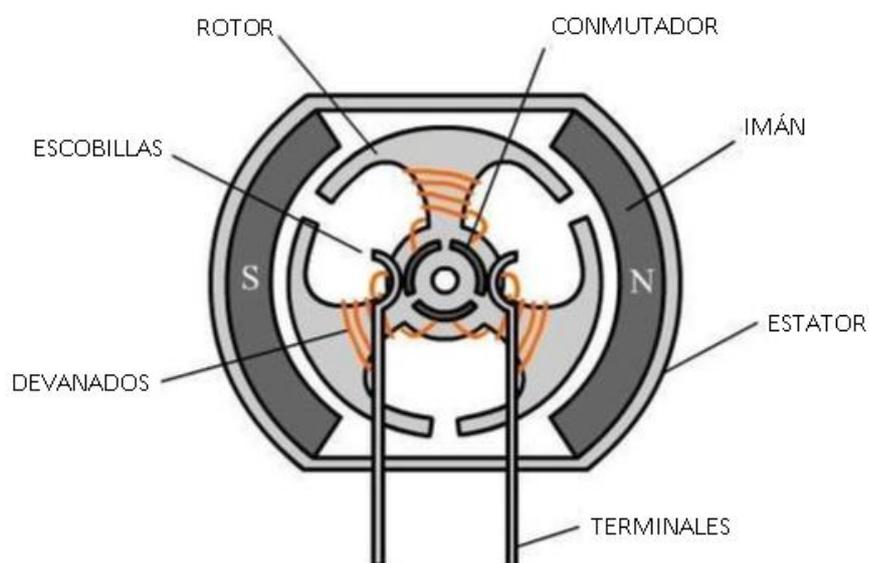


Figura 1.9 Partes de un motor de corriente continúa

Los motores DC se clasifican de la siguiente forma:

- Motores con estator bobinado
- Motores de imán permanente
- Motores sin escobillas o brushless

A continuación se describe el principio de funcionamiento y características únicamente de los motores de imán permanente que son los utilizados en este proyecto.

1.3.4.1 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE

Un motor de imán permanente se caracteriza porque tiene en el estator un conjunto de imanes que generan el campo magnético necesario para generar el movimiento, este campo magnético es constante en su magnitud y dirección.

Esta característica permite al motor cambiar la dirección de la rotación al invertir el voltaje de alimentación al rotor y al tener el campo magnético un valor constante la variación de la velocidad del motor se logra únicamente al cambiar el voltaje de alimentación.

Entre las características de estos motores se encuentran:

- Máximo Torque inicial
- Menor consumo que otros motores DC debido a que no se necesita alimentar el campo
- Relación directa entre el voltaje de alimentación y la velocidad de rotación del motor
- Velocidad máxima limitada por construcción

En la Figura 1.10 se muestra una curva característica [12] con la relación entre el torque y velocidad de un motor de imán permanente.

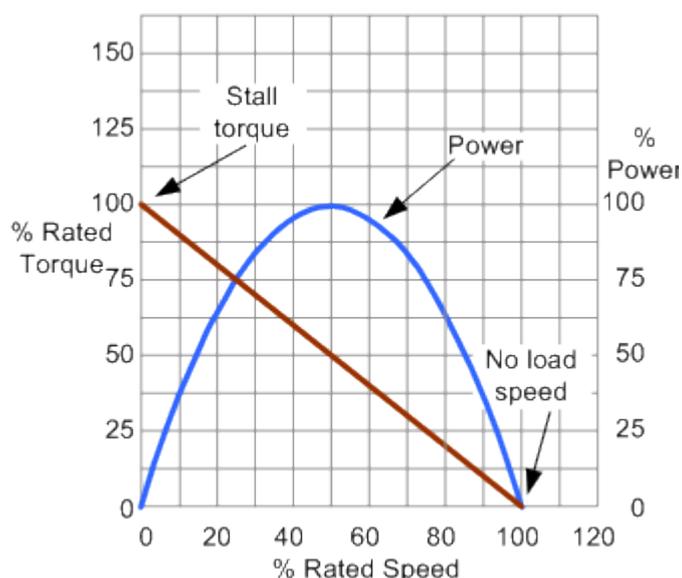


Figura 1.10 Curva característica de un motor de imán permanente

Estos motores son usados en la industria en aplicaciones donde es necesario un arranque suave y mantener una velocidad constante durante su operación como en:

- Ventiladores
- Agitadores
- Extrusores

1.3.4.2 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO

La modulación por ancho de pulso o PWM por sus siglas en inglés (Pulse Width Modulation) es una técnica que permite variar el voltaje a la entrada de una carga mediante la variación del ciclo de trabajo de la onda cuadrada con la que se alimenta la misma. La frecuencia con la cual se alimenta a la carga es alta normalmente por el orden de los kilohercios (kHz) por lo que la carga o el motor no se mueven y se detienen de acuerdo a la velocidad en la que se realizan los ciclos de encendido y apagado, la velocidad de funcionamiento varia ya que el voltaje de dc varia con la modulación.

Debido a que la velocidad de un motor de corriente continua se puede variar con el voltaje de entrada en un control PWM el voltaje de alimentación de la carga es proporcional al ciclo de trabajo y el voltaje de entrada.

En la Figura 1.11 [13] se observa 2 ciclos de trabajo uno con 60% y otro con 28% de ciclo de trabajo.

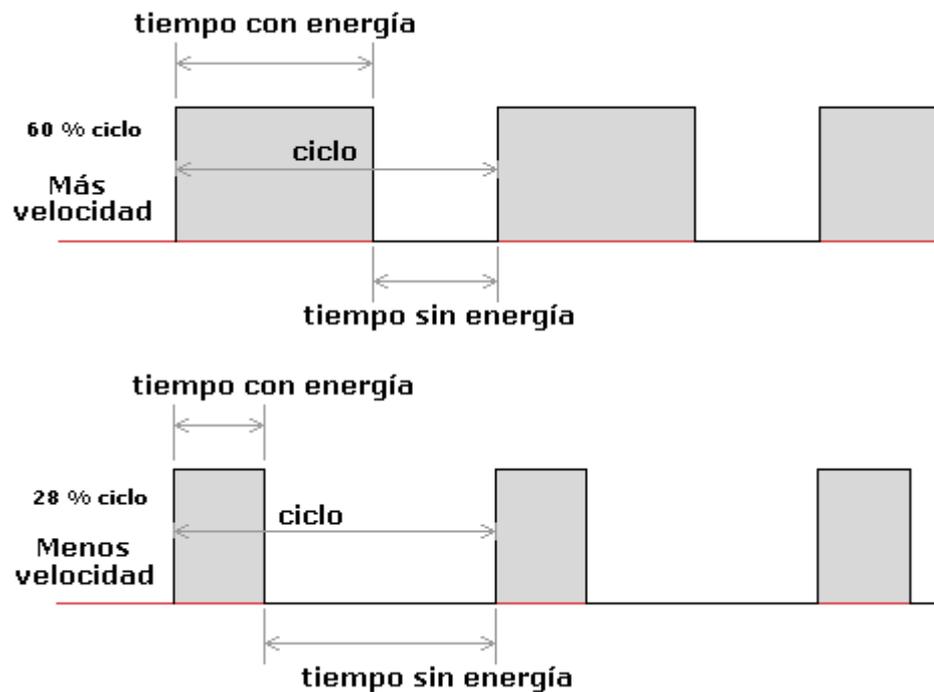


Figura 1.11 Modulación por ancho de pulso

1.3.5 CONTROLADOR PID

Un controlador PID se define como un control proporcional, integral y derivativo. El objetivo de este es obtener un valor deseado a partir de una premisa en el transcurso del tiempo.

Para implementar un control PID se necesitan por lo menos 3 elementos:

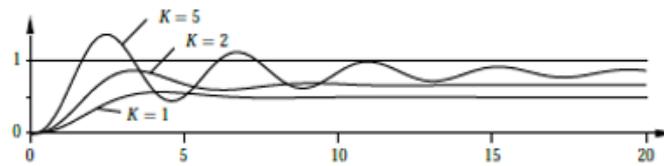
1. Un sensor que determine el estado del sistema (encoder, termopar, caudalímetro).
2. Un controlador, que modifique el funcionamiento del actuador (PLC, microcontrolador, procesador).
3. Un actuador, que varíe su funcionamiento para mantener el sistema dentro de los límites determinados. (Velocidad de un motor, temperatura de una resistencia, etc).

El controlador necesita de un bucle cerrado es decir tener realimentación del sistema a controlar. Con la realimentación proveniente del sensor se puede calcular el error del valor obtenido con el deseado, a partir de este error se calcula los 3 parámetros para intentar minimizar el error.

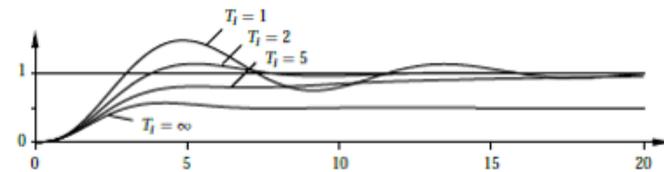
- **Acción Proporcional:** este parámetro fija un cambio proporcional al error del sistema. Se le suele llamar también ganancia.

- **Acción Integral:** brinda una respuesta proporcional a la integral del error del sistema, esta acción causa que el tiempo de establecimiento sea mayor.
- **Acción Derivativa:** proporciona una respuesta proporcional a la derivada del error mediante esta acción se controla las oscilaciones del sistema.

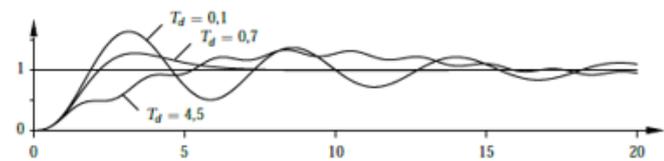
En Figura 1.12 adaptada de [14] se muestra la reacción de un sistema a cada una de las acciones descritas anteriormente.



a) Respuesta Escalón Controlador P



b) Respuesta Escalón Controlador PI



c) Respuesta Escalón Controlador PID

Figura 1.12 Respuestas a un escalón de distintos controladores

Los siguientes sistemas pueden implementar controles PID para su funcionamiento:

- Control de Temperatura (Refrigeradores , Calefactores , Aire Acondicionado)
- Control de Nivel de Tanques de líquidos
- Control de Presión
- Control de Velocidad

Un controlador PID se calibra con los parámetros necesarios para obtener una reacción rápida y sin oscilaciones e inmunidad a las perturbaciones del sistema que se pueden dar por variaciones de los parámetros de entrada y salida y por la naturaleza del mismo.

1.3.6 SISTEMA OPERATIVO UBUNTU

Ubuntu es un sistema operativo para computadores de escritorio, portátiles y servidores, está basado en el núcleo GNU/Linux y dispone de su propia interfaz gráfica de escritorio llamada Unity. Ubuntu está destinado a usuarios novatos e intermedios. Ubuntu se usa en este proyecto debido a que ROS está diseñado para correr sobre esta plataforma, ROS también puede ser instalado en otras plataformas como Debian, Arch Linux, OS X entre otros pero de forma experimental.

Entre las características de Ubuntu se encuentran:

- **Actualización constante:** Cada 6 meses se publica una nueva versión.
- **Soporte Prolongado:** Cada 2 años se publica una versión LTS (Long Term Support) por sus siglas en inglés que brinda soporte técnico y actualizaciones por un periodo de 5 años.
- **Software Libre:** Ubuntu incluye software libre como LibreOffice [15] que es un paquete de oficina que contiene procesador de texto, hoja de cálculos, editor de presentaciones y una aplicación para el desarrollo de dibujos y diagrama de flujos.

En la Figura 1.13 se muestra la herramienta RViz de ROS sobre el entorno Ubuntu.

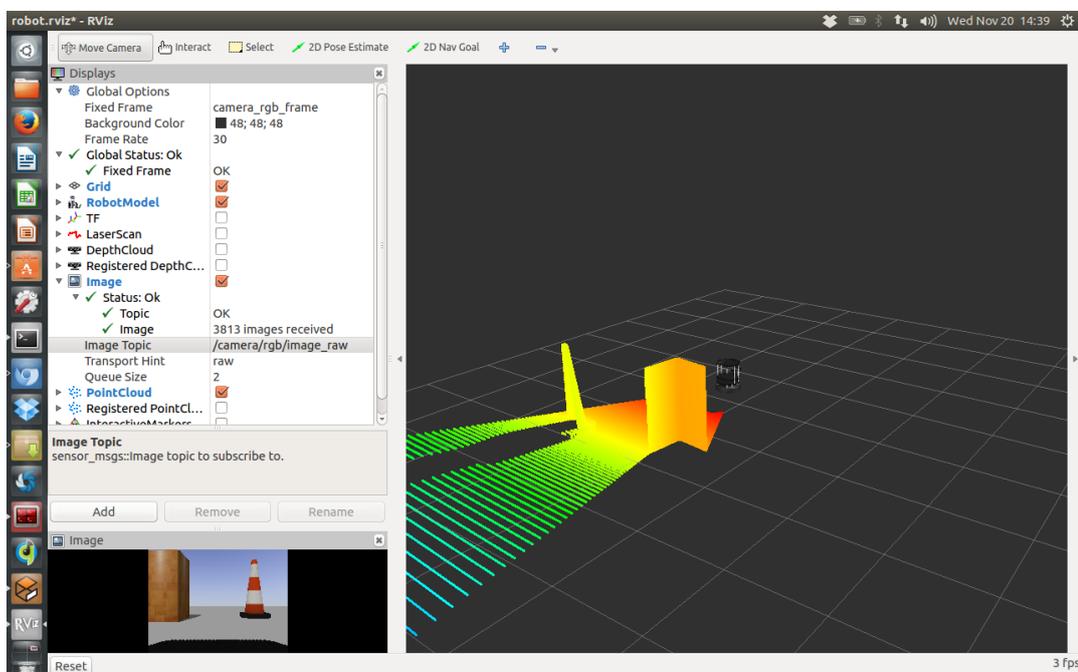


Figura 1.13 ROS en Ubuntu

1.4 ESTADO DEL ARTE DE PLATAFORMAS MÓVILES

En esta sección se investiga el campo de las plataformas móviles tele-operadas disponibles ya sean para investigación o con fines comerciales. Se obtiene información sobre las plataformas existentes para inferir las características necesarias para el desarrollo de la plataforma.

1.4.1 CLEARPATH ROBOTICS HUSKY

La compañía Clearpath Robotics ofrece entre sus robots para investigación el HUSKY, que es una plataforma móvil para exteriores con varias características que la hacen un referente en el campo.

Se puede apreciar en la Figura 1.14 [16] al robot HUSKY con equipamiento para la exploración de una superficie similar a la del planeta Marte.



Figura 1.14 HUSKY con equipamiento de exploración

Entre sus principales aplicaciones [16] se tiene las siguientes:

- Sistemas multi robots
- Tele operación
- Manipuladores autónomos o tele operados
- Navegación

El HUSKY soporta diferentes sistemas operativos y software para el control de la misma, entre estos software están:

- LABVIEW de National Instruments
- ROS

- C++
- Python

En la Tabla 1.2 se muestran las principales características mecánicas [16].

Tabla 1.2 Características Físicas del HUSKY

Alto	390 mm
Ancho	670 mm
Largo	990 mm
Altura Libre al Piso	130 mm
Peso	50 kg
Capacidad de Carga	75 kg
Velocidad Máxima	1 m/s
Diámetro Ruedas	330 mm (13 pulgadas)
Autonomía	3 Horas

1.4.2 MEGA BOT

El Mega BOT es una plataforma móvil de la compañía Inspector Bots, esta compañía se dedica exclusivamente a la fabricación y venta de plataforma robóticas móviles de diferentes tipos y características.

En el sitio web [17] se muestran las siguientes aplicaciones para sus robots:

- Vigilancia
- Inspección de desastres
- Inspección de sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado.
- Inspección de edificios en construcción
- Plantas Químicas
- Servicios de seguridad
- Control de Plagas

En la Tabla 1.3 se ha realizado una recopilación con los datos más relevantes del Mega BOT tomados de [17].

Tabla 1.3 Características Mega BOT

Alto	355.6 mm (14 pulgadas)
Ancho	660.4 mm (26 pulgadas)
Largo	787.4 mm (31 pulgadas)
Altura Libre al Piso	114.3 mm (4.5 pulgadas)
Peso	79.54 kg (175 libras)
Capacidad de Carga	68.18 kg (150 libras)
Velocidad Máxima	3.35 m/s (7.5 mph)
Diámetro Ruedas	355.6 mm(14 pulgadas)
Capacidad de Arrastre	907.18 kg(2000 libras)
Inclinación Máxima	30 Grados
Distancia entre ejes	431.8 mm(17 pulgadas)

Las plataformas de esta compañía son usadas ampliamente por empresas, universidades y laboratorios alrededor del mundo.

En la Figura 1.15 [17] se observa un Mega BOT listo para ser equipado.



Figura 1.15 Mega BOT en su configuración básica

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se obtiene un modelo con el cual se procede al diseño del proyecto a través de un proceso de análisis y selección de alternativas con lo que se tiene un modelo óptimo para empezar la etapa de diseño.

2.1 ESQUEMA Y FUNCIONAMIENTO

Se propone un esquema básico del proyecto en la Figura 2.1 con los elementos necesarios para el funcionamiento del proyecto.

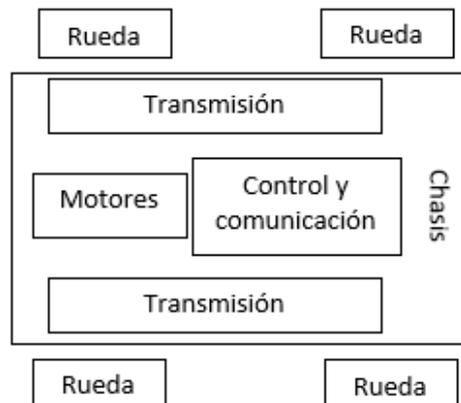


Figura 2.1 Esquema de la Plataforma Móvil

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de una plataforma de exteriores la cual es capaz de moverse a sí misma con todos sus elementos funcionales y a una cantidad de carga determinada a través de un ambiente exterior.

2.2 PROBLEMA

En el país se carece de plataformas móviles de exploración de exteriores.

2.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Mediante el uso de la función de calidad se van a definir las especificaciones técnicas para el diseño y construcción de la plataforma.

2.3.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto comprende el desarrollo de una plataforma para exteriores tele operada, esta plataforma tiene diferentes aplicaciones en base al equipo con el cual sea dotada debido a esto se adapta según las necesidades del usuario.

Mediante el análisis se obtiene las características necesarias para proceder con el diseño y construcción de la plataforma.

2.3.2 CASA DE LA CALIDAD

El desarrollo de la función de calidad QFD es un método globalizador cuyo objetivo principal es asegurar que en la definición de un producto o servicio se consideren las necesidades y requerimientos de los usuarios, a la vez constituye una herramienta para la planificación de la calidad durante el ciclo de vida. La Casa de la Calidad consiste en un proceso estructurado que permite traducir los requerimientos y deseos de los usuarios en requerimientos técnicos de ingeniería en cada fase del diseño y de fabricación.

2.3.3 VOZ DEL USUARIO

El usuario es la persona que utilizará la plataforma para exteriores y solicita que la plataforma tenga las siguientes características:

- Rápida
- Ágil
- Que pueda subir pendientes
- Que sea de fácil transporte
- Que pueda llevar carga
- Que sea de fácil manejo

- Que se pueda usar en diferentes terrenos
- Que tenga gran autonomía

2.3.4 VOZ DEL INGENIERO

El ingeniero para cumplir las necesidades del usuario o cliente define los siguientes parámetros técnicos para que la plataforma funcione según sus requerimientos.

- Velocidad Máxima: 3 km/h
- Inclinación Máxima: 30 grados
- Peso: 50 kg
- Dimensiones: 900 mm x 600 mm x 300 mm
- Capacidad baterías: 24V 15 Ah
- Tiempo de funcionamiento: 1 hora
- Tiempo de recarga: 1 hora
- Resistencia al entorno: IP14
- Distancia de funcionamiento: 250 m

2.3.5 IMPLEMENTACIÓN DE LA CASA DE LA CALIDAD

La Casa de la Calidad realizada a partir de la voz del usuario e ingeniero se muestra en Figura 2.2.

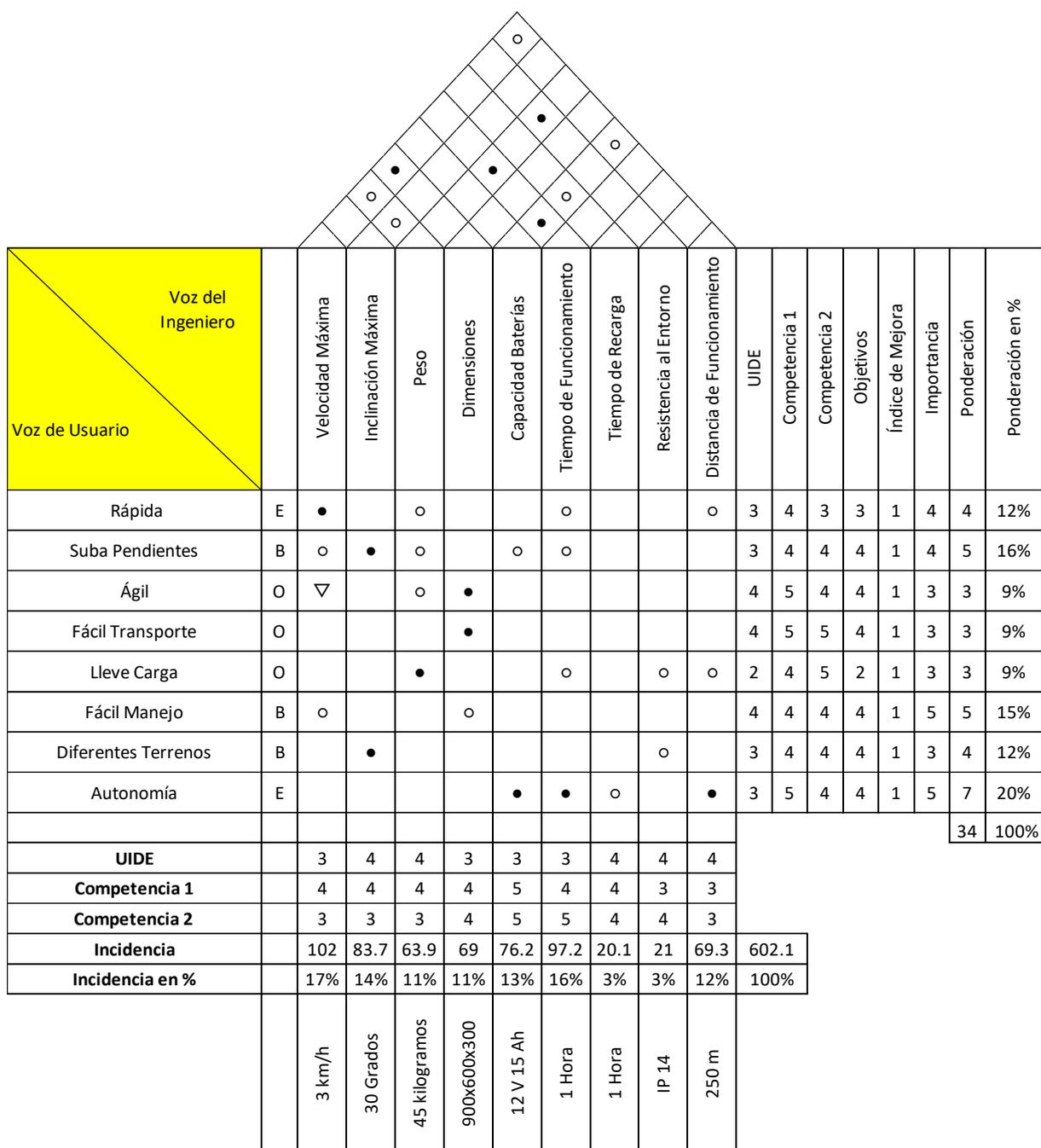


Figura 2.2 Casa de la calidad de la plataforma

2.4 DISEÑO CONCEPTUAL

En esta etapa del diseño se parte de las especificaciones del producto, se proponen distintas alternativas de principio y solución las cuales después de ser evaluadas generan soluciones para cada componente del producto.

2.4.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

En esta etapa se analiza el funcionamiento de la máquina y de cada uno de sus módulos y su funcionalidad, para así obtener el diseño final de la máquina.

2.4.2 DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES

Se definen los módulos en distintos niveles desde su forma más básica hasta definir los componentes necesarios para el funcionamiento de la máquina.

2.4.2.1 Nivel 0

En el nivel 0 se debe definir la máquina en su funcionalidad más simple, se insertan materiales, energía y señales y se obtiene la máquina con el funcionamiento deseado como se muestra en Figura 2.3.

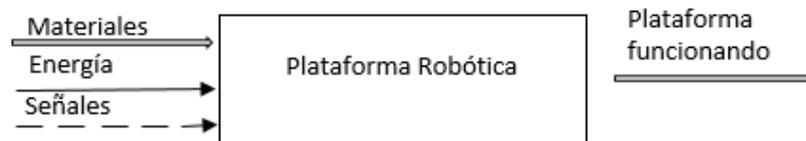


Figura 2.3 Módulo Funcional en el Nivel 0

2.4.2.2 Nivel 1

En el nivel 1 se incluyen mayores detalles y se definen los módulos para la estructura modular de la máquina.

Se definen 3 módulos:

- Módulo de Control
- Módulo Mecánico
- Módulo Eléctrico

Estos módulos se muestran en Figura 2.4.

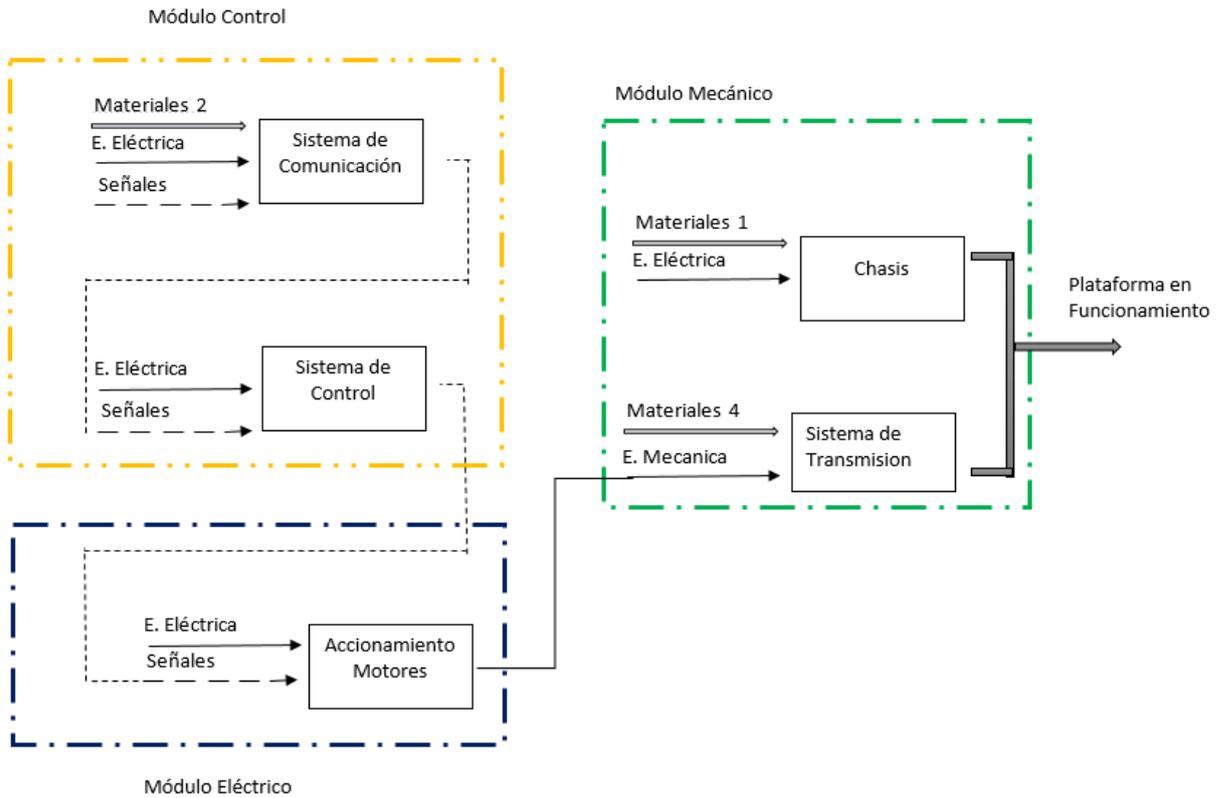


Figura 2.4 Módulos Funcionales de la plataforma en nivel 1

2.4.3 MÓDULO DE CONTROL

El módulo de control tiene las siguientes funciones:

- Control del movimiento de la plataforma.
- Comunicación de la plataforma con la estación base.

2.4.4 MÓDULO ELÉCTRICO

El módulo eléctrico es el encargado del manejo de la electrónica de potencia de la plataforma. En este módulo se incluye el accionamiento de los motores así como la distribución de la energía eléctrica para los distintos componentes de la plataforma.

2.4.5 MÓDULO MECÁNICO

El módulo mecánico se compone de las siguientes partes:

- Chasis
- Sistemas de Transmisión de potencia
- Tren motriz

2.5 ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Se proponen soluciones para cada módulo de la plataforma obtenido previamente en el análisis funcional, después se analizan las posibles soluciones para obtener un diseño óptimo.

En la Tabla 2.1 se presentan las posibles soluciones para el módulo de control.

Tabla 2.1 Soluciones para el Módulo de Control

Funciones	Soluciones Módulo de Control
Visualización de datos recibidos de la plataforma y envío de comandos	
Procesamiento de datos	
Comunicación entre la estación base y la plataforma	
Recopilación de datos de la plataforma y control	

Se proponen 4 soluciones para el módulo de control las cuales se detallan a continuación:

Opción A

- Equipo de visualización: Computadora
- Software: Matlab
- Equipo de comunicación: Bluetooth
- Controlador Plataforma: Microcontrolador

Opción B

- Equipo de visualización: Computadora
- Software: ROS
- Equipo de comunicación: Módulos de Radio Frecuencia
- Controlador Plataforma: Arduino

Opción C

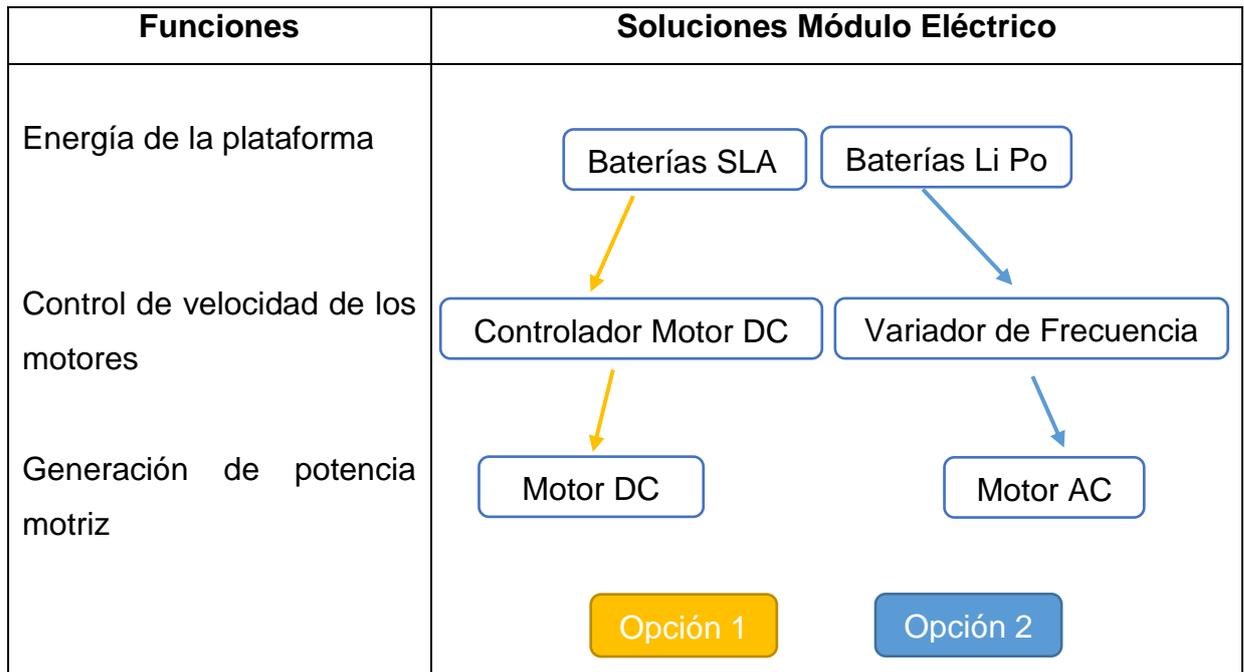
- Equipo de visualización: Computadora
- Software: Labview
- Equipo de comunicación: WiFi
- Controlador Plataforma: PLC

Opción D

- Equipo de visualización: Tablet o Smartphone
- Software: Aplicación Nativa
- Equipo de comunicación: WiFi
- Controlador Plataforma: Microcontrolador

Para el modulo eléctrico se proponen las siguientes soluciones en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Soluciones para el Módulo Eléctrico



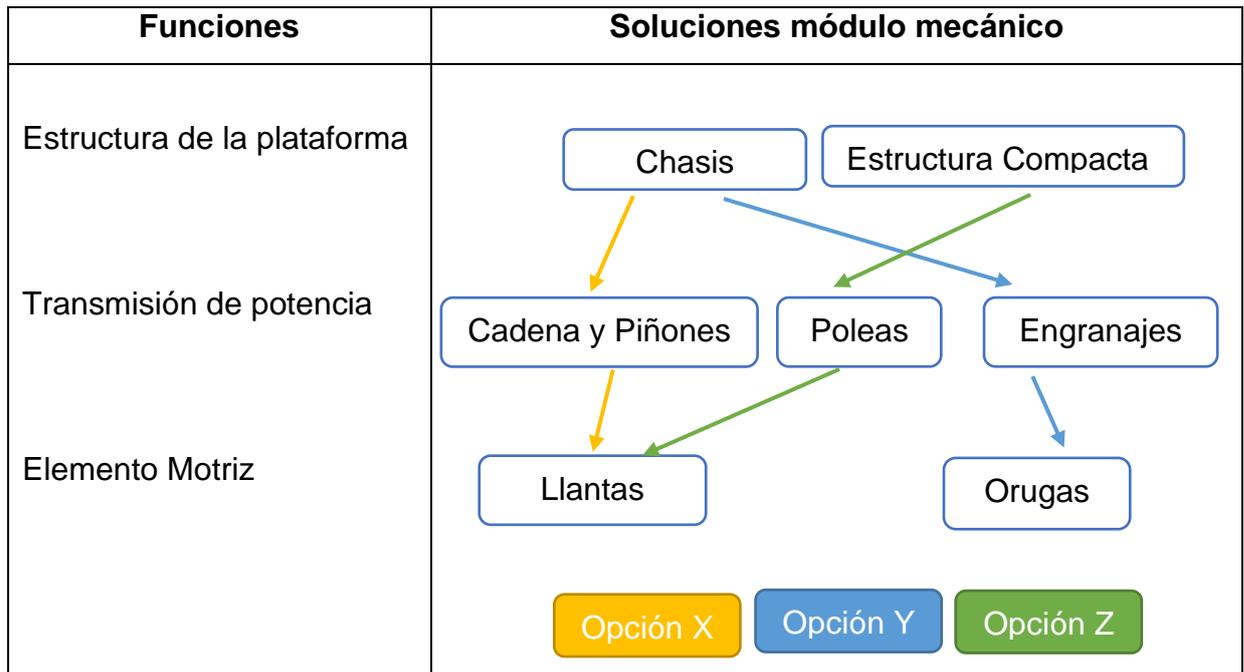
Se obtienen 2 soluciones para la generación de la potencia motriz para la plataforma.

La opción 1 consiste en usar un motor DC con un controlador de motores y alimentación a través de baterías SLA.

La opción 2 consiste en usar un motor AC con un variador de frecuencia para el control de los motores AC y un inversor para obtener corriente alterna a partir de un banco de baterías LiPo.

En el módulo mecánico se proponen las soluciones mostradas en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Soluciones para el Módulo Mecánico



Para el módulo mecánico se obtienen 3 soluciones las cuales se detallan a continuación:

Opción X

- Estructura: Chasis y Carrocería
- Transmisión de potencia: Cadena y Piñones
- Elemento Motriz: Llantas

Opción Y

- Estructura: Compacta
- Transmisión de potencia: Poleas y Bandas
- Elemento Motriz: Llantas

Opción Z

- Estructura: Chasis y Carrocería
- Transmisión de potencia: Engranajes
- Elemento Motriz: Orugas

2.5.1 PROCESO DE EVALUACIÓN DE SOLUCIONES

En esta sección se realiza una evaluación mediante criterios ponderados que muestran una visualización tabular de los resultados.

Se realiza la ponderación mediante los criterios de la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Valores de Ponderación

Valor	Condición
1	Si el criterio o solución de la fila es superior que el de la columna
0.5	Si el criterio o solución de la fila es equivalente al de la columna
0	Si el criterio o solución de la fila es inferior al de la columna

2.5.1.1 Evaluación del módulo de control

Se obtienen 4 alternativas para la solución del módulo de control las cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Se propone los siguientes criterios para la selección de la solución en la Tabla 2.5

Tabla 2.5 Criterios de evaluación del Módulo de Control

Criterio	Descripción
Software	Versatilidad y adaptabilidad del software para la estación de control de la plataforma, compatibilidad con microcontroladores y protocolos de comunicación.
Alcance	La comunicación entre la estación de control y la plataforma debe tener un alcance dentro del rango de las especificaciones y ser compatible con una variedad de controladores y software.
Licencias	Se debe contar con las licencias tanto para el desarrollo de software en la estación de control como para la programación del microcontrolador o PLC seleccionado.
Soporte	Debe disponer de soporte e información en el software y hardware usado en la plataforma
Compatibilidad	Debe tener flexibilidad para la integración de la mayor cantidad de sensores para la recopilación de datos sobre el entorno.

A partir de los criterios detallados en la Tabla 2.5 se asigna la ponderación como se muestra en la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Ponderación de criterios Módulo de Control

	Software	Alcance	Licencias	Soporte	Compatibilidad	$\Sigma + 1$	Ponderación
Software		1	0.5	0.5	0.5	3.5	0.259
Alcance	0		1	0	1	3	0.222
Licencias	0.5	0		0.5	0.5	2.5	0.185
Soporte	0.5	0	0		0.5	2	0.148
Compatibilidad	0.5	0	0.5	0.5		2.5	0.185
						13.5	1

A partir de la ponderación de los criterios se evalúan las opciones entre sí para decidir la mejor opción para el módulo correspondiente.

A continuación en las Tablas 2.7 a 2.11 se presentan los pesos específicos para cada criterio:

Tabla 2.7 Peso específico para el criterio "Software"

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción A		1	0.5	1	3.5	0.35
Opción B	0		0	0.5	1.5	0.15
Opción C	0.5	1		1	3.5	0.35
Opción D	0	0.5	0		1.5	0.15
					10	1

Tabla 2.8 Peso específico criterio "Alcance"

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción A		0	0	0	1	0.10
Opción B	1		1	1	4	0.40
Opción C	1	0		0.5	2.5	0.25
Opción D	1	0	0.5		2.5	0.25
					10	1

Tabla 2.9 Peso específico para el criterio "Licencias"

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción A		0	0.5	0	1.5	0.15
Opción B	1		1	0.5	3.5	0.35
Opción C	0.5	0		0	1.5	0.15
Opción D	1	0.5	1		3.5	0.35
					10	1

Tabla 2.10 Peso específico para el criterio "Soporte"

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción A		1	0.5	1	3.5	0.35
Opción B	0		0	0.5	1.5	0.15
Opción C	0.5	1		1	3.5	0.35
Opción D	0	0.5	0		1.5	0.15
					10	1

Tabla 2.11 Peso específico para el criterio "Compatibilidad"

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción A		0	1	0.5	2.5	0.25
Opción B	1		1	1	4	0.4
Opción C	0	0		0	1	0.1
Opción D	0.5	0	1		2.5	0.25
					10	1

En la Tabla 2.12 se tiene el posicionamiento de las distintas soluciones, se reúne los pesos específicos de cada solución escalados por el criterio de ponderación resultado de la Tabla 2.6. Con este se obtiene la mejor solución en base a los criterios considerados previamente.

Tabla 2.12 Posicionamiento de la solución

	Software	Alcance	Licencias	Soporte	Compatibilidad	Sumatoria	Puesto
Opción A	0.091	0.022	0.028	0.052	0.046	0.239	Tercero
Opción B	0.039	0.089	0.065	0.022	0.074	0.289	Primero
Opción C	0.091	0.056	0.028	0.052	0.019	0.244	Segundo
Opción D	0.039	0.056	0.065	0.022	0.046	0.228	Cuarto

La opción B obtiene el mayor puntaje en la sumatoria de todos los criterios, se observa que en el criterio con más alta ponderación “Software” definido en la Tabla 2.5 tiene el mismo valor que las opciones A y C, por lo que la diferencia de los otros criterios hacen que la opción B sea la más adecuada para el proyecto.

La opción B consta de los siguientes elementos:

- Equipo de visualización y procesamiento: Computadora
- Software: ROS
- Equipo de comunicación: Módulos de Radio Frecuencia
- Controlador Plataforma: Arduino

2.5.1.2 Evaluación del Módulo Mecánico

Para evaluar las opciones del módulo mecánico mediante el método de criterios ponderados se generan criterios para la selección de la mejor opción para el proyecto. Los criterios específicos se muestran en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Criterios específicos para el Módulo Mecánico

Criterio	Descripción
Peso	El peso total de los elementos mecánicos deber ser el menor posible
Mantenimiento	Los elementos deben ser fáciles de reemplazar y su mantenimiento no deberá involucrar herramientas especiales.
Movilidad	La selección de elementos debe permitir la movilidad de la plataforma en distintos terrenos.
Costo	Los costos de adquisición, fabricación y adaptación de los distintos elementos

Se realiza la ponderación de los criterios de la Tabla 2.13 como se muestra en la Tabla 2.14 a partir de los criterios definidos en la Tabla 2.4.

La importancia de los criterios de acuerdo a los objetivos del proyecto se define en el siguiente orden:

Movilidad > Mantenimiento = Peso > Costo

Tabla 2.14 Ponderación de los criterios específicos del Módulo Mecánico

	Peso	Mantenimiento	Movilidad	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Peso		0.5	0	1	2.5	0.250
Mantenimiento	0.5		0	1	2.5	0.250
Movilidad	1	1		1	4	0.400
Costo	0	0	0		1	0.100
					10	1

A continuación en las Tablas 2.15 a 2.18 se muestra la evaluación de cada criterio específico del Módulo Mecánico con lo que se obtiene los pesos específicos.

Tabla 2.15 Peso específico criterio "Peso"

	Opción X	Opción Y	Opción Z	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción X		1	0	2	0.333
Opción Y	0		0	1	0.167
Opción Z	1	1		3	0.500
				6	1

Tabla 2.16 Peso específico criterio "Mantenimiento"

	Opción X	Opción Y	Opción Z	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción X		1	0.5	2.5	0.417
Opción Y	0		0	1	0.167
Opción Z	0.5	1		2.5	0.417
				6	1

Tabla 2.17 Peso específico criterio "Movilidad"

	Opción X	Opción Y	Opción Z	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción X		0	1	2	0.333
Opción Y	1		1	3	0.500
Opción Z	0	0		1	0.167
				6	1

Tabla 2.18 Peso específico criterio "Costo"

	Opción X	Opción Y	Opción Z	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opción X		1	0	2	0.333
Opción Y	0		0	1	0.167
Opción Z	1	1		3	0.500
				6	1

Los pesos específicos de cada criterio se reúnen en la Tabla 2.19 con su respectivo factor de ponderación obtenido previamente en la Tabla 2.14.

Tabla 2.19 Posicionamiento solución Módulo Mecánico

	Peso	Mantenimiento	Movilidad	Costo	Sumatoria	Posición
Opción X	0.083	0.104	0.133	0.033	0.354	Primera
Opción Y	0.042	0.042	0.200	0.017	0.300	Tercera
Opción Z	0.125	0.104	0.067	0.050	0.346	Segunda

Se obtiene después de la evaluación de los criterios específicos que la Opción X tiene el mayor puntaje para el Módulo Mecánico, esta solución usa los siguientes elementos:

- Estructura: Chasis y Carrocería
- Transmisión de potencia: Cadena y Piñones
- Elemento Motriz: Llantas

2.5.1.3 Evaluación del Módulo Eléctrico

En el módulo eléctrico se tienen 2 opciones para la generación del movimiento en la plataforma se elige la Opción 1 que consiste en:

- Motores DC
- Controlador de Motores
- Baterías SLA

Se elige esta opción sobre la Opción 2 por las siguientes razones:

- Se usan baterías como fuente de energía, por lo que la eficiencia de la conversión de energía DC a AC afecta la autonomía de la plataforma.
- Los motores AC necesitan generalmente de voltajes mayores a los de DC en el rango de aplicación para la plataforma.
- El control de motores AC implica un mayor desarrollo de circuitos y componentes tanto para el control de la velocidad de giro y la dirección del movimiento.

Los motores AC se usan en la industria en vehículos eléctricos de pasajeros, debido a la escala de estos automotores los bancos de baterías de alto voltaje hacen viable la utilización de estos motores con eficiencia.

CAPÍTULO III

El diseño de la plataforma se divide en 2 secciones en las cuales se define el diseño y selección de todos los componentes necesarios para la construcción de la plataforma.

El diseño tiene las siguientes secciones:

- Diseño Mecánico
- Diseño Electrónico, Control y Comunicaciones.

3.1 DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico de la plataforma comprende el diseño y selección de los siguientes componentes:

- Chasis de la plataforma
- Dimensionamiento de motores
- Ejes de transmisión
- Aros y llantas
- Cadena y piñones
- Rodamientos
- Carrocería de la Plataforma

El proceso de diseño será validado mediante software de diseño mecánico.

Se ha establecido el siguiente proceso mostrado en Figura 3.1 para el diseño, dimensionamiento y selección de los elementos mecánicos de la plataforma.



Figura 3.1 Proceso de diseño y selección de elementos mecánicos

3.1.1 PESO DE LA PLATAFORMA

Para el desarrollo de los elementos mecánicos de la plataforma se realiza una estimación del peso total de la plataforma previa a la etapa de diseño de los elementos. La Tabla 3.1 muestra esta información.

Tabla 3.1 Peso estimado de la plataforma

Elemento	Peso Unitario (kg)	Cantidad	Peso Total (kg)
Ejes	1	4	4
Llanta y Aro	2.5	4	10
Batería	2	4	8
Piñón	1	6	6
Cadena	0.5	2	1
Chumacera	0.5	8	4
Motor con caja	6	2	12
Varios (Ensamblaje)	1	1	1
Electrónicos	2	1	2
Chasis	5	1	5
Carrocería	12	1	12
		Total	65

3.1.2 DIMENSIONAMIENTO DE MOTORES

Para el dimensionamiento de motores de la plataforma se debe tener en cuenta las fuerzas que actúan sobre la misma así como los requerimientos técnicos. Entre las fuerzas que actúan sobre la plataforma que se tienen en consideración para el dimensionamiento están:

- **Peso:** Para desplazarse la plataforma debe de ser capaz de desplazar su masa en caso de que no esté totalmente perpendicular con la horizontal.
- **Resistencia a la rodadura:** Las llantas de la plataforma al estar en contacto con el suelo generan una resistencia a la rodadura la cual es proporcional al peso que transmiten las llantas al suelo.

Esta resistencia es el resultado de varios elementos como el material del neumático, la presión, la velocidad, la construcción y el terreno con el cual entra en contacto. Existe un coeficiente de la resistencia a la rodadura para distintos suelos, en la Tabla 3.2 adaptada de [18] se muestra los coeficientes para algunos terrenos.

Tabla 3.2 Coeficiente de Resistencia a la rodadura para distintos terrenos

Superficie de Contacto	Coeficiente de Resistencia a la rodadura
Concreto o Asfalto	0.013
Grava Apisonada	0.02
Tarmac	0.025
Camino sin Pavimentar	0.05
Césped, Tierra y Arena	0.1-0.35

Previamente en el estado del arte se analizaron las diferentes plataformas de exteriores disponibles y se obtuvieron las características más importantes, después del análisis mediante la casa de la calidad se obtuvieron las siguientes características técnicas que debe cumplir la plataforma las mismas se detallan a continuación.

- Velocidad Máxima: 3 km/h
- Inclinación Máxima: 30 grados
- Peso de la carga: 50 kg
- Dimensiones: 900 mm x 600 mm x 300 mm
- Capacidad baterías: 24V 15 Ah
- Tiempo de funcionamiento: 1 hora
- Tiempo de recarga: 1 hora
- Resistencia al entorno: IP14
- Distancia de funcionamiento: 250 m

3.1.2.1 Velocidad del Motor

La Velocidad del Motor determina la velocidad de desplazamiento de la plataforma para obtener la velocidad máxima deseada de 3 km/h se debe obtener la velocidad angular del motor a usar.

Para el cálculo se usa los siguientes datos:

- **Radio de la rueda:** Se usa el radio de la rueda para realizar la transformación de la velocidad lineal a rotacional.
Se usa una rueda de 13 pulgadas de diámetro.
- **Velocidad lineal:** Es la velocidad deseada. 3 km/h

Se obtiene la velocidad angular mediante la ecuación (1).

$$V = w \cdot R \quad (1)$$

En donde V es la velocidad lineal en m/s, w es la velocidad angular en radianes/s y R es el radio de la rueda en m. La velocidad lineal de 3 km/h es equivalente a 0.8333 m/s en el sistema internacional y el radio de la rueda de 13 pulgadas de diámetro equivale a 0.1651 m.

Reemplazando en la ecuación (1) se obtiene:

$$w = 5.047 \text{ Rad/s}$$

$$w = 48.19 \text{ RPM}$$

El motor debe tener una velocidad de al menos 48.19 RPM con carga para desplazar la plataforma a una velocidad de 3 km/h.

3.1.2.2 Potencia del Motor

La potencia del motor se calcula mediante la ecuación (2).

$$P = M \cdot w \quad (2)$$

En donde P es la potencia expresada en Watts, M el torque expresado en N-m y w es la velocidad angular.

En la Figura 3.2 se muestran las fuerzas que actúan sobre la plataforma, donde F es la fuerza de arrastre o empuje necesaria para el movimiento de la plataforma y F_r es la fuerza de resistencia a la rodadura. En este caso la fuerza W al ser perpendicular a la fuerza de empuje F no afecta la magnitud de la misma.

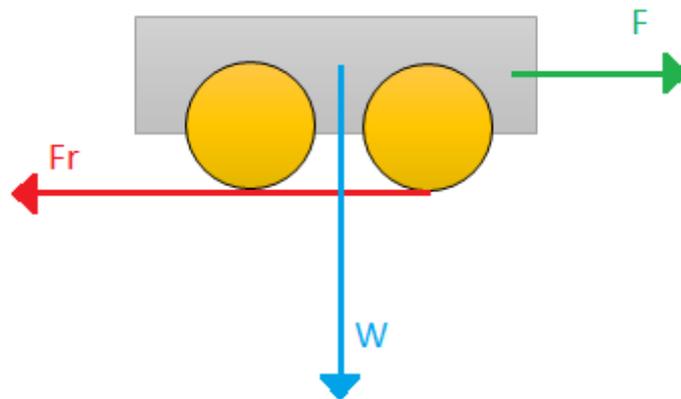


Figura 3.2 Fuerzas Aplicadas sobre la plataforma

Para el cálculo de la fuerza necesaria para mover la plataforma se calcula el peso de la misma con carga mediante la ecuación (3).

$$W = m \cdot g \quad (3)$$

Donde W es el peso, m es la masa del objeto y g es la aceleración de la gravedad que incide sobre el objeto.

La plataforma tiene una masa estimada de 65 kg y la carga deseada es de 50 kg, por lo tanto la masa de la plataforma con carga es de 115 kg. La aceleración de la gravedad es de 9.8 m/s^2 , reemplazando en la ecuación (3) se obtiene el peso.

$$W = 1127 \text{ N}$$

La fuerza de resistencia a la rodadura se define por la ecuación (4)

$$Fr = Ci \cdot W \quad (4)$$

Donde Fr es la fuerza de resistencia a la rodadura, Ci es el coeficiente de rodadura y W es el peso que actúa sobre las ruedas.

La plataforma debe actuar sobre exteriores por lo que se considera el coeficiente de rodadura para terrenos exteriores (césped, tierra, arena) de 0.35 de la Tabla 3.2 y con el peso de 1127 N reemplazando en la ecuación (4) se obtiene Fr .

$$Fr = 394.45 \text{ N}$$

Esta fuerza es la mínima que se debe aplicar para desplazar la plataforma.

Para encontrar el torque necesario de los motores se usa la ecuación (5).

$$T = F \cdot R \quad (5)$$

Donde T es el torque, F la fuerza y R el radio de la palanca.

Con los datos de F de 394.45 N y R de 0.1651 m, reemplazando en la ecuación (5) se encuentra el torque necesario de los motores para el desplazamiento de la plataforma.

$$T = 65.12 \text{ Nm}$$

Debido a que se usan 2 motores el torque se divide para 2.

Con los datos de T de 32.56 Nm y w de 5.047 Rad/s reemplazando en la ecuación (2) se encuentra la potencia necesaria de los motores.

$$P = 164.33 \text{ Watts}$$

Los motores seleccionados deben tener las características mostradas en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Características del Motor

Potencia	165 Watts
Torque	35.56 Nm
Velocidad	48.19 RPM

3.1.2.3 Características motores

De la sección 3.1.2.2 se obtiene las características necesarias de los motores a usar en la plataforma.

En el proyecto se utilizan motores de sillas de ruedas con caja reductora incluida, las curvas características del motor se muestran en la Figura 3.3 del Anexo 1.

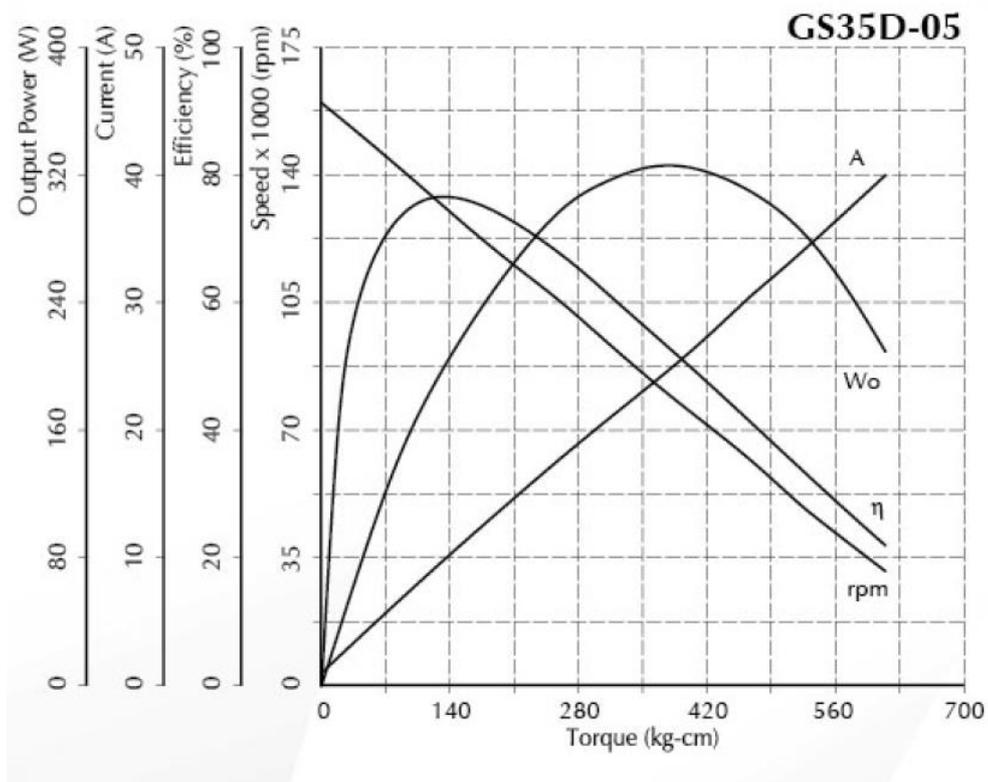


Figura 3.3 Curvas características de los motores de la plataforma

Las características más relevantes de los motores se presentan en la Tabla 3.4 adaptada del Anexo 1.

Tabla 3.4 Características motores plataforma

Voltaje Nominal	24 V
Radio de Engranajes	17.75:1
Velocidad sin carga	160 RPM
Velocidad con carga	131 RPM
Máximo Torque	39 N-m
Corriente Máxima	26 A
Potencia	624 W

3.1.3 SELECCIÓN DE CADENA y PIÑONES PARA LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA

En la plataforma se usa un sistema de cadena y piñones para la transmisión de potencia entre el motor y las ruedas a través de los ejes de transmisión.

Para la selección de cadena se usa la guía de selección Renold Jeffrey para cadenas de rodillos del Anexo 2, la guía detalla los parámetros necesarios para la selección de cadena entre los que se encuentran.

- Potencia a Transmitir
- Fuente de Movimiento
- Tipo de Movimiento
- Velocidad de Transmisión
- Relación de Transmisión

Se determina el tipo de movimiento de la plataforma asemejándolo a un Remolcador de Autos debido a que el movimiento no es constante, y tiene periodos con y sin movimiento. Del Anexo 2 se deduce que la plataforma tiene un tipo de movimiento *moderado*.

La potencia a transmitir se basa en la potencia máxima que desarrolla el motor eléctrico la cual se encuentra con la ecuación (6).

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

En donde P es la potencia, V el voltaje de operación e I la corriente máxima. Con los datos de la Tabla 3.4 se obtiene mediante reemplazo en la ecuación (6).

$$P = 624 \text{ Watts}$$

Para la selección de cadenas se debe transformar la potencia a caballos de fuerza.

$$P = 0.84 \text{ HP}$$

Esta potencia se debe escalar con el factor de servicio, este factor es determinado por el tipo de motor usado y la naturaleza del movimiento a transmitir el factor de servicio se obtiene mediante la Tabla 3.5 adaptada del Anexo 2.

Tabla 3.5 Factor de Servicio para Cadenas de Rodillos

Tipo de Carga	Tipo de Motor		
	Combustión Interna con transmisión Hidráulica	Motor Eléctrico o Turbina	Combustión interna con transmisión Mecánica
Uniforme	1	1	1.2
Moderada	1.2	1.3	1.4
Pesada	1.4	1.5	1.7

Se obtiene un factor de servicio de **1.3** debido a la carga moderada y el motor eléctrico utilizado.

Según el Anexo 2 la potencia de diseño se obtiene con la ecuación (7).

$$\text{Potencia de Diseño} = \text{Factor de Servicio} \cdot \text{Potencia Motor} \quad (7)$$

Con el reemplazo de los datos obtenidos previamente se encuentra la potencia de diseño.

$$\text{Potencia de Diseño} = 1.09 \text{ HP}$$

No existe la necesidad de reducción de velocidad del motor a las ruedas por lo que se utiliza una relación de transmisión de 1:1.

Con la potencia de diseño calculada previamente y la velocidad del motor obtenida de la Tabla 3.4 de 131 RPM, se selecciona la cadena mediante la intersección de estos 2 elementos en la Figura 3.4 obtenida del Anexo 2:

- **Numero de Cadena:** ANSI 40
- **Numero de Hileras:** 1

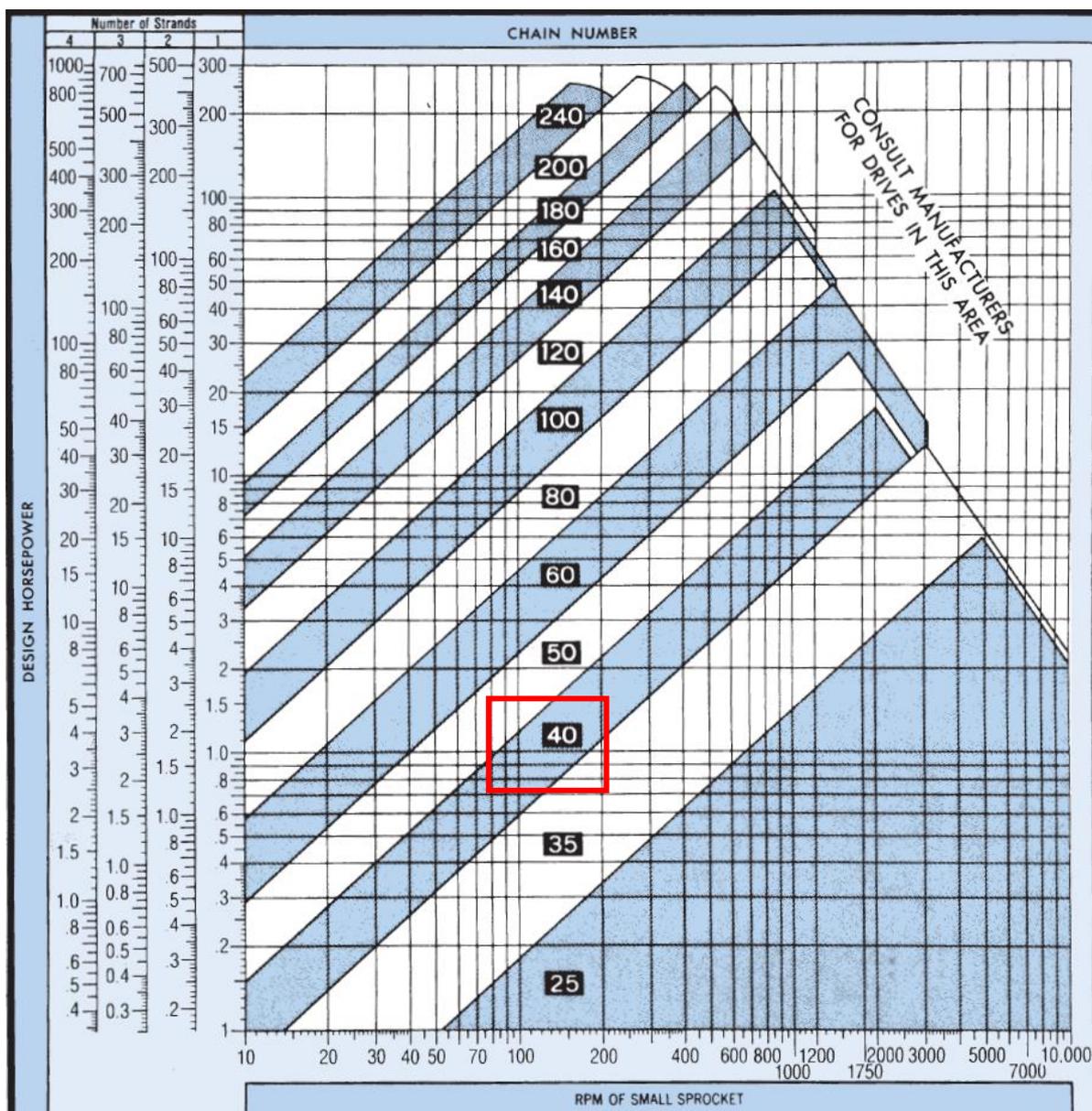


Figura 3.4 Cuadro Velocidad vs Potencia cadenas de rodillos

Mediante la selección de la cadena a utilizar se determina el número de dientes de los piñones.

Esto se realiza con los datos de potencia de diseño, velocidad del piñón, número de cadena y número de hileras de la misma, con estos datos:

- Potencia de Diseño: 1.09 HP
- Cadena: ANSI 40 de 1 hilera
- Velocidad Piñón: 131 RPM

De la Figura 3.5 obtenida del Anexo 3 se selecciona un piñón de al menos 24 dientes y mientras la velocidad máxima se mantenga por debajo de los 100 RPM se puede usar una lubricación manual o por goteo.

40 Horsepower Ratings – Single-Strand Roller Chain No. 40																								
No. of Teeth	Maximum Speed-Small Sprocket (rpm)																							
	10	25	50	100	180	200	300	500	700	900	1000	1200	1400	1600	1800	2100	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000
11	0.06	0.14	0.27	0.52	0.91	1.00	1.48	2.42	3.34	4.25	4.70	5.60	6.49	5.57	4.66	3.70	2.85	2.17	1.72	1.41	1.01	0.77	0.61	0.50
12	0.06	0.15	0.29	0.56	0.99	1.09	1.61	2.64	3.64	4.64	5.13	6.11	7.09	6.34	5.31	4.22	3.25	2.47	1.96	1.60	1.15	0.87	0.69	0.57
13	0.07	0.16	0.31	0.61	1.07	1.19	1.75	2.86	3.95	5.02	5.56	6.62	7.68	7.15	5.99	4.76	3.66	2.79	2.21	1.81	1.29	0.98	0.78	
14	0.07	0.17	0.34	0.66	1.15	1.28	1.88	3.08	4.25	5.41	5.98	7.13	8.27	7.99	6.70	5.31	4.09	3.11	2.47	2.02	1.45	1.10	0.87	
15	0.08	0.19	0.36	0.70	1.24	1.37	2.02	3.30	4.55	5.80	6.41	7.64	8.86	8.86	7.43	5.89	4.54	3.45	2.74	2.24	1.60	1.22	0.97	
16	0.08	0.20	0.39	0.75	1.32	1.46	2.15	3.52	4.86	6.18	6.84	8.15	9.45	9.76	8.18	6.49	5.00	3.80	3.02	2.47	1.77	1.34		
17	0.09	0.21	0.41	0.80	1.40	1.55	2.29	3.74	5.16	6.57	7.27	8.66	10.04	10.69	8.96	7.11	5.48	4.17	3.31	2.71	1.94	1.47		
18	0.09	0.22	0.43	0.84	1.48	1.64	2.42	3.96	5.46	6.95	7.69	9.17	10.63	11.65	9.76	7.75	5.97	4.54	3.60	2.95	2.11	1.60		
19	0.10	0.24	0.46	0.89	1.57	1.73	2.56	4.18	5.77	7.34	8.12	9.68	11.22	12.64	10.59	8.40	6.47	4.92	3.91	3.20	2.29	1.60		
20	0.10	0.25	0.48	0.94	1.65	1.82	2.69	4.39	6.07	7.73	8.55	10.18	11.81	13.42	11.44	9.07	6.99	5.31	4.22	3.45	2.47			
21	0.11	0.26	0.51	0.98	1.73	1.91	2.83	4.61	6.37	8.11	8.98	10.69	12.40	14.10	12.30	9.76	7.52	5.72	4.54	3.71	2.66			
22	0.11	0.27	0.53	1.03	1.81	2.01	2.96	4.83	6.68	8.50	9.40	11.20	12.99	14.77	13.19	10.47	8.06	6.13	4.87	3.98	2.85			
23	0.12	0.28	0.55	1.08	1.90	2.10	3.10	5.05	6.98	8.89	9.83	11.71	13.58	15.44	14.10	11.19	8.62	6.55	5.20	4.26	3.05			
24	0.12	0.30	0.58	1.12	1.98	2.19	3.23	5.27	7.28	9.27	10.26	12.22	14.17	16.11	15.03	11.93	9.18	6.99	5.54	4.54	0.87			
25	0.13	0.31	0.60	1.17	2.06	2.28	3.36	5.49	7.59	9.66	10.69	12.73	14.76	16.78	15.98	12.68	9.76	7.43	5.89	4.82				
26	0.13	0.32	0.63	1.22	2.14	2.37	3.50	5.71	7.89	10.04	11.11	13.24	15.35	17.45	16.95	13.45	10.36	7.88	6.25	5.12				
28	0.14	0.35	0.67	1.31	2.31	2.55	3.77	6.15	8.50	10.82	11.97	14.26	16.53	18.79	18.94	15.03	11.57	8.80	6.99	5.72				
30	0.15	0.37	0.72	1.41	2.47	2.74	4.04	6.59	9.11	11.59	12.82	15.28	17.71	20.14	21.01	16.67	12.84	9.76	7.75	6.34				
32	0.16	0.40	0.77	1.50	2.64	2.92	4.31	7.03	9.71	12.36	13.68	16.30	18.89	21.48	23.14	18.37	14.14	10.76	8.54	1.41				
35	0.18	0.43	0.84	1.64	2.88	3.19	4.71	7.69	10.62	13.52	14.96	17.82	20.67	23.49	26.30	21.01	16.17	12.30	9.76					
40	0.21	0.50	0.96	1.87	3.30	3.65	5.38	8.79	12.14	15.45	17.10	20.37	23.62	26.85	30.06	25.67	19.76	15.03						
45	0.23	0.56	1.08	2.11	3.71	4.10	6.06	9.89	13.66	17.39	19.24	22.92	26.57	30.20	33.82	30.63	23.58	15.53						

Type A
Type B
Type C

Type A: Manual or Drip Lubrication • Type B: Bath or Disc Lubrication • Type C: Oil Stream Lubrication

Multiple-Strand Factors					
Number of Strands	2	3	4	5	6
Factor	1.7	2.5	3.3	3.9	4.6

Figura 3.5 Potencia para piñones ANSI 40

3.1.4 DISEÑO DE LOS EJES DE TRANSMISIÓN

Para el diseño de los ejes de transmisión se toma el peso total estimado en la Tabla 3.1 y se añade la carga máxima estimado de la plataforma.

En el eje están presentes los siguientes esfuerzos.

- **Torsión:** Los ejes transmiten el movimiento de los motores hacia las ruedas por lo que tiene una torsión máxima en el caso que las ruedas no puedan girar. Este esfuerzo es el Torque Máximo que puede producir el motor multiplicado por el factor de eficiencia de la transmisión hacia el eje.
- **Flexión:** La flexión en el eje se produce debido a que el eje transmite al piso el peso parcial de la plataforma y la transmisión de potencia mediante la cadena genera una fuerza sobre el eje proporcional al torque de los motores y los piñones montados sobre el eje en dirección del mismo.

Para el diseño del eje se analiza el mismo por secciones, cada sección se somete a diferentes esfuerzos debido a las diferentes fuerzas que actúan sobre el eje. Mediante este método se encuentra el diámetro mínimo del eje para sus secciones críticas.

Se han definido 6 secciones como se muestra en la Figura 3.6, en esta figura se muestran las fuerzas aplicadas en el eje y sus apoyos en los que se generan las reacciones correspondientes.

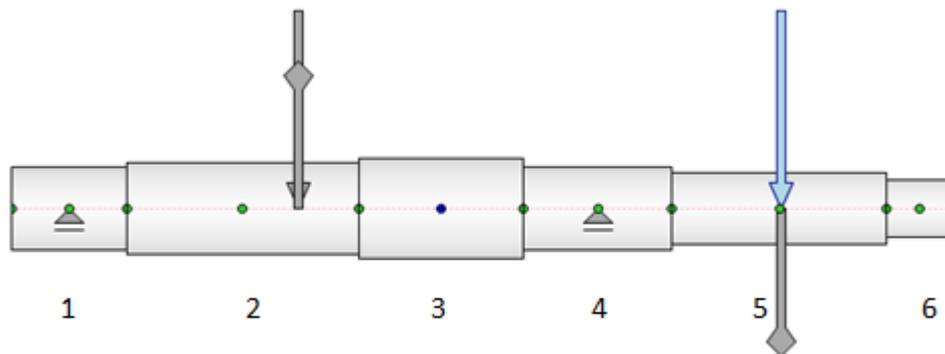


Figura 3.6 Secciones Eje de Transmisión

- Sección 1:**
 En esta sección se monta un rodamiento para el soporte del eje en el chasis, el largo de la sección debe ser suficiente para tener contacto total con el rodamiento seleccionado.
- Sección 2:**
 Esta sección recibe la potencia del motor a través de un piñón montado en el eje con una chaveta y un anillo de retención para asegurar que el piñón no tenga movimiento lateral ni rotacional sobre el eje.
- Sección 3:**
 Esta sección no soporta ninguna carga directamente pero proporciona apoyo lateral para el piñón de la sección 2 y el rodamiento de la sección 4.
- Sección 4:**
 En esta sección igual que la primera se monta un rodamiento para la fijación del eje al chasis.

- **Sección 5:**

La rueda se monta sobre esta sección transfiriendo el peso de la plataforma al piso y una chaveta transmite la potencia del motor a la rueda a través del eje.

- **Sección 6:**

En esta parte del eje se genera una rosca para la fijación de la rueda al eje mediante una tuerca.

En la Figura 3.7 se muestra el eje con sus diferentes secciones y elementos montados.

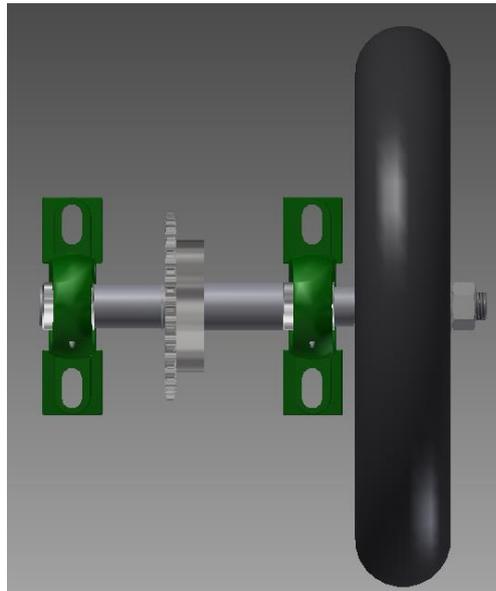


Figura 3.7 Eje ensamblado con sus elementos.

3.1.4.1 Cálculo de reacciones en el eje

En el eje se aplican varias fuerzas con magnitudes conocidas, estas fuerzas generan reacciones en los puntos de apoyo del eje que son los rodamientos. Se debe encontrar todas las fuerzas en los distintos puntos del eje para realizar el cálculo de su geometría. Se establece que el eje está en equilibrio para obtener las distintas reacciones en los apoyos.

En la Figura 3.8 se muestra en un diagrama de cuerpo libre las fuerzas y reacciones resultantes en el eje y sus componentes en los 2 planos de análisis.

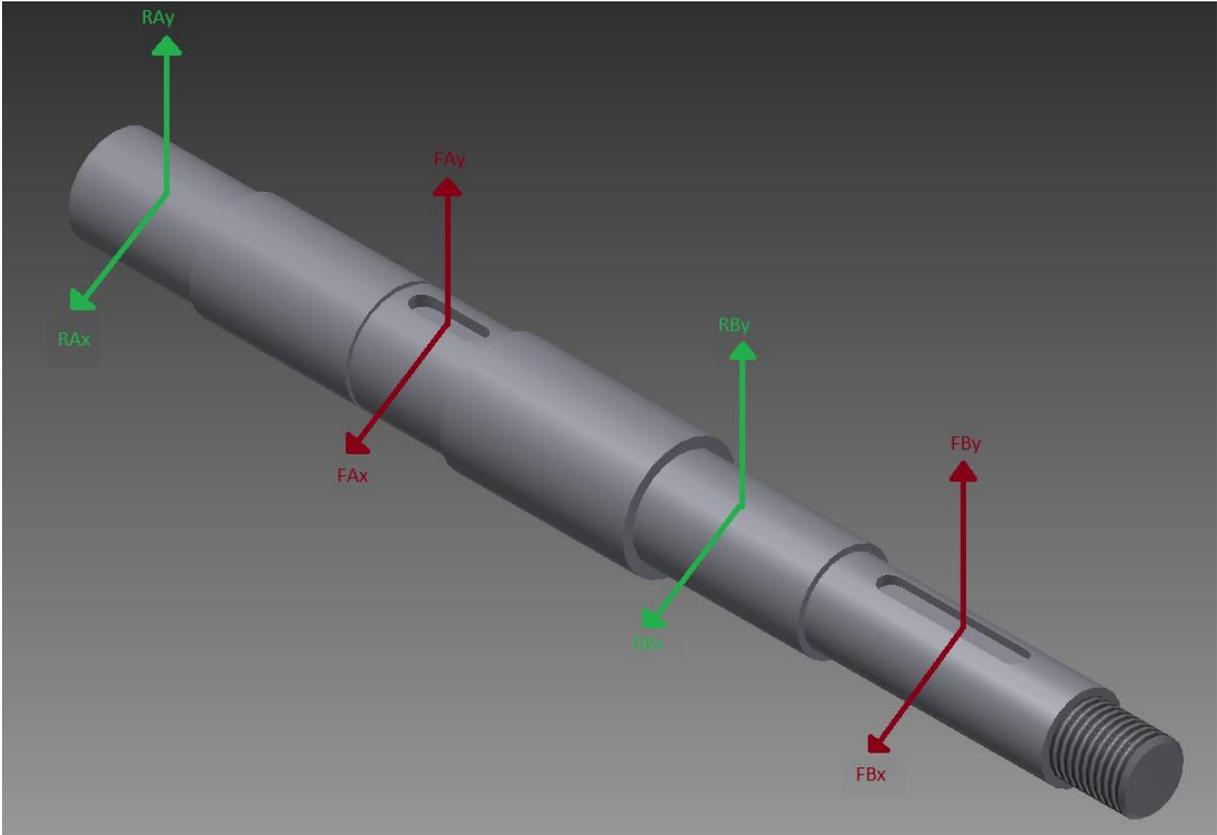


Figura 3.8 Fuerzas y Reacciones en el Eje

Se definen las fuerzas que actúan sobre el eje como:

- **FA:** Es la fuerza producida por el piñón al transferir el torque al eje
- **FB:** Es la fuerza que se genera debido a la reacción de la llanta al contacto con el suelo al transferir el peso de la plataforma.

Las reacciones RA y RB se producen en los rodamientos.

Mediante la selección de cadena y piñón de la sección 3.1.3 se obtiene un piñón de 24 dientes como mínimo.

Del plano del Anexo 5 se obtiene el diámetro primitivo del piñón de $D = 0.104$ m.

De la Tabla 3.4 se obtiene el torque máximo de 39 Nm que pueden producir los motores y transmitir hacia los ejes.

Mediante la ecuación (8) se obtiene la fuerza transferida al eje mediante el piñón.

$$FA = \frac{T}{R} \quad (8)$$

Donde FA es la fuerza aplicada al eje, T es el torque aplicado al piñón y R es el radio del mismo. Reemplazando en la ecuación (8) se obtiene.

$$FA = 750 \text{ N}$$

Esta fuerza actúa con un ángulo de 30 grados con respecto a la horizontal debido a la ubicación del motor con respecto a los ejes de la plataforma.

Se descompone la fuerza en sus componentes FA_x y FA_y .

$$FA_x = 649.52 \text{ N}$$

$$FA_y = 375 \text{ N}$$

La fuerza FB se obtiene mediante el peso máximo que soporta la plataforma que es de 1127 N, se asume que el peso se divide de forma equitativa en las 4 ruedas por lo que se tiene.

$$FB = 281.75 \text{ N}$$

Esta fuerza FB es perpendicular a la horizontal por lo que solo tiene componente en el eje Y.

Con las fuerzas que actúan sobre el eje definidas y el eje en equilibrio se usan las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) para obtener las reacciones sobre los ejes.

$$\sum F_x = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (10)$$

$$\sum M_x = 0 \quad (11)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (12)$$

En la ecuación (9) se reemplaza con las fuerzas en el eje X que afectan al eje.

$$RA_x + RB_x - FA_x = 0$$

En la ecuación (10) se reemplaza con las fuerzas en el eje Y que afectan al eje.

$$RA_y + RB_y - FA_y - FB = 0$$

Se analizan los momentos para el reemplazo en las ecuaciones (11) y (12) con lo que se obtiene.

$$M_{RA_x} + M_{RB_x} - M_{FA_x} = 0$$

$$M_{RA_y} + M_{RB_y} - M_{FA_y} - M_{FB_y} = 0$$

Se toma como punto de referencia RA y las ecuaciones de equilibrio de momentos con los reemplazos respectivos se obtiene.

$$RB_x \cdot d_{RA-RB} - FA_x \cdot d_{RA-FA} = 0$$

$$RB_y \cdot d_{RA-RB} - FA_y \cdot d_{RA-FA} - FB \cdot d_{RA-FB} = 0$$

La distancia entre RA y FA es de 0.08 m, entre FA y RB de 0.06 m y entre RB y FB de 0.06m.

Se tiene 4 incógnitas y 4 ecuaciones, se resuelven y se obtienen las incógnitas:

$$RA_x = 278.37 \text{ N}$$

$$RA_y = 39.96 \text{ N}$$

$$RB_x = 371.15 \text{ N}$$

$$RB_y = 616.79 \text{ N}$$

En la Figura 3.9 se muestran las fuerzas y reacciones con su magnitud y dirección en el plano XZ.



Figura 3.9 Reacciones Plano XZ

En la Figura 3.10 se muestran las fuerzas aplicadas y las reacciones con su magnitud y dirección en el plano YZ.

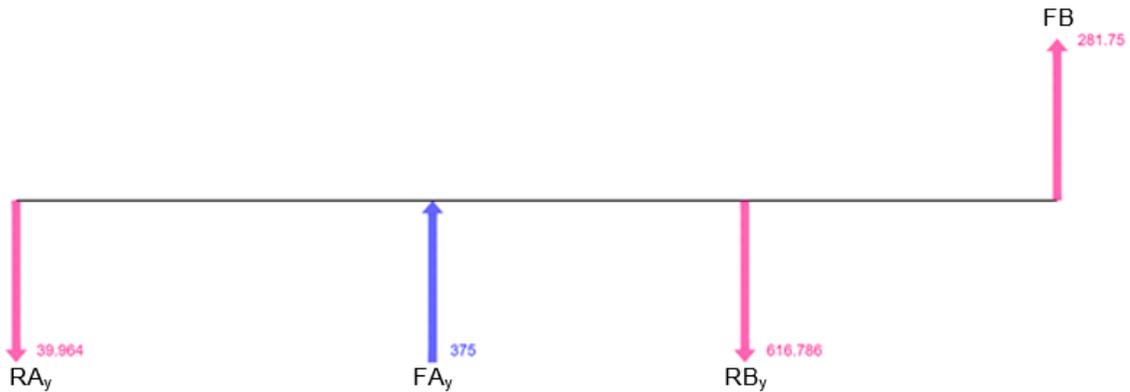


Figura 3.10 Reacciones Plano YZ

3.1.4.2 DISEÑO PARA ESFUERZOS

Según [19] no es necesario evaluar los esfuerzos en todos los puntos del eje, se debe evaluar los puntos críticos del mismo.

Los puntos críticos se definen como puntos en el eje donde existe par de torsión y los momentos flectores son altos, también son puntos críticos los puntos donde existen concentradores de esfuerzo como:

- Hombros
- Chaveteros o Cuñeros
- Ranuras para anillo de retención

La torsión en el eje se produce en la sección entre el piñón que transfiere la potencia del motor y la rueda que transmite el movimiento hacia el suelo.

Debido a la transmisión de potencia a través del piñón se generan esfuerzos en 2 planos por lo que se debe realizar los diagramas de fuerza cortante y momento flector en 2 planos para combinar los vectores resultantes y encontrar el momento flector que actúa sobre los puntos críticos de interés.

A partir de las fuerzas que se encontraron en la sección anterior se generan los diagramas fuerza cortante y momento flector.

En la Figura 3.11 y Figura 3.12 se muestran los diagramas para el Plano XZ.

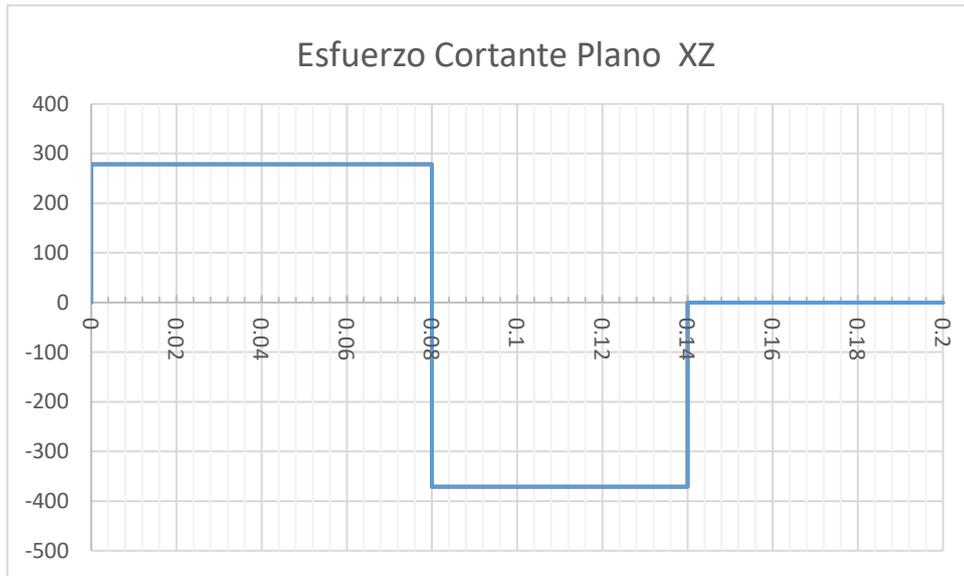


Figura 3.11 Diagrama Esfuerzo Cortante Plano XZ

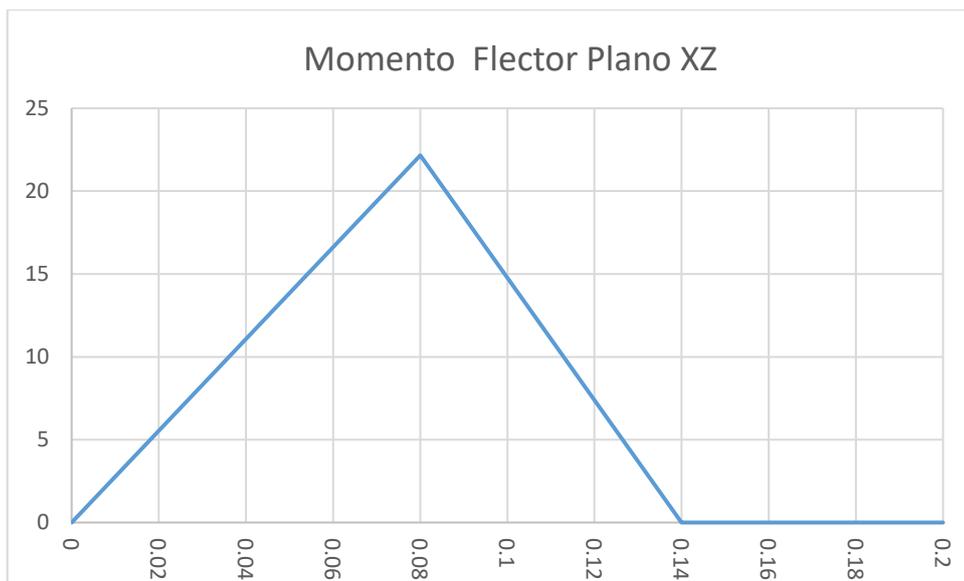


Figura 3.12 Diagrama Momento Flector Plano XZ

En la Figura 3.13 y Figura 3.14 se muestran los diagramas del Plano YZ.

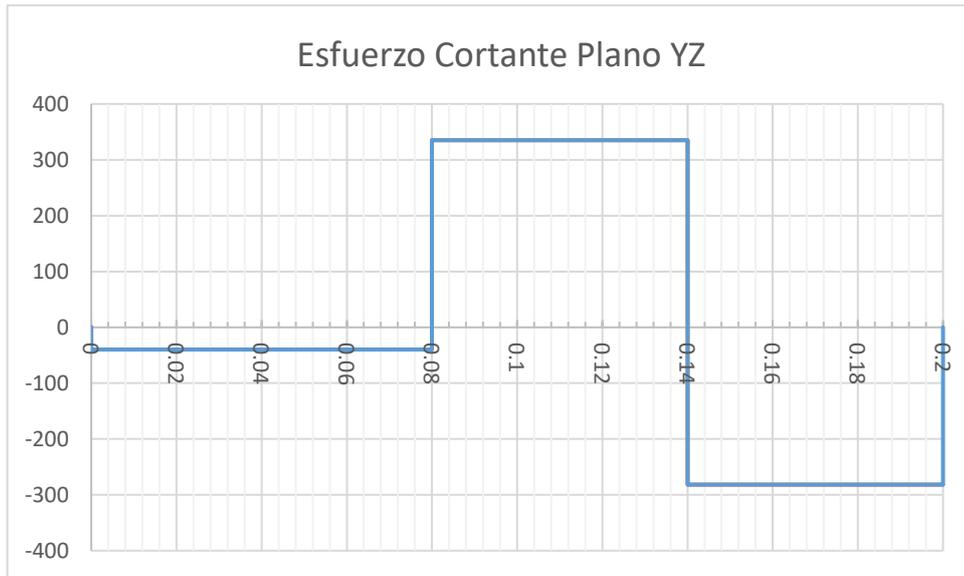


Figura 3.13 Diagrama Esfuerzo Cortante Plano YZ

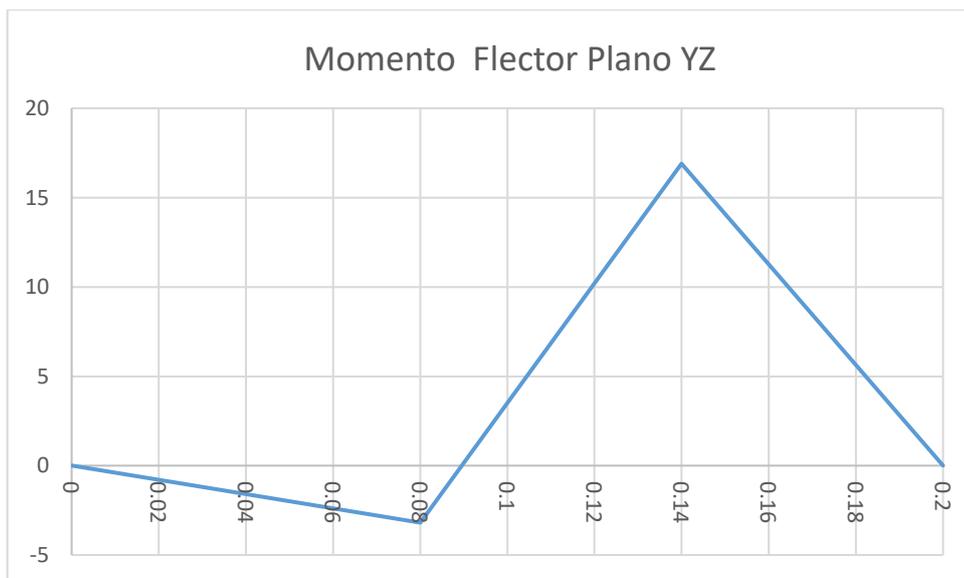


Figura 3.14 Diagrama Momento Flector Plano YZ

Mediante la combinación de los momentos flectores en los 2 planos se encuentra el vector resultante.

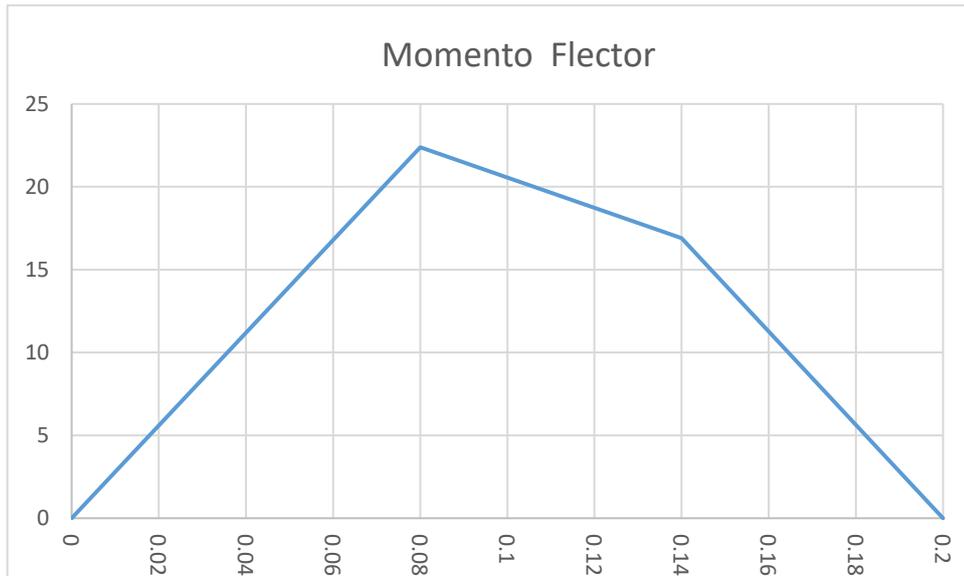


Figura 3.15 Momento Flector Total

En la Figura 3.16 se muestra el par torsión aplicado sobre el eje.

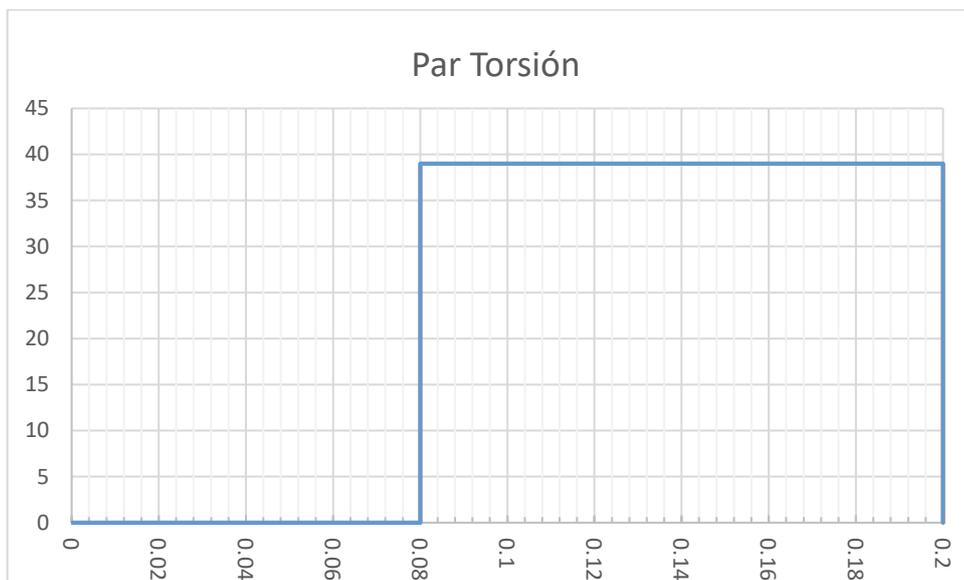


Figura 3.16 Par Torsión sobre el Eje

Con la Figura 3.15 y Figura 3.16 se obtienen los momentos provenientes de los esfuerzos producidos por la flexión y torsión en el eje.

Se analizan los esfuerzos medio y alternante por medio de esfuerzos de Von Misses.

Los esfuerzos fluctuantes se definen por las ecuaciones (13), (14), (15) y (16)

$$\sigma_a = K_t \frac{M_a \cdot c}{I} \quad (13)$$

$$\sigma_m = K_t \frac{M_m \cdot c}{I} \quad (14)$$

$$\tau_a = K_{ts} \frac{T_a \cdot c}{J} \quad (15)$$

$$\tau_m = K_{ts} \frac{T_m \cdot c}{J} \quad (16)$$

En donde σ_m y σ_a son los esfuerzos fluctuantes debido a la flexión, K_f es el factor de concentración de esfuerzos debido a la flexión, M_m y M_a son los momentos flexionantes medio y alternante, τ_m y τ_a son los esfuerzos fluctuantes debido a la torsión, K_{fs} es el factor de concentración de esfuerzos debido a la torsión y T_m y T_a son los momentos de torsión medio y alternante.

En el diseño el eje es cilíndrico y sólido con el reemplazo de I, J y c se obtiene.

$$\sigma_a = K_t \cdot \frac{32 \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma_m = K_t \cdot \frac{32 \cdot M_m}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_a = K_{ts} \cdot \frac{16 \cdot T_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_m = K_{ts} \cdot \frac{16 \cdot T_m}{\pi \cdot d^3}$$

Para combinar estos criterios se utiliza el criterio de falla por energía de distorsión. Debido a la ausencia de cargas axiales se encuentran las ecuaciones (17) y (18) .

$$\sigma'_a = \left[\left(K_t \cdot \frac{32 \cdot M_a}{\pi \cdot d^3} \right)^2 + 3 \cdot \left(K_{ts} \cdot \frac{16 \cdot T_a}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$\sigma'_m = \left[\left(K_t \cdot \frac{32 \cdot M_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 + 3 \cdot \left(K_{ts} \cdot \frac{16 \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Se usa el criterio de falla por fatiga de la línea de Goodman que se expresa en la ecuación (19).

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad (19)$$

En donde n es el factor de seguridad, S_e es el límite de resistencia del material, S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima y σ'_a y σ'_m son los esfuerzos combinados medios y alternantes.

Remplazando (17) y (18) en (19) y despejando para el término de interés d se obtiene (20).

$$d = \left(16 \cdot \frac{n}{\pi} \cdot \left\{ \frac{1}{S_e} \cdot [4 \cdot (K_t \cdot M_a)^2 + 3 \cdot (K_{ts} \cdot T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4 \cdot (K_t \cdot M_m)^2 + 3 \cdot (K_{ts} \cdot T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Mediante (20) se obtiene el diámetro mínimo necesario el punto de análisis.

En la Tabla 3.6 se tiene los factores de concentración de esfuerzo para Flexión y Torsión.

Tabla 3.6 Factores de Esfuerzo

	Flexión	Torsión
Filete de Hombro Agudo	2.7	2.2
Filete de Hombro bien redondeado	1.7	1.5
Cuñero Fresado	2.2	3
Cuñero de patín	1.7	-
Ranura para anillo de retención	5	3

Se analizan 3 puntos críticos para encontrar los diámetros mínimos de los ejes.

3.1.4.2.1 Punto 1

Es el punto en donde se acopla el piñón al eje, en este punto se tiene un cuñero fresado para transmitir la potencia del piñón.

La torsión es constante de 39 Nm y el momento flector al ser un eje giratorio es alternante de 22.39 Nm.

3.1.4.2.2 Punto 2

Es la sección del rodamiento que se encuentra ubicado entre el piñón y la rueda.

La torsión es constante de 39 Nm el momento flector al ser un eje giratorio es alternante de 17.1 Nm.

3.1.4.2.3 Punto 3

Es la sección del eje donde se encuentra la rueda.

La torsión es constante de 39 Nm el momento flector al ser un eje giratorio es alternante de 10.22 Nm.

Para los distintos puntos se calculó el diámetro mínimo recomendado que se muestra en la Tabla 3.7 mediante la ecuación (20).

Tabla 3.7 Diámetros mínimos recomendados

Momento Flector (Nm)	Torsión (Nm)	Diámetro Calculado (mm)
22.36	39	18.65
17.1	39	17.53
10.2	39	16.54

3.1.4.3 SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Para la simulación del diseño de los ejes de la plataforma se usa el software Autodesk Inventor que es un software de ingeniería asistida por computadora (CAE). Para la simulación en el software se debe introducir las fuerzas a las cuales el eje está sometido provenientes de la sección 3.1.4.1.

El software CAE después del análisis de los datos ingresados entrega varios datos para el análisis, se toma el dato del diámetro mínimo recomendado para las distintas secciones como se muestra en la Figura 3.17.

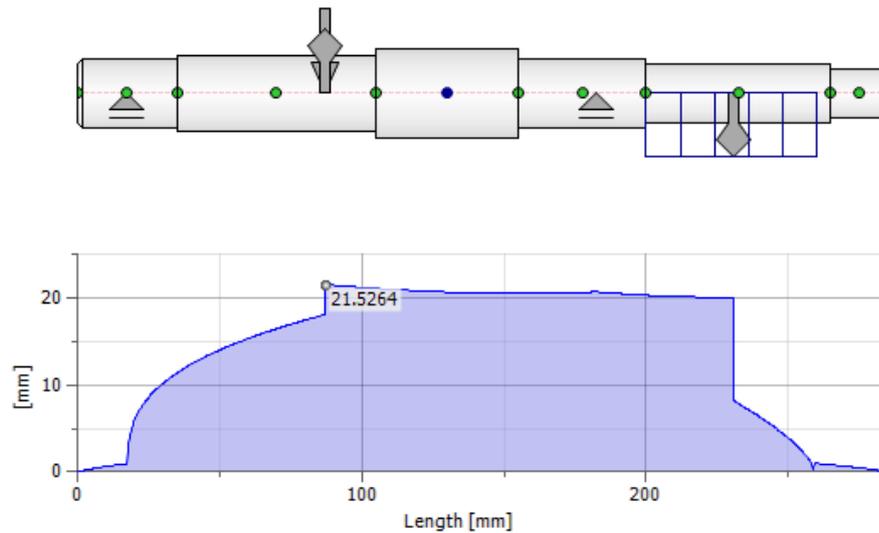


Figura 3.17 Diámetro mínimo del eje obtenido del software CAE

Se toma los datos de la Figura 3.17 y se los compara con los valores de las secciones provenientes del diseño, de esta comparación se obtiene la relación entre los diámetros respectivos de cada sección, esta comparación se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Comparativa dimensiones eje entre Software CAE y Diseño

Sección	1	2	3	4	5	6
Diseño	25.4	28	31.75	25.4	22	18
Software CAE	15	21.52	20.5	20.5	20	2
Relación	1.69	1.30	1.55	1.24	1.10	9.00

De la Tabla 3.8 se valida el diseño al ser la relación mayor a 1 para todas las secciones del eje.

3.1.4.4 SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS PARA LOS EJES

Los rodamientos de la plataforma fijan el eje al chasis y permiten su rotación.

Se necesitan varios parámetros de diseño que se muestran a continuación para el dimensionamiento de los rodamientos.

3.1.4.4.1 Carga Radial y Axial

De la sección 3.1.4.1 se obtienen las reacciones a las cuales están sometidos los rodamientos, se considera el rodamiento con la mayor carga para su selección. Se tiene los componentes de la carga radial del rodamiento intermedio del eje.

$$RB_x = 371.15 \text{ N}$$

$$RB_y = 616.79N$$

La resultante de la carga radial aplicada sobre el rodamiento es:

$$RB = 719.85N$$

3.1.4.4.2 Tipo de aplicación por tiempo de vida

Para la selección del rodamiento se debe definir el tiempo de vida esperada del mismo, el tiempo de vida del rodamiento depende de la aplicación del mismo, según la Tabla 3.9 obtenida de [20] se define una vida de los rodamientos de hasta 0.5 kh debido a que su uso será poco frecuente y es la categoría que más se aproxima al uso que se le dará a la plataforma.

Tabla 3.9 Vida de Rodamientos según Aplicación

Tipo de aplicación	Vida (kh)
Instrumentos y aparatos de uso poco frecuente Hasta 0.5	Hasta 0.5
Motores de aeronaves 0.5-2	0.5-2
Máquinas de operación corta o intermitente, donde la interrupción del servicio resulta de poca importancia	4-8
Máquinas de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia	8-14
Máquinas para servicio de 8 h, que no siempre se usan completamente 14-20	14-20
Máquinas para servicio de 8 h, que se utilizan plenamente 20-30	20-30
Máquinas para servicio continuo las 24 h 50-60	50-60
Máquinas para un servicio continuo de 24 h, donde la confiabilidad es de suma importancia	100-200

3.1.4.4.3 Tipo de Carga

El tipo de carga influye en el comportamiento de los rodamientos por lo que es necesario definir un factor de carga para su dimensionamiento, en la Tabla 3.10 de

[20] se define un factor de carga de 1.5 que implica que la maquinaria tendrá impactos entre ligeros y moderados durante su funcionamiento.

Tabla 3.10 Factor de Carga Rodamientos

Tipo de aplicación	Factor de carga
Engranajes de precisión	1.0-1.1
Engranajes comerciales	1.1-1.3
Aplicaciones con sellos deficientes en los cojinetes	1.2
Maquinaria sin impactos	1.0-1.2
Maquinaria con impactos ligeros	1.2-1.5
Maquinaria con impactos moderados	1.5-3

3.1.4.4.4 Dimensionamiento del Rodamiento

Con los valores obtenidos previamente se procede a encontrar el coeficiente de carga del rodamiento. Mediante la ecuación (21) y (22) de [20].

$$x_D = \frac{60 \cdot L_D \cdot n_D}{60 \cdot L_R \cdot n_R} \quad (21)$$

En donde x_D es la relación entre la vida de diseño y la vida nominal de un rodamiento, L_D la vida deseada en horas, n_D la velocidad deseada en rpm, L_R la vida nominal en horas y n_R la velocidad nominal en rpm.

$$C_{10} = F_D \cdot \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0) \cdot (1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a} \quad (22)$$

En donde F_D es la carga de diseño, a es una constante que varía según el tipo de rodamiento, x_0 , θ y b son parámetros distribucionales que se puede obtener mediante la distribución Weibull y R_D la confiabilidad de diseño, esta ecuación aplica siempre y cuando la confiabilidad nominal sea mayor a 0.9 que se cumple en los diseños de los fabricantes.

Mediante el reemplazo de los valores de $n_D = 131$ rpm y $L_D = 500$ horas en (21) se obtiene:

$$x_D = 3.93$$

Mediante el reemplazo en (22) de los valores obtenidos previamente y con los parámetro de Weibull $x_0 = 0.2$, $(\theta - x_0) = 4.439$ y $b = 1.483$ y las constantes $a=3$ para un rodamiento de bolas y $R_D = 0.99$.

$$C_{10} = 1.5 \cdot 719.85 \cdot \left[\frac{3.93}{0.2 + 4.439 \cdot (1 - 0.99)^{1/1.483}} \right]^{1/3}$$

$$C_{10} = 5724.55 \text{ N} = 5.72 \text{ kN}$$

En la Figura 3.18 de [20] se muestra que un rodamiento de 25 mm de diámetro interior soporta una carga de 14 o 14.8 kN dependiendo de su configuración, este valor excede los 5.72 kN del cálculo necesario para el funcionamiento bajo las condiciones necesaria de la plataforma.

Dimensiones y clasificaciones de carga para cojinetes de bolas de contacto angular, de una fila, serie 02, de ranura profunda

Diámetro interior, mm	DE, mm	Ancho, mm	Radio del entalle, mm	Diámetro del hombro, mm		Clasificaciones de carga, kN			
				d_s	d_H	Ranura profunda		Contacto angular	
						C_{10}	C_0	C_{10}	C_0
10	30	9	0.6	12.5	27	5.07	2.24	4.94	2.12
12	32	10	0.6	14.5	28	6.89	3.10	7.02	3.05
15	35	11	0.6	17.5	31	7.80	3.55	8.06	3.65
17	40	12	0.6	19.5	34	9.56	4.50	9.95	4.75
20	47	14	1.0	25	41	12.7	6.20	13.3	6.55
25	52	15	1.0	30	47	14.0	6.95	14.8	7.65
30	62	16	1.0	35	55	19.5	10.0	20.3	11.0
35	72	17	1.0	41	65	25.5	13.7	27.0	15.0
40	80	18	1.0	46	72	30.7	16.6	31.9	18.6
45	85	19	1.0	52	77	33.2	18.6	35.8	21.2
50	90	20	1.0	56	82	35.1	19.6	37.7	22.8
55	100	21	1.5	63	90	43.6	25.0	46.2	28.5
60	110	22	1.5	70	99	47.5	28.0	55.9	35.5
65	120	23	1.5	74	109	55.9	34.0	63.7	41.5
70	125	24	1.5	79	114	61.8	37.5	68.9	45.5
75	130	25	1.5	86	119	66.3	40.5	71.5	49.0
80	140	26	2.0	93	127	70.2	45.0	80.6	55.0
85	150	28	2.0	99	136	83.2	53.0	90.4	63.0
90	160	30	2.0	104	146	95.6	62.0	106	73.5
95	170	32	2.0	110	156	108	69.5	121	85.0

Figura 3.18 Diámetros y clasificaciones de carga rodamientos serie 02

3.1.5 DISEÑO DEL CHASIS DE LA PLATAFORMA

El chasis es el principal elemento mecánico de la plataforma, al mismo se sujetan los siguientes elementos: Motores, baterías, ejes, elementos de control y carrocería.

Para este elemento se ha optado por un diseño de estructura tubular que optimiza el peso y la rigidez. El diseño del chasis se realiza por rigidez debido a la deflexión del miembro estructural que soporta la mayor carga del conjunto.

El miembro estructural que soporta la mayor carga es cualquiera de los largueros externos que recibe la fuerza generada por el motor y el peso de la plataforma que se transfiere al chasis a través de los rodamientos.

Para la deflexión máxima permisible se parte de la Tabla 3.11 generada con los límites de flexión recomendada en [21] para el análisis de vigas de máquinas.

Tabla 3.11 Deflexión máxima vigas recomendada

y_{max}	Tipo de Viga
$0.0005 \text{ a } 0.003 \frac{mm}{mm} \text{ de longitud de viga}$	Parte general de una máquina
$0.00001 \text{ a } 0.0005 \frac{mm}{mm} \text{ de longitud de viga}$	Parte de precisión moderada
$0.000001 \text{ a } 0.00001 \frac{mm}{mm} \text{ de longitud de viga}$	Parte de alta precisión

La longitud de la viga es de 900 mm y se toma la flexión intermedia permitida para una viga máquina de precisión moderada de una máquina de $0.000255 \frac{mm}{mm}$ con lo que la flexión máxima para el cálculo es:

$$y_{max} = 0.2295 \text{ mm}$$

Para el análisis se determina que la viga se encuentra con apoyos fijos en cada extremo y se aplica la fuerza máxima en el eje determinado en la sección 3.1.4.1 en la distancia requerida para el correcto funcionamiento de la plataforma. En la Figura 3.19 se muestra las reacciones y momentos generados en los apoyos debido a la fuerza aplicada en viga.

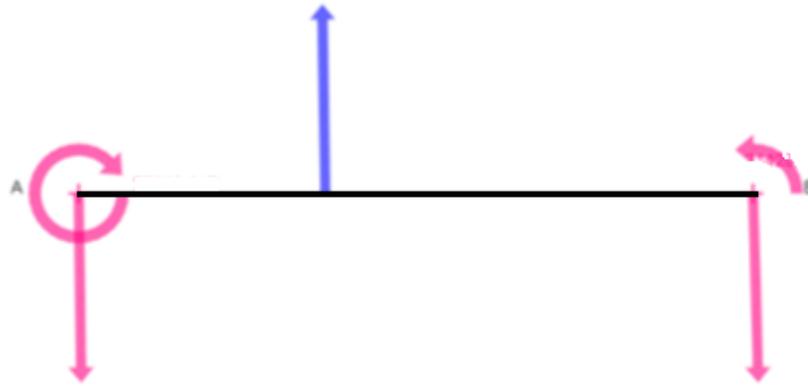


Figura 3.19 Esquema de Apoyos y Fuerzas en viga

Al tratarse de una estructura estaticamente indeterminada se debe recurrir a algun metodo especifico o formulas para encontrar las reacciones y momentos en los puntos de apoyo de la viga.

Debido a que la configuración de la viga es comun se puede obtener las reacciones y momentos a traves de las ecuaciones (23), (24), (24)(25), (26) y (27) tomadas de [22]

$$R_A = \frac{P \cdot b^2}{L^3} (3a + b) \quad (23)$$

$$R_C = \frac{P \cdot a^2}{L^3} (3b + a) \quad (24)$$

$$M_A = \frac{-P \cdot a \cdot b^2}{L^2} \quad (25)$$

$$M_B = \frac{2 \cdot P \cdot a^2 \cdot b^2}{L^3} \quad (26)$$

$$M_C = \frac{-P \cdot a^2 \cdot b}{L^2} \quad (27)$$

En donde a , b y c son puntos a lo largo de la viga, A y B son los apoyos, L la longitud total de la viga y P la fuerza aplicada, estas variables se muestran en la Figura 3.20.

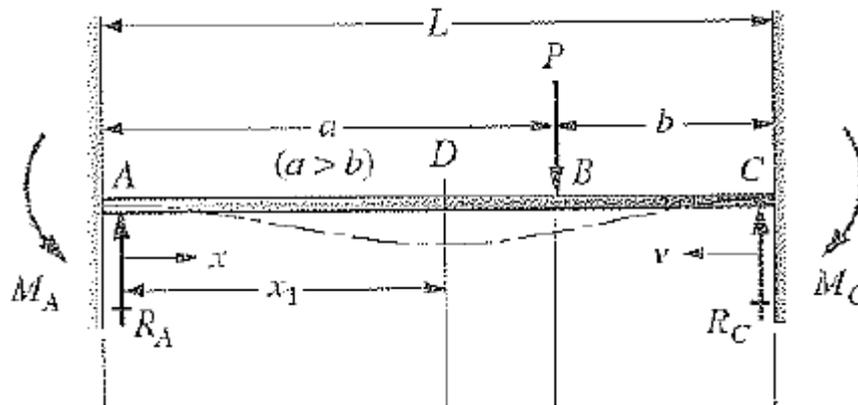


Figura 3.20 Viga Estáticamente Indeterminada

Reemplazando las variables con $a=0.7\text{m}$, $b=0.2\text{m}$, $L= 0.9\text{m}$ y $P=616.79\text{N}$ en (23), (24), (24),(25), (26) y (27) se obtiene:

$$R_A = 77.84 \text{ N}$$

$$R_C = 538.95 \text{ N}$$

$$M_A = -21.31 \text{ Nm}$$

$$M_B = 33.16 \text{ Nm}$$

$$M_C = -74.62 \text{ Nm}$$

En la Figura 3.21 y Figura 3.22 se muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante de la viga.

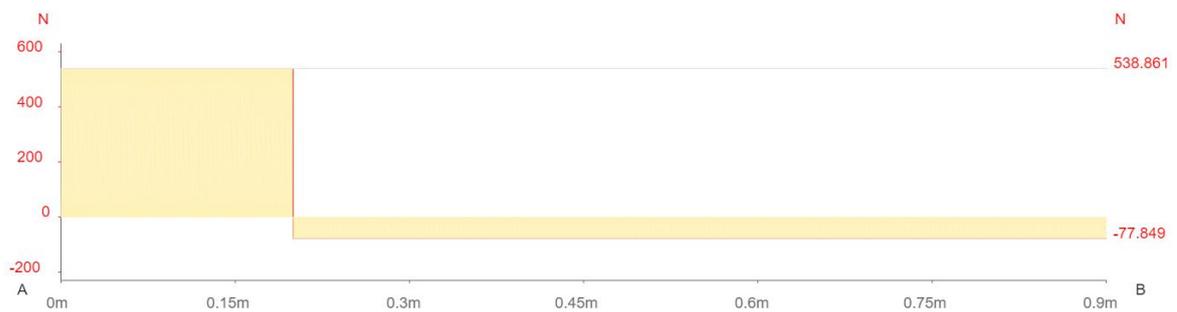


Figura 3.21 Diagrama de Fuerza Cortante en la Viga

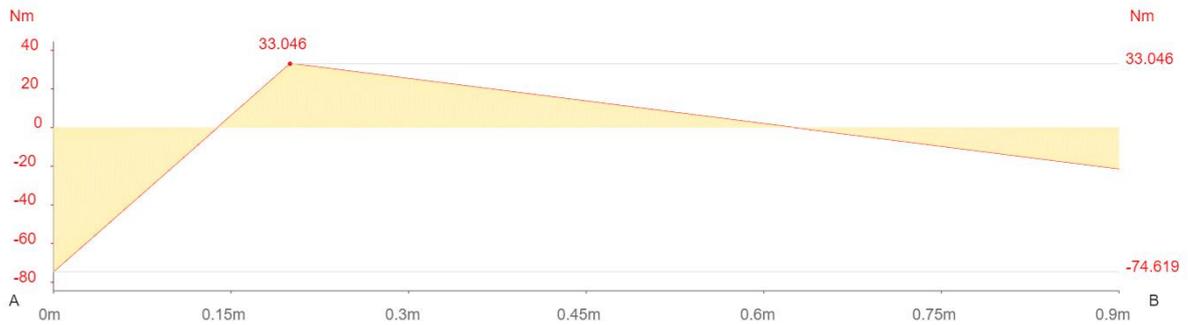


Figura 3.22 Diagrama de Momento Flexionante en la Viga

De [22] se obtiene la ecuación (28) que define la deflexión máxima en la viga.

$$y_{max} = \frac{-2 \cdot P \cdot a^3 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot (3a + b)^2} \quad (28)$$

En donde a y b son las distancias desde el punto que se aplica la fuerza a los extremos, P es la fuerza aplicada, E es el módulo de elasticidad del material y I es la inercia de la viga, para dimensionar la viga se despeja la Inercia de la ecuación (28) y se obtiene:

$$I = \frac{-2 \cdot P \cdot a^3 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot y_{max} \cdot (3a + b)^2}$$

Reemplazando $P=616.79$ N, $a=0.7$ m, $b=0.2$ m, $y_{max}=0.2295$ mm y $E=210000$ MN/m² se obtiene:

$$I = -2.2128 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Transformando a cm⁴ se obtiene:

$$I = -2.2128 \text{ cm}^4$$

Para la construcción debido a la calidad del acero y a las perforaciones que se realizan en los puntos de aplicación de la fuerza por la realización de los ojos chinos para el movimiento de los ejes y el ajuste de la cadena se decide tomar un factor de seguridad de 1.5.

Se obtiene que se necesita un tubo cuadrado de acero con una inercia mínima de 3.315 cm⁴ de la Figura 3.23 parte del Anexo 5 se determina que el tubo de acero que cumple la inercia mínima es el de 40 mm en los lados y un espesor de 1.2 mm.

DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94

Figura 3.23 Tabla de Inercias de Tubos Cuadrados

3.1.6 CARROCERÍA DE LA PLATAFORMA

Se realiza una carrocería para la protección de los elementos internos de la plataforma y montaje de varios componentes accesibles al usuario, esta carrocería no cumple una función estructural en la plataforma su función principal es la protección de partes internas móviles hacia el usuario. La carrocería de la plataforma consta de 2 elementos:

- Tapa superior
En este parte de la carrocería se tiene los distitntos elementos exteriores que pueden ser manipulados por el usuario (Camara, Antenas, Conectores).
- Tapas laterales
Estas tapas cubren los laterales de la plataforma impidiendo la manipulación de elementos internos.

En la Figura 3.24 se muestra la tapa superior que será acoplada al chasis.

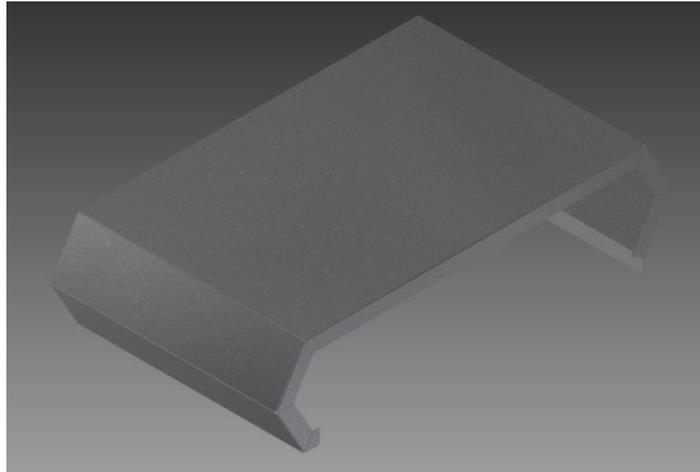


Figura 3.24 Carrocería de la plataforma

Para la fabricación de la carrocería de la plataforma se usa plancha de acero, este material mediante el proceso de corte y doblado permite la generación de formas geométricas, en el proceso de doblado el material aumenta su rigidez en conjunto. La carrocería mantiene los ángulos de ataque y de salida de la plataforma.

3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO, CONTROL Y COMUNICACIONES

El diseño electrónico, de control y de comunicaciones de la plataforma comprende todos los elementos de estas ramas necesarias para el pleno funcionamiento de la plataforma, estos elementos se integran al sistema mecánico del proyecto para generar el comportamiento deseado.

Esta sección del diseño comprende las siguientes acciones:

- Selección de elementos
- Configuración de dispositivos
- Conexión de elementos de control y potencia
- Desarrollo de la interfaz de control

3.2.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DE MOTORES

Para el control de los motores en la plataforma se necesita un controlador de potencia, en base a los motores seleccionados se usa el controlador Sabertooth 2x32

3.2.1.1 CONTROLADOR DE MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

En esta sección se describe el funcionamiento y características del controlador Sabertooth 2x32 de la compañía DIMENSION ENGINEERING para controlar los motores de la plataforma.

3.2.1.2 ELEMENTOS DE LA TARJETA SABERTOOTH 2X32

En la tarjeta se puede identificar 2 secciones.

- **Sección de potencia:** En esta sección se encuentran las conexiones para los motores y la fuente de alimentación, en este caso la batería. Esta sección se puede visualizar en la parte superior de la Figura 3.25
- **Sección de control:** En la sección de control se tiene el conector USB para la configuración de la tarjeta a través de una computadora, un bloque de selectores para la configuración del modo de operación, leds para mostrar el estado y los errores y los bloques de conexión para el controlador. Todos estos controles e indicadores se encuentran en la parte inferior de la Figura 3.25.

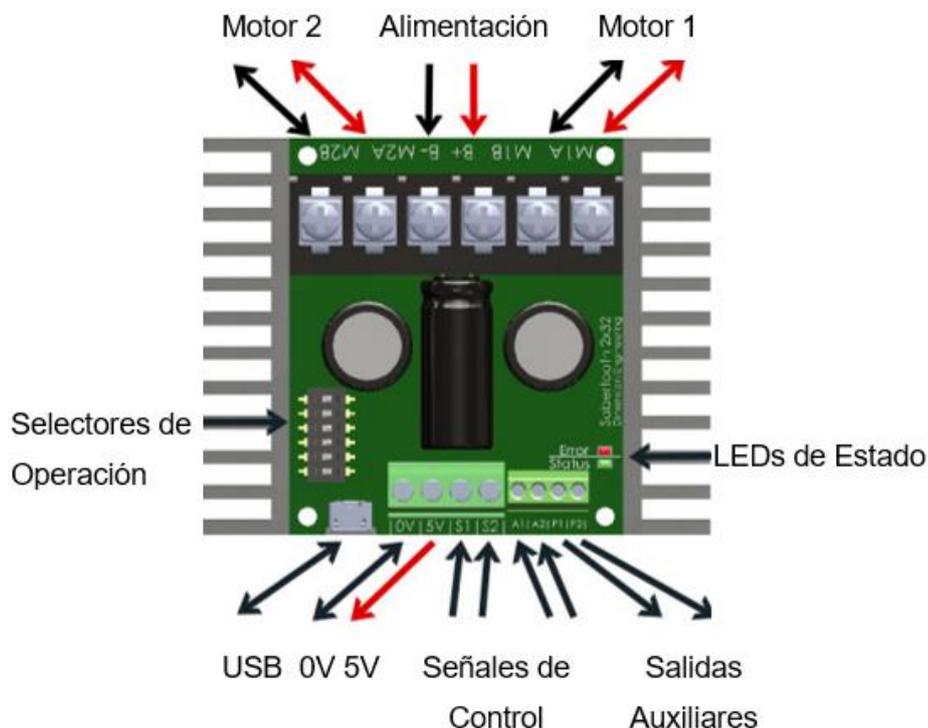


Figura 3.25 Descripción de las entradas y salidas del controlador Sabertooth 2x32

En la Tabla 3.12 se describe el nombre de cada conexión de la tarjeta con sus rangos de voltaje y corriente.

Tabla 3.12 Conexiones Tarjeta Sabertooth 2x32

Nombre	Descripción	Voltaje	Corriente
B+	Entrada de voltaje positivo	6V – 33.6V	64A /128A pico
B-	Entrada de voltaje negativo	0V	64A /128A pico
M1A	Salida motor 1	0V – 33.6V	32A/64A pico
M1B	Salida motor 2	0V – 33.6V	32A/64A pico
M2A	Salida motor 2	0V – 33.6V	32A/64A pico
M2B	Salida motor 2	0V – 33.6V	32A/64A pico
0V	Tierra lógica	0V conectado internamente al terminal B-	2A
5V	Salida de voltaje 5V	5V	1A
S1	Señal de entrada 1	0V – 5V	1mA
S2	Señal de entrada 2	0V – 5V	1mA entrada, 20mA salida
A1	Señal auxiliar 1	0V – 5V	1mA
A2	Señal auxiliar 2	0V – 5V	1mA entrada, 20mA salida
P1	Salida de potencia 1 Colector abierto	0V – 33.6V	8A
P2	Salida de potencia 2 Colector abierto	0V – 33.6V	8A
USB	Puerto micro USB		100mA máximo

3.2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA TARJETA

Las características más relevantes de la tarjeta recopiladas del Anexo 4 se muestran a continuación:

- Control de 2 motores hasta 32 A de forma continua y picos de hasta 64 A.
- Control mediante voltajes analógicos, transmisores de radio control, comandos a través de una conexión serial TTL, USB o una combinación de los mencionados anteriormente.
- Entrada USB para la configuración o control de la tarjeta.

- Frecuencia de conmutación de 29 kHz.
- Límites de corriente y temperatura configurables.
- Más de 4000 velocidades mediante una resolución de salida de 12 bits.
- Protección de descarga de baterías.

3.2.1.4 MODOS DE CONTROL DE LA TARJETA

La tarjeta tiene varios modos de control que se seleccionan mediante la combinación de los selectores. Se pueden seleccionar 4 diferentes modos de operación mediante la combinación de los selectores 1 y 2. Mediante la combinación de los otros selectores se configuran las características específicas de cada modo de operación.

Se tiene los siguientes modos de operación:

- **Control analógico:** Este modo de operación se usa para el control de los motores con un voltaje analógico aplicado a los terminales S1 y S2.
- **Control por radiofrecuencia:** En esta operación la tarjeta recibe las señales por medio de un receptor de radio frecuencia. En este modo la tarjeta se adapta a las señales del receptor.
- **Control por comunicación serial:** En este modo se envía y reciben datos a través de un vínculo serial entre la plataforma y el controlador o PC.
- **Control por USB:** El control se realiza a través del puerto USB.

Se detalla en la Figura 3.26 la disposición de los selectores para el modo serial.

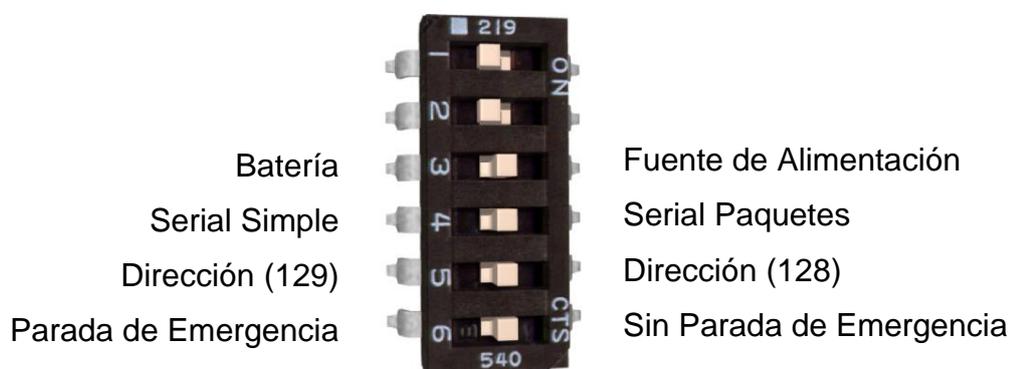


Figura 3.26 Selectores configurados para comunicación serial

3.2.2 SELECCIÓN SENSORES DE LA PLATAFORMA

Para la recolección de las distintas variables del entorno que se requieren para la visualización y control de la plataforma es necesario la colocación de sensores.

En la Tabla 3.13 se detalla las variables de las cuales se desea tener la medición y se detalla el dispositivo que permite recuperar estos datos.

Tabla 3.13 Variables con Dispositivo de Medición

Variable	Dispositivo
Temperatura	Termómetro
Altura	Barómetro
Inclinación	Giroscopio
Velocidad Rotación	Encoder
Voltaje Baterías	Voltímetro
Imagen	Cámara

Para obtener los datos del estado de la plataforma es necesario la colocación de sensores para medir las variables deseadas. Estos sensores se comunican con el controlador mediante protocolos de comunicación.

Se usan los siguientes sensores para la recuperación de señales:

- **MPU-9150:** Contiene un acelerómetro, giroscopio y magnetómetro que permite recuperar los ángulos de posición en los 3 ejes. Se obtienen los datos mediante comunicación I2C.
- **BMP180:** Es un barómetro con termómetro que permite recuperar la altura y temperatura. Se obtienen los datos mediante comunicación I2C.
- **Encoder:** Permite calcular la velocidad del desplazamiento de la plataforma en base a la rotación de los neumáticos. EL Encoder usa 2 entradas de interrupción para el cálculo de la velocidad.
- **Tarjeta Sabertooth:** Brinda el voltaje y corriente de operación de los motores. Se comunica por transmisión serial.
- **Cámara de Video:** Se utiliza una cámara de video vigilancia analógica para la recuperación del video de la plataforma.

3.2.2.1 MPU-9150

En la plataforma se usa una tarjeta con el paquete MPU-9150, la tarjeta contiene al chip, circuitos de alimentación y de cambio de niveles lógicos para que el paquete pueda funcionar con voltajes de 3.3V a 5V. La tarjeta con sus dimensiones se muestra en la Figura 3.27.

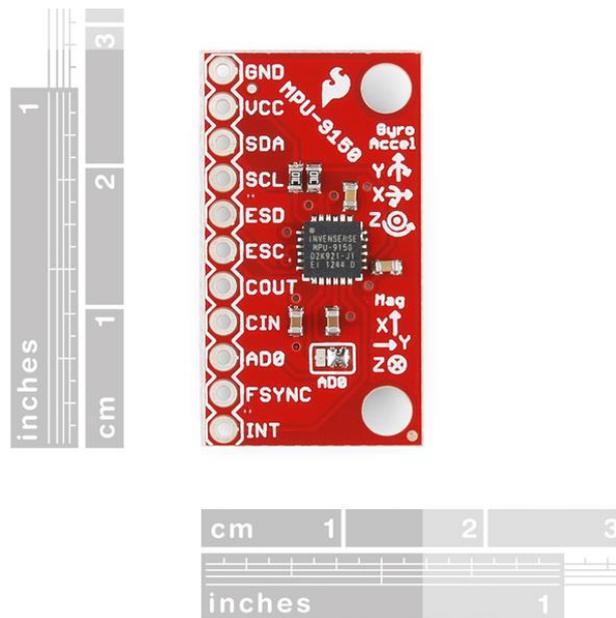


Figura 3.27 Tarjeta con el paquete MPU-9150

El MPU-9150 es un paquete que contiene 2 chips el MPU-6050, que es un acelerómetro y giroscopio de 3 grados de libertad cada uno y el AK8975, que es un magnetómetro de 3 grados de libertad.

Se muestran las características de este paquete [23].

- Giroscopio con escala programable de ± 250 , ± 500 , ± 1000 , y $\pm 2000^\circ$ grados por segundo
- Acelerómetro con escala de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, y ± 16 programable por el usuario
- Magnetómetro con escala de $\pm 1200 \mu\text{T}$
- Procesador digital de movimiento que permite el cálculo de algoritmos de posición y movimiento.
- Calibración del chip mediante firmware.
- Comunicación I2C.

3.2.2.2 BMP180

El BMP-180 es una placa que contiene un barómetro y un termómetro, debido a que la presión atmosférica varía con la altitud este sensor permite la medición de esta magnitud.

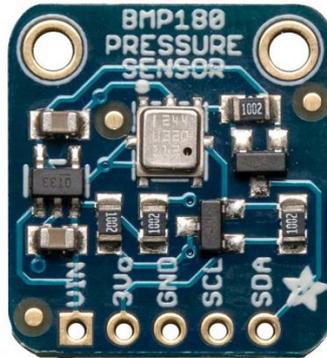


Figura 3.28 Sensor de Presión BMP180

Entre las características de esta placa se tiene: [24]

- Voltaje de Alimentación: 3 a 5 V
- Voltajes lógicos: 3 a 5 V
- Rango medición presión barométrica: 300-1100 hPa
- Medición Altura: -500 a 9000 m.s.n.m.
- Resolución: 0.03 hPa / 0.25 m
- Precisión: $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Rango Operación: -40 a $+85^{\circ}\text{C}$
- Comunicación I2C dirección 0x77

3.2.2.3 Encoder de Cuadratura

El Encoder es un elemento que permite recuperar la velocidad de rotación sobre el eje.

En el proyecto se usa un Encoder incremental o rotatorio relativo de cuadratura para obtener la variación del ángulo del eje y la dirección de la rotación en base a los pulsos que envía.

Este elemento permite verificar la velocidad de desplazamiento de la plataforma, también entrega una realimentación para realizar un lazo de control cerrado con el cual se obtiene mayor precisión en su desplazamiento.

Un Encoder de cuadratura tiene 4 cables, 2 de alimentación y 2 que entregan los pulsos con los cuales se puede realizar el cálculo de la velocidad de rotación del eje.



Figura 3.29 Encoder de Cuadratura

Los Encoders usados en la plataforma tienen las siguientes características.

- **Voltaje:** 5-24 V CC
- **Máxima velocidad mecánica:** 5000 RPM
- **Pulsos por revolución:** 600 por canal, 2400 en cuadratura

3.2.2.4 Cámara de Video

Se monta una cámara de video vigilancia sobre la plataforma como la que se muestra en la Figura 3.30 para la recuperación de imágenes del exterior, para la navegación de la plataforma fuera del rango visual del operador.



Figura 3.30 Cámara de Video Vigilancia

Las características del fabricante de la cámara se muestran a continuación:

- **Alimentación:** 12 V
- **Resolución Horizontal:** 1300 Líneas
- **Rango LEDs infrarrojos:** 0-30 m

- **Lente:** 6mm

3.2.3 CONTROLADOR LÓGICO DE LA PLATAFORMA

La plataforma necesita de un controlador lógico para la recopilación de señales de los distintos sensores y el control de los actuadores de la plataforma sea de forma directa o indirecta.

3.2.3.1 ARDUINO

Arduino es un conjunto de software y hardware que permiten el desarrollo de componentes electrónicos. Se dispone de varias tarjetas con distintos procesadores, capacidades, pines de entrada y salida y puertos de comunicaciones.

La placa Arduino tiene las siguientes funciones en la plataforma.

- Recopilación de datos de los sensores, encoders y tarjetas.
- Transmisión de datos a la estación base
- Recepción de comandos de la estación base
- Control de la placa de potencia de motores
- Cálculo de ángulos de posición de la plataforma

3.2.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLACA ARDUINO

Se necesita que la placa Arduino seleccionada tenga las características mínimas definidas en la Tabla 3.14 para el correcto funcionamiento de la plataforma. Estas características permiten la conexión con los distintos sensores y actuadores conectados a la plataforma.

Tabla 3.14 Características Necesarias de Placa Arduino

Característica	Mínimo
Puertos UART	2
Pines Interrupción	4
Puerto I2C	1
Entradas Analógicas	NA
Salidas Analógicas	0
Pines Digitales	12

De acuerdo a la Tabla 3.15 realizada con información de [25], la placa Arduino Mega cumple y excede los requisitos necesarios para la plataforma por lo cual se desarrolla el proyecto con esta tarjeta.

Tabla 3.15 Comparativa tarjetas Arduino

	Uno	Mega	Due
Voltaje Funcionamiento	5 V / 7-12 V	5 V / 7-12 V	3.3 V / 7-12 V
Procesador	ATmega328P	ATmega2560	ATSAM3X8E
Velocidad CPU	16 MHz	16 MHz	84 MHz
Salidas Analógicas	0	0	2
Entradas Analógicas	6	16	12
Entradas y Salidas Digitales	14	54	54
Salidas PWM	6	15	12
Interrupciones Digitales	2	6	54
Memoria	32kB	256kB	512kB
Puertos Seriales	1	4	4
Puertos I2C	1	1	2

3.2.4 ELEMENTOS DE LA ESTACIÓN BASE

El control en la estación base se realiza en un computador personal a través de ROS, a este computador se conectan distintos dispositivos para establecer la comunicación entre la estación y la plataforma y el control de la misma.

Los siguientes dispositivos son necesarios para el funcionamiento de la plataforma:

- Dispositivo de entrada
- Tarjeta de captura de video
- Módulos de comunicación de radiofrecuencia
- Módulos de transmisión de video

El usuario realizará el control a través de una interfaz gráfica que puede ser manipulada con el teclado, mouse y el mando de juegos.

- **Dispositivo de Entrada:** Permite el envío de señales de movimiento a la plataforma a través del computador.
- **Tarjeta de Captura de video:** Permite digitalizar la señal analógica de la cámara de video para su posterior procesamiento y visualización en el computador.
- **Módulos de comunicación por radio frecuencia:** Crean el vínculo entre la computadora y la plataforma para el envío y recepción de datos.
- **Módulos de transmisión de video:** Transmiten de manera inalámbrica el video desde la plataforma hacia el computador.

3.2.4.1 Dispositivo de Entrada

Para el control del movimiento de la plataforma se usa un mando de control como el que se muestra en la Figura 3.31.



Figura 3.31 Mando de control Logitech F310

El mando de control es un transductor que envía al computador una variable de acuerdo a si se presiona o no un botón o el movimiento de los pulgares en los controles analógicos.

3.2.4.2 Tarjeta de captura de video

Una tarjeta de video USB permite la recepción de las señales analógicas provenientes de la cámara de video vigilancia para su posterior visualización y el procesamiento en la computadora.

En el proyecto se usa la tarjeta de video EasyCAP que se muestra en la Figura 3.32.



Figura 3.32 Tarjeta de video EasyCAP

Entre las características de la tarjeta EasyCAP se tiene:

- Conexión USB 2.0
- Captura de video NTSC 720x480 pixeles
- Captura de video PAL 720x576 pixeles
- Compatibilidad nativa en Linux a partir del Kernel 3.7
- Driver para Windows

3.2.4.3 Módulos de comunicación por radiofrecuencia

En el proyecto se usan los módulos SiK de telemetría, estos módulos también son conocidos como módulos 3DR debido a que la compañía 3DRobotics implementaba estos radios en módulos de alta calidad pero esta compañía dejó de fabricarlos.

Estos módulos son de costo moderado, ligeros y proveen rangos de más de 300 metros de manera estándar con sus antenas omnidireccionales.

El módulo de la estación base dispone de un puerto USB para la conexión con el computador, este módulo se conecta y se identifica en el computador como un puerto serial de comunicación.

El módulo para la plataforma cuenta con un cable para la conexión con el microcontrolador. Este cable consta de cuatro pines para la comunicación y alimentación del módulo.

Los 2 módulos se muestran en la Figura 3.33.



Figura 3.33 Módulos SiK de Telemetría

Entre las principales características de estos módulos se encuentran.

- Tamaño reducido
- Bajo peso (menos de 4 gramos sin la antena)
- Disponibles en 433 o 900 MHz
- Potencia de transmisión de hasta 20 dBm (100 mW)
- Velocidades de transmisión de hasta 250 kbps

- Protocolo MAVLink
- Software de plataforma abierta
- Configuración por medio de comandos AT
- Configuración por medio de comandos RT de forma remota

3.2.4.3.1 LED DE ESTADO

Los módulos de telemetría cuentan con 2 LEDs uno rojo y uno verde. El significado de estos led se detalla a continuación:

- **LED verde titilando:** módulo en modo de búsqueda
- **LED verde sólido:** vínculo entre módulos establecido
- **LED rojo titilando:** módulo transmitiendo datos
- **LED rojo sólido:** módulo en proceso de actualización de firmware

3.2.4.4 Módulos de transmisión de video

Para la transmisión del video hacia la plataforma se usan módulos de transmisión de audio y video como los de la Figura 3.34.



Figura 3.34 Módulos de Transmisión de Video

Las características de los módulos de transmisión se muestran a continuación:

- **Voltaje:** 12 V
- **Corriente:** 320 mA
- **Frecuencia:** 2400 MHz

3.2.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA

La alimentación para los elementos motrices y de control de la plataforma se realiza a través de baterías.

A partir del cálculo del consumo de los diferentes elementos de la plataforma se configura un banco de baterías para su alimentación.

Se necesita de un sistema de alimentación de 3 voltajes para los distintos componentes de la plataforma.

- **24 V:** Motores
- **12 V:** Cámara de Video y Transmisor
- **5 V:** Arduino y sensores

En la Tabla 3.16 se detalla el consumo de elementos a 5 V.

Tabla 3.16 Consumo Componentes 5 V

Componente	Consumo (mA)	Potencia (W)
Arduino	50	0.25
BMP-180	1	0.005
MPU-9150	10	0.05
Módulo Telemetría	100	0.5
	Total	0.805

El consumo a 12 V se muestra en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Consumo Componentes 12 V

Componente	Consumo (mA)	Potencia (W)
Cámara	400	4.8
Transmisor	320	3.84
	Total	8.64

Para el consumo a 24 V se considera una corriente de operación promedio de los motores de 13 A, un poco mayor a la corriente de máxima eficiencia de 10.5 A.

Esto se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18 Consumo Motores 24 V

Componente	Consumo (A)	Potencia (W)
Motor Derecho	13	312
Motor Izquierdo	13	312
	Total	624

Con la potencia obtenida de los distintos componentes se encuentra el consumo total de la plataforma. Se elige un voltaje de operación de 24 V debido a que el mayor consumo se realiza a este voltaje. En la Tabla 3.19 se muestra la potencia real consumida por la plataforma, debido a la reducción de voltaje para la alimentación se pierde energía en este proceso.

Tabla 3.19 Potencia Total Plataforma

Voltaje(V)	Eficiencia	Potencia(W)	Potencia Real(W)
24	100%	624	624.00
12	70%	8.64	12.34
5	70%	0.805	1.15
		Total	637.49

Con la ecuación (29) se encuentra la corriente necesaria de las baterías para alimentar a la plataforma.

$$I = \frac{P}{V} \quad (29)$$

Se reemplaza los datos de los cálculos previos con lo que se obtiene.

$$I = 26.46 \text{ A}$$

La ecuación (30) provee un estimado de la capacidad de una batería.

$$\text{Capacidad Bateria} = \text{Carga} \cdot \text{Tiempo de Funcionamiento} \quad (30)$$

Se diseña la plataforma para un tiempo de funcionamiento de 1 hora, con el cálculo de consumo se tiene que:

$$\text{Capacidad Bateria} = 26.46 \text{ Ah}$$

La plataforma requiere de una batería o un banco de baterías que entreguen 24 V y tengan una capacidad de 27 Ah.

3.2.6 DISEÑO DE CONTROL DE LA PLATAFORMA

El diseño de control de la plataforma describe la conexión, configuración y operación de los elementos que se montan en la plataforma.

En la Figura 3.35 se muestran los elementos que conforman el sistema de control de la plataforma.

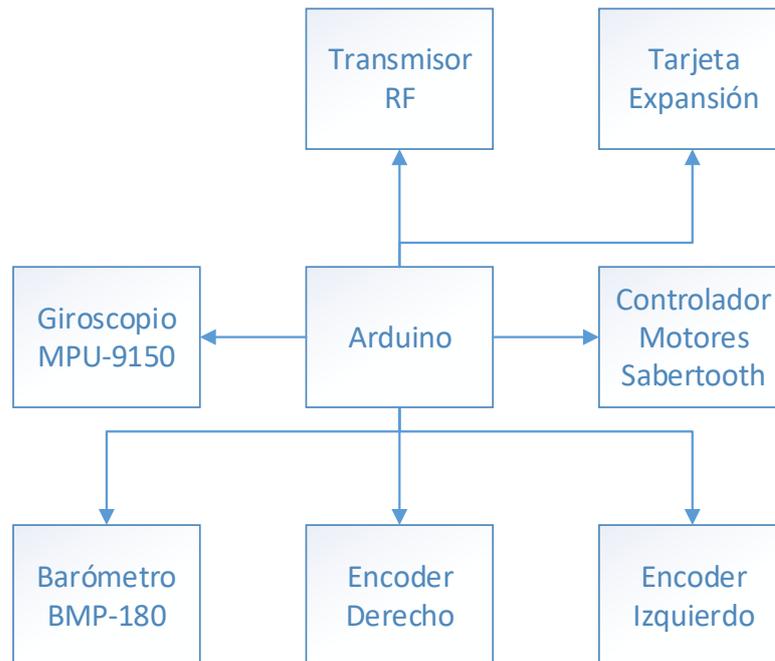


Figura 3.35 Diagrama elementos de Control Plataforma

3.2.6.1 Arduino

La placa Arduino controla por completo la plataforma, recibe y envía los datos a través del vínculo serial inalámbrico generado por los módulos de telemetría, recopila los datos de los sensores e interactúa con la tarjeta de potencia de los motores.

En la Figura 3.36 se muestra el funcionamiento de la tarjeta mediante el diagrama de flujo.

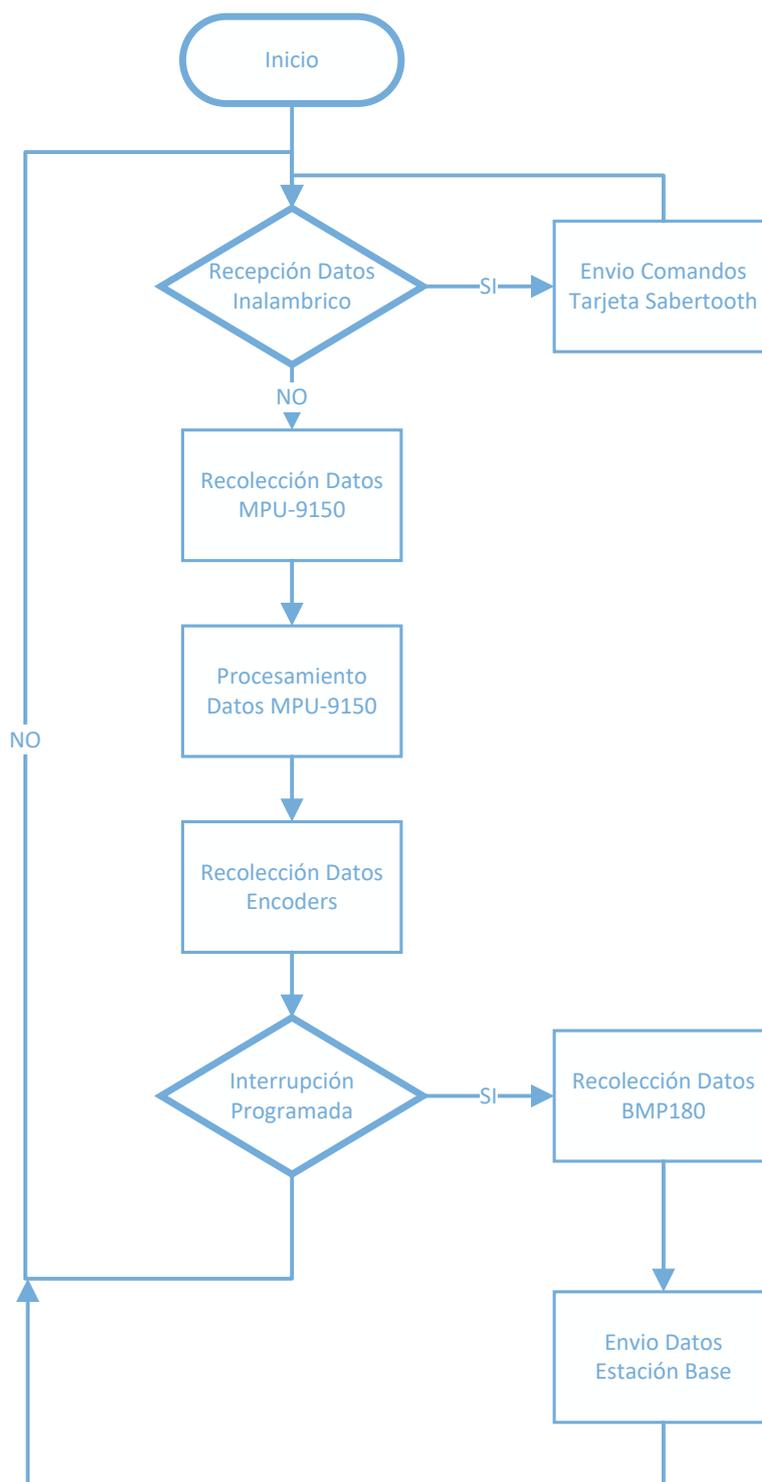


Figura 3.36 Diagrama de Flujo Arduino

La conexión de los elementos con la plataforma se detalla en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Conexiones Elementos de Control

Origen	Pin	Destino	Pin	Descripción	Color Cable
Arduino Mega	5V	MPU-9150	VCC	Alimentación 5V	NA
Arduino Mega	GND	MPU-9150	GND	Tierra	NA
Arduino Mega	SDA	MPU-9150	SDA	Comunicación I2C	NA
Arduino Mega	SCL	MPU-9150	SCL	Comunicación I2C	NA
Arduino Mega	5V	BMP-180	VIN	Alimentación 5V	NA
Arduino Mega	GND	BMP-180	GND	Tierra	NA
Arduino Mega	SDA	BMP-180	SDA	Comunicación I2C	NA
Arduino Mega	SCL	BMP-180	SCL	Comunicación I2C	NA
Arduino Mega	5V	Encoder 1	VCC(3)	Alimentación 5V	Rojo
Arduino Mega	GND	Encoder 1	GND(4)	Tierra	Negro
Arduino Mega	D2	Encoder 1	A(1)	Salida Encoder	Blanco
Arduino Mega	D3	Encoder 1	B(2)	Salida Encoder	Verde
Arduino Mega	5V	Encoder 2	VCC(3)	Alimentación 5V	Rojo
Arduino Mega	GND	Encoder 2	GND(4)	Tierra	Negro
Arduino Mega	D18	Encoder 2	A(1)	Salida Encoder	Blanco
Arduino Mega	D19	Encoder 2	B(2)	Salida Encoder	Verde
Arduino Mega	A8-A11	AUX	1-4	E/S Auxiliares	NA
Arduino Mega	5V	Sabertooth 2x32	5V	Alimentación 5V	Rojo
Arduino Mega	GND	Sabertooth 2x32	0V	Tierra	Negro
Arduino Mega	A14	Sabertooth 2x32	S1	Transmisión Serial	Blanco
Arduino Mega	A15	Sabertooth 2x32	S2	Recepción Serial	Verde
Arduino Mega	5V	Módulo Telemetría	5V	Alimentación 5V	Rojo
Arduino Mega	GND	Módulo Telemetría	0V	Tierra	Negro
Arduino Mega	D0	Módulo Telemetría	RX	Transmisión Serial	Blanco
Arduino Mega	D1	Módulo Telemetría	TX	Recepción Serial	Verde

Para la comunicación y configuración de los distintos sensores y dispositivos se usan las siguientes librerías:

- **Encoder:** Se usa la librería desarrollada por PJRC [26], esta librería permite el uso de encoders de cuadratura, implementando funciones para el uso de los mismos.
- **USB Sabertooth:** permite la comunicación con las tarjetas Sabertooth con funcionalidad USB, esta librería es proporcionada por el fabricante de la tarjeta [27]. Esta librería permite realizar las siguientes funciones:
 - Salida de motores con resolución de 12 bits
 - Salidas de potencia (configuradas previamente)
 - Freno de motor (freewheeling)
 - Rampas de aceleración y desaceleración de los motores
 - Lectura de corriente de motores
- **Timer:** facilita la creación de rutinas de interrupción periódicas en base al tiempo. Mediante esta librería [28] se calcula la velocidad del motor y se envía periódicamente la información de la plataforma a la estación base.
- **RTIMULib-Arduino:** esta librería permite la conexión de distintos sensores IMU(Inertial Measurement Unit) mediante el puerto I2C, estos sensores permiten la medición de ángulos de posición en el espacio mediante giroscopios, acelerómetros y magnetómetros.

3.2.6.2 CONFIGURACIÓN DE LA TARJETA SABERTOOTH 2X32

Se detalla la configuración de la tarjeta para el correcto funcionamiento de la plataforma. Se deben configurar ciertos parámetros físicamente mediante los selectores en la tarjeta y otros parámetros mediante el software de configuración DEScribe.

En la Tabla 3.21 se describe la configuración de los selectores usados en la plataforma.

Tabla 3.21 Configuración de selectores en la tarjeta Sabertooth 2x32

Selector	Estado	Descripción
1	OFF	Modo de operación
2	OFF	Modo de operación
3	ON	Alimentación por medio de baterías
4	ON	Comunicación mediante paquetes seriales
5	ON	Dirección 128 de la tarjeta
6	OFF	Sin parada de emergencia

Para la configuración de parámetros más específicos de la tarjeta se debe conectar la tarjeta mediante un cable USB a un computador y usar el programa DEScribe proporcionado por la compañía DIMENSION ENGINEERING.

En la Figura 3.37 se muestra la configuración para la comunicación serial de la tarjeta.

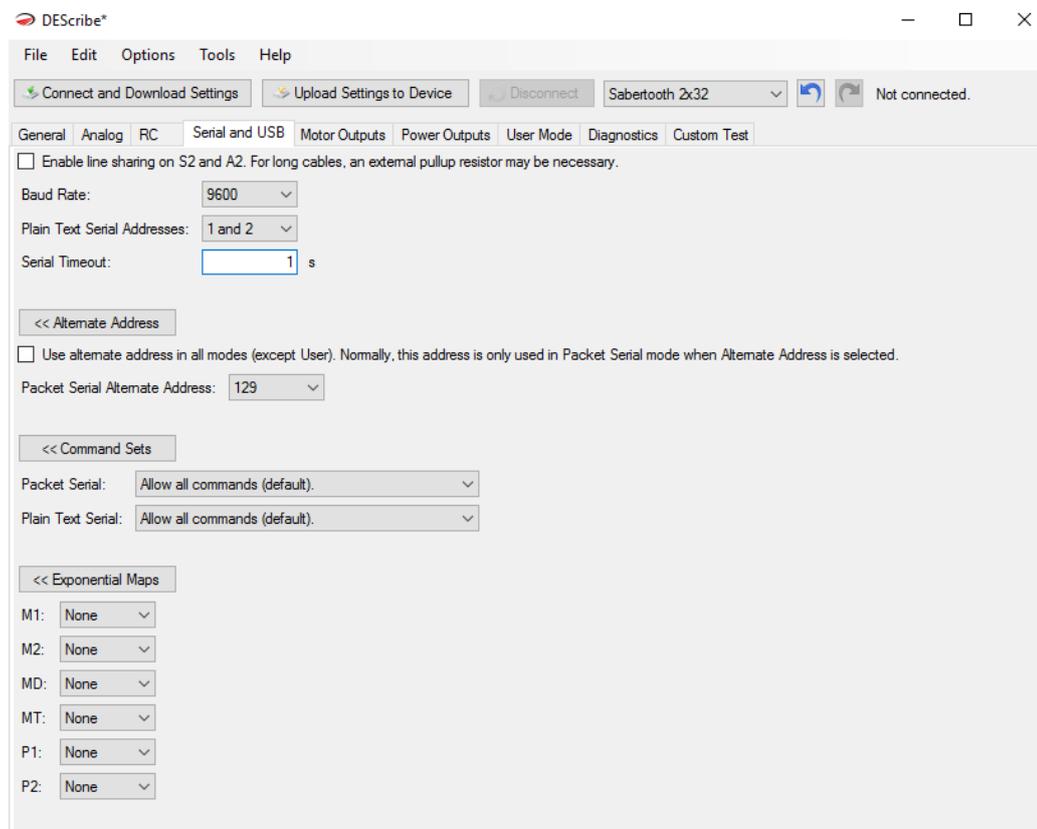


Figura 3.37 Pestaña configuración comunicación serial

3.2.6.3 CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS DE TELEMETRÍA

Los módulos de telemetría deben configurarse para cumplir con ciertos parámetros necesarios para la comunicación entre la plataforma y la estación base. A continuación se detalla los parámetros de configuración de los módulos.

- **Baud:** es la velocidad de transmisión de los datos mediante la estación base y el módulo remoto. El módulo permite las siguientes velocidades de conexión.
 - 1-1200 bps
 - 2-2400 bps
 - 4-4800 bps
 - 9-9600 bps
 - 19-19200 bps
 - 38-38400 bps
 - 57-57600 bps
 - 115-115200 bps
- **Air Speed:** Es la velocidad de conexión entre los módulos esta velocidad debe ser siempre mayor que la velocidad de transmisión de datos.
- **Duty Cycle:** Es el ciclo de trabajo de los módulos, este parámetro determina que porcentaje del tiempo se puede transmitir datos entre los módulos.
- **Tx Power:** Es la potencia de transmisión de los módulos, se pueden configurar las siguientes potencias de transmisión.
 - 1 = 1.3 mW
 - 2 = 1.5 mW
 - 5 = 3.2 mW
 - 8 = 6.3 mW
 - 11 = 12.5 mW
 - 14 = 25 mW
 - 17 = 50 mW
 - 20 = 100 mW
- **Net ID:** es un valor único que identifica a los módulos y permite establecer el enlace.

En la Tabla 3.22 se muestra la configuración en los radios para el proyecto.

Tabla 3.22 Valores de configuración de los módulos de telemetría

Parámetro	Valor	Descripción
Baud	57	Se usa una velocidad de transmisión de 57600 bps para la comunicación entre la plataforma y la estación debido a las especificaciones de la librería de ROS.
Air Speed	64	Se usa la velocidad inmediata mayor a 57 acorde a las especificaciones del fabricante.
Net ID	25	Valor para el reconocimiento entre los módulos.
Tx Power	20	Es el valor para tener el mayor alcance entre los módulos
# of Channels	50	Son los canales usados para la transmisión
Duty Cycle	100	Se usa todo el rango posible para la transmisión de datos

La configuración de los módulos se realiza mediante comandos AT por medio de un terminal serial. Mediante el programa 3DRRadio Config se puede realizar el cambio de los parámetros a través de una interfaz gráfica e intuitiva. En la Figura 3.38 se muestra la configuración necesaria de los módulos del proyecto en el programa.

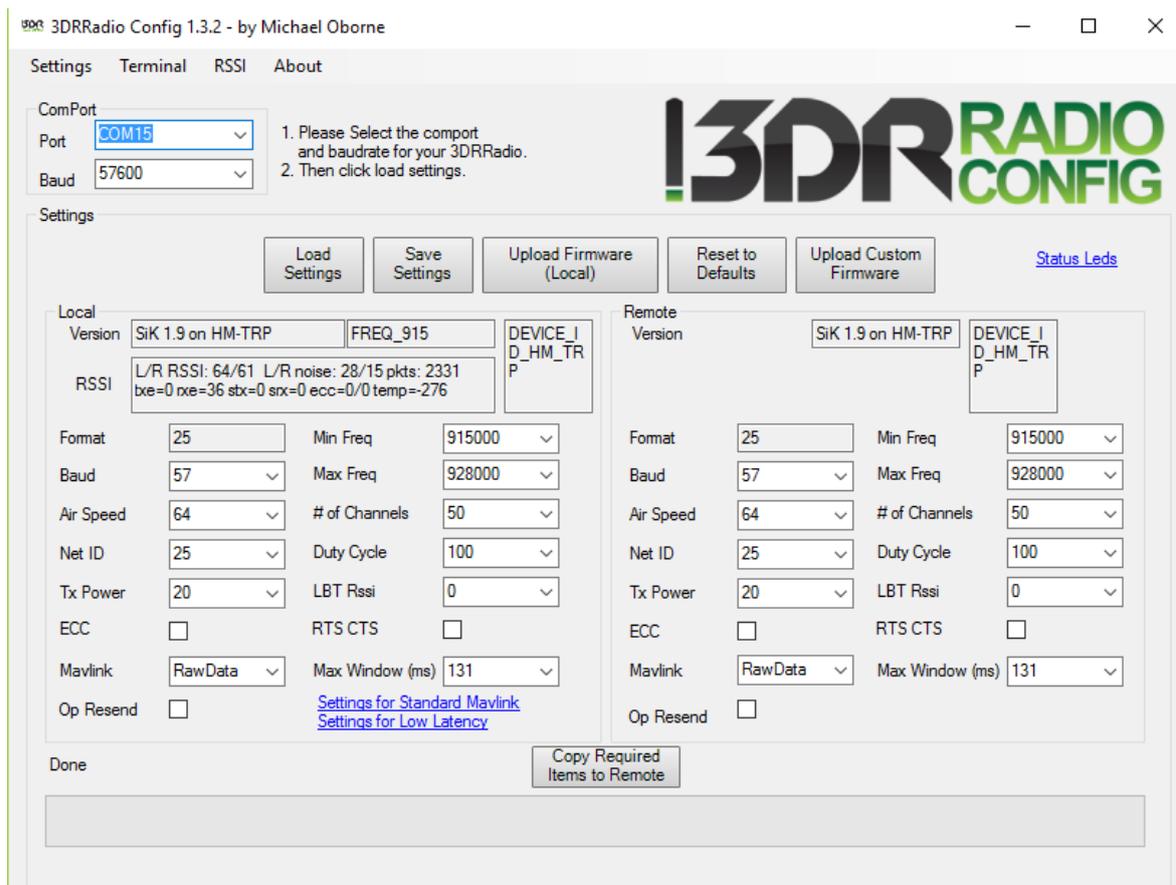


Figura 3.38 Configuración módulos en el programa 3DRRadio Config

3.2.7 INTERFAZ DE CONTROL

El diseño de la interfaz de control comprende el desarrollo de los elementos necesarios para crear el vínculo de conexión entre la plataforma y la estación base, en la estación base se tiene un computador personal al que se conectan los elementos mencionados en la sección 3.2.4.

Se necesita que el computador cumpla los siguientes requisitos mínimos para su funcionamiento como estación base:

- 3 Puertos USB 2.0
- Procesador 1.5 GHz
- Procesador 2 Núcleos
- Sistema Operativo Ubuntu 14.04
- 20 Gb Disco Duro

3.2.7.1 ROS

El proyecto usa la distribución de ROS Indigo Igloo que fue lanzada en Julio de 2014, existe la versión Jade Turtle lanzada en el año 2015 pero presenta solo soporte para 2 años, la versión que se usa en el proyecto tiene un soporte de 5 años en conjunto con la distribución de Ubuntu 14.04 LTS (Long Term Support).

ROS provee librerías y herramientas para el desarrollo de aplicaciones de robots, debido a la estructura de ROS se designa y desarrolla los paquetes, librerías, nodos, mensajes, suscriptores y publicadores necesarios para el funcionamiento, estos se detallan con sus respectivas estructuras y funciones.

Se tiene 2 acciones independientes en la estación base:

- Recuperación de imágenes de video desde la plataforma.
- Envío de comandos y recepción de información desde y hacia la plataforma.

3.2.7.2 Recuperación de imagen de la cámara

Para obtener las imágenes de la cámara en el computador se utiliza el proceso descrito en la Figura 3.39.



Figura 3.39 Proceso de adquisición de imagen

Para la visualización de las imágenes se usa los siguientes elementos de hardware:

- Computador
- Tarjeta de Captura de Video USB
- Transmisor y receptor de video inalámbrico
- Cámara de Video

En el apartado de software se necesita paquetes en ROS para la creación de la interfaz.

- **Paquete usb_cam**

El paquete usb_cam [29] permite la adquisición de imágenes desde una cámara web USB o una tarjeta de captura de video.

El paquete contiene un nodo que publica la imagen de la cámara a un tópico mediante el mensaje sensor_msgs/Image nativo de ROS.

3.2.7.3 Envío de comandos y recepción de información desde y hacia la plataforma

Esta acción permite el control de la plataforma mediante el envío de comandos de control a la misma, también permite la visualización de los datos recuperados por medio de sensores.

Para realizar estas acciones intervienen:

- Mando de Control (Joystick)
- Módulos de Telemetría
- Arduino y Sensores

El sistema de control de la plataforma consta de los siguientes nodos:

1. Nodo de la interfaz gráfica
2. Nodo del mando de control
3. Nodo de comunicación y control de la plataforma
4. Nodo de la plataforma
5. Nodo de recepción de datos

3.2.7.3.1 Paquete

Un paquete en ROS contiene nodos, librerías y mensajes, para realizar la comunicación y control de la plataforma se usan los siguientes paquetes:

- joy
- roserial
- roserial_arduino
- plataforma_uide

3.2.7.3.1.1 Paquete JOY

El paquete joy es un driver para un joystick o mando de control, este paquete contiene un nodo que publica un mensaje de nombre “Joy” el cual contiene el estado de los botones y ejes del mando de juegos.

En el mensaje “Joy” se publica el conjunto de datos cada vez que exista un cambio en el estado de alguno de los botones o los ejes.

Este paquete brinda soporte a cualquier joystick que sea compatible con Linux.

3.2.7.3.1.2 Paquete ROSSERIAL

Este paquete contiene un protocolo que permite encapsular mensajes de ROS y publicarlos a través de múltiples tópicos y servicios mediante un puerto serial o un socket de red.

El paquete sirve para la conexión con diferentes dispositivos o clientes a través de sus respectivas librerías, que permiten la creación de nodos para la comunicación con ROS.

Permite la conexión con los siguientes dispositivos:

- Tarjetas Arduino (Uno, Mega, Due, Leonardo)
- Tarjetas mbed
- Aplicaciones desarrolladas en Windows
- Dispositivos con Linux embebido como ruteadores
- Tarjetas M4C123GXL y TM4C1294XL de la compañía Texas Instrument

3.2.7.3.1.3 Paquete roserial Arduino

El paquete genera las librerías necesarias en el entorno Arduino para la creación de nodos y el uso de mensajes nativos de ROS así como también de mensajes personalizados creados por el usuario.

3.2.7.3.1.4 PAQUETE PLATAFORMA_UIDE

El paquete plataforma_uide tiene los mensajes y scripts generados para el control de la plataforma.

3.2.7.3.2 Mensajes

Se crean 2 mensajes especiales para el envío y recepción de datos entre la plataforma y la estación base.

3.2.7.3.2.1 Mensaje info_plataforma

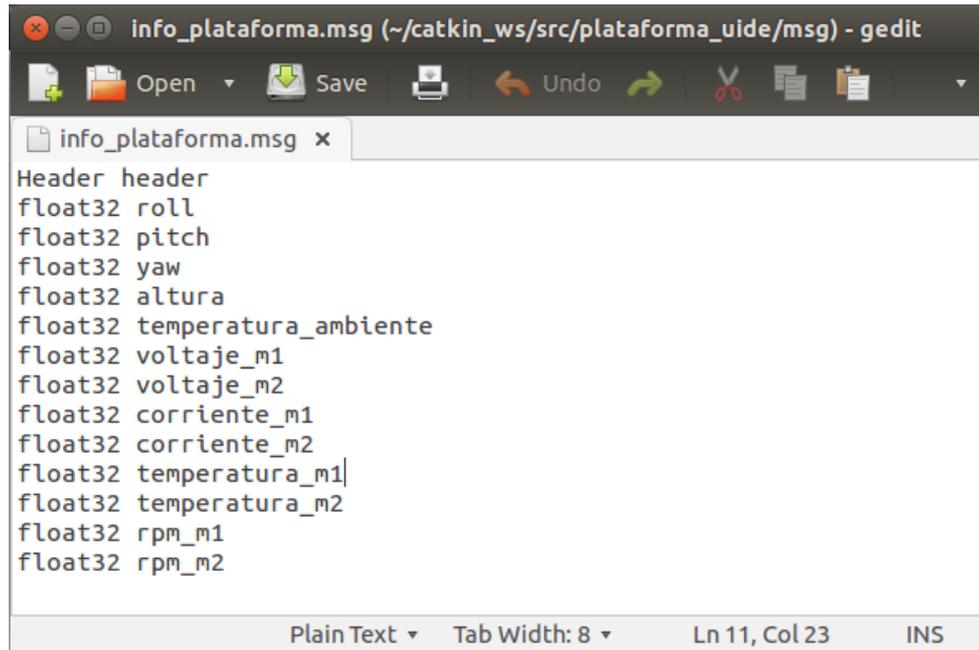
El mensaje info_plataforma contiene información sobre los sensores montados en la plataforma.

En la Tabla 3.23 se muestran el nombre del campo, el tipo y el origen de los datos de las variables del mensaje.

Tabla 3.23 Variables mensaje info

Dato	Tipo	Origen	Descripción
Roll	float32	MPU-9150	Angulo de rotación de la plataforma en el eje X
Pitch	float32	MPU-9151	Angulo de rotación de la plataforma en el eje Y
Yaw	float32	MPU-9152	Angulo de rotación de la plataforma en el eje Z
Altura	float32	BMP-180	Altura sobre el nivel del mar
Temperatura	float32	BMP-180	Temperatura ambiente
Corriente M1	float32	Sabertooth	Corriente alimentación Motor 1
Corriente M2	float32	Sabertooth	Corriente alimentación Motor 2
Voltaje M1	float32	Sabertooth	Voltaje alimentación Motor 1
Voltaje M2	float32	Sabertooth	Voltaje alimentación Motor 2
Temperatura M1	float32	Sabertooth	Temperatura Controlador Motor 1
Temperatura M2	float32	Sabertooth	Temperatura Controlador Motor 2
RPM M1	float32	Encoder 1	Velocidad Rotación Motor 1
RPM M2	float32	Encoder 2	Velocidad Rotación Motor 1

La creación del archivo con sus variables y tipo de dato del mensaje info_plataforma.msg se muestra en la Figura 3.40.



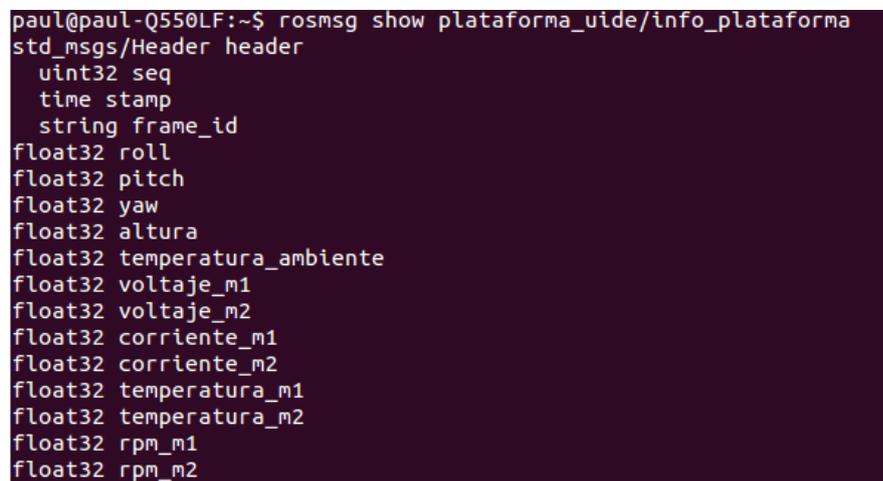
```

info_plataforma.msg x
Header header
float32 roll
float32 pitch
float32 yaw
float32 altura
float32 temperatura_ambiente
float32 voltaje_m1
float32 voltaje_m2
float32 corriente_m1
float32 corriente_m2
float32 temperatura_m1
float32 temperatura_m2
float32 rpm_m1
float32 rpm_m2
Plain Text Tab Width: 8 Ln 11, Col 23 INS

```

Figura 3.40 Archivo info_plataforma.msg

Para comprobar la creación del mensaje personalizado en el paquete se realiza una consulta a través del comando `rosmmsg` y el resultado se muestra en la Figura 3.41.



```

paul@paul-Q550LF:~$ rosmmsg show plataforma_uide/info_plataforma
std_msgs/Header header
  uint32 seq
  time stamp
  string frame_id
float32 roll
float32 pitch
float32 yaw
float32 altura
float32 temperatura_ambiente
float32 voltaje_m1
float32 voltaje_m2
float32 corriente_m1
float32 corriente_m2
float32 temperatura_m1
float32 temperatura_m2
float32 rpm_m1
float32 rpm_m2

```

Figura 3.41 Mensaje info_plataforma mediante el comando `rosmmsg`

3.2.7.3.2.2 Mensaje envio_plataforma

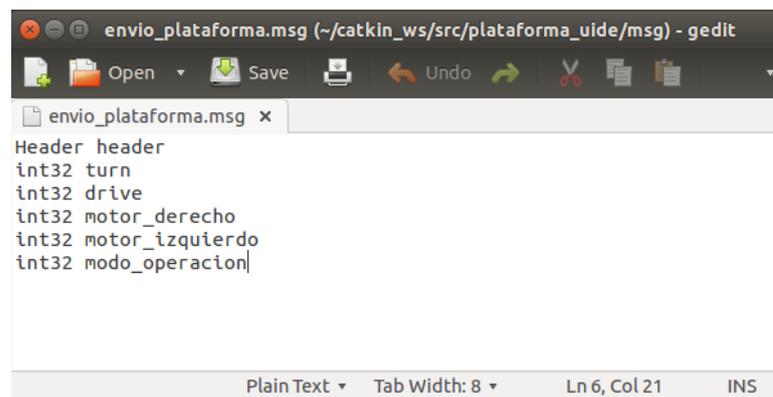
El mensaje `envio_plataforma` tiene los datos necesarios para el control del movimiento de la plataforma. En este mensaje se envía la velocidad deseada en los motores o la velocidad de manejo y dirección de la plataforma de acuerdo al modo de control configurado.

En la Tabla 3.24 se muestran las variables del mensaje envio_plataforma con el tipo de variable y una descripción de su función.

Tabla 3.24 Variables mensaje envio_plataforma

Variable	Tipo	Función
turn	int32	Fija el valor para que la plataforma gire en forma de control diferencial
drive	int32	Fija el valor para que la plataforma avance o retroceda en forma de control diferencial
motor_derecho	int32	Fija el valor para el movimiento del motor derecho
motor_izquierdo	int32	Fija el valor para el movimiento del motor izquierdo
modo_operacion	int32	Determina el modo de operación de la plataforma

En la Figura 3.42 se detalla el archivo envio_plataforma.msg.



```

envio_plataforma.msg (~/.catkin_ws/src/plataforma_uide/msg) - gedit
Header header
int32 turn
int32 drive
int32 motor_derecho
int32 motor_izquierdo
int32 modo_operacion
Plain Text Tab Width: 8 Ln 6, Col 21 INS

```

Figura 3.42 Archivo envio_plataforma.msg

La correcta creación y generación del mensaje en el entorno de ROS se muestra en la Figura 3.43.

```

paul@paul-Q550LF:~/catkin_ws$ rosmmsg show plataforma_uide/envio_plataforma
std_msgs/Header header
  uint32 seq
  time stamp
  string frame_id
int32 turn
int32 drive
int32 motor_derecho
int32 motor_izquierdo
int32 modo_operacion

```

Figura 3.43 Mensaje envio_plataforma mostrado en línea de comandos

3.2.7.4 RQT

RQT (Ros QT) es la interfaz gráfica predeterminada de ROS, la misma permite el desarrollo de interfaces gráficas las cuales se ejecutan dentro de la estructura de ROS. Cada interfaz gráfica desarrollada en RQT se denomina plugin o extensión, existen varios plugins de robots y nativos de ROS que proveen información del entorno, estos plugins se pueden adaptar a diferentes aplicaciones. QT es una librería multiplataforma que se programa nativamente mediante C++, RQT permite su programación mediante C++ o Python. Los diferentes plugins se pueden organizar dentro de una misma ventana de RQT como se muestra en la Figura 3.44 tomada de [30].

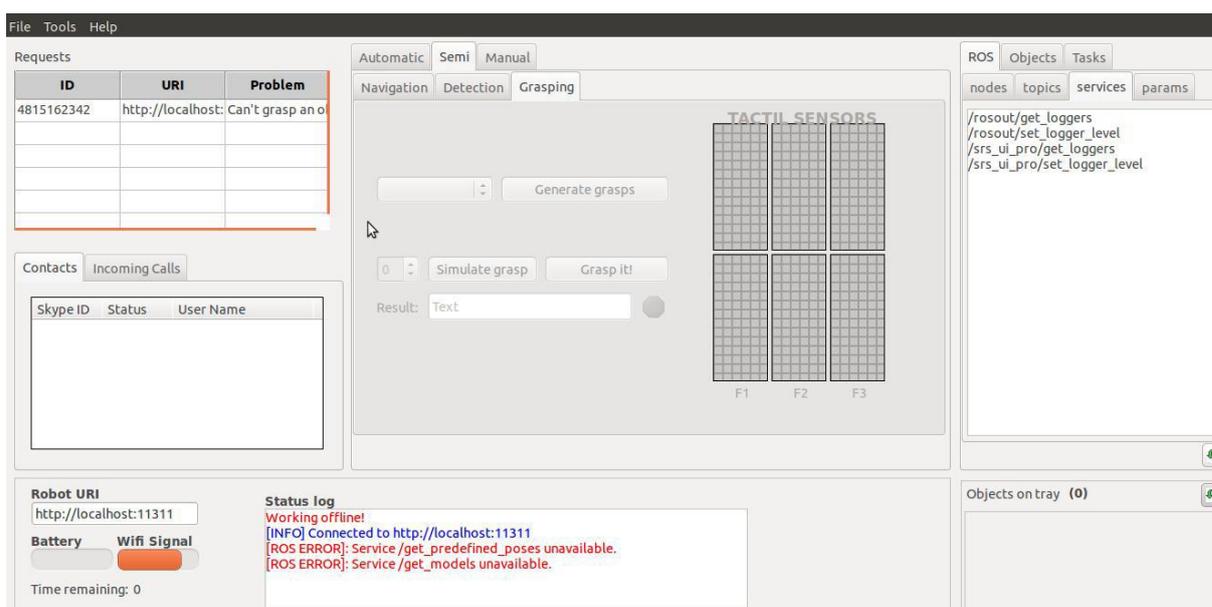


Figura 3.44 Interfaz Realizada en RQT

La ventana de monitoreo de variables se desarrolló mediante la aplicación Qt Designer que permite un desarrollo gráfico de los distintos controles e indicadores a mostrar. Qt Designer genera un archivo .ui, el mismo que es utilizado por RQT mediante Python para generar el plugin deseado.

3.2.7.5 Diseño de Interfaz gráfica de monitoreo y control

La interfaz gráfica muestra las diferentes variables de forma intuitiva para el usuario, estas variables se transmiten desde la plataforma a la estación base.

Esta interfaz se compone de 2 elementos:

1. Ventana de Video

En esta ventana se muestra la imagen proveniente de la cámara de video instalada en la plataforma mediante el proceso de recuperación de imagen. La ventana se muestra en la Figura 3.45.

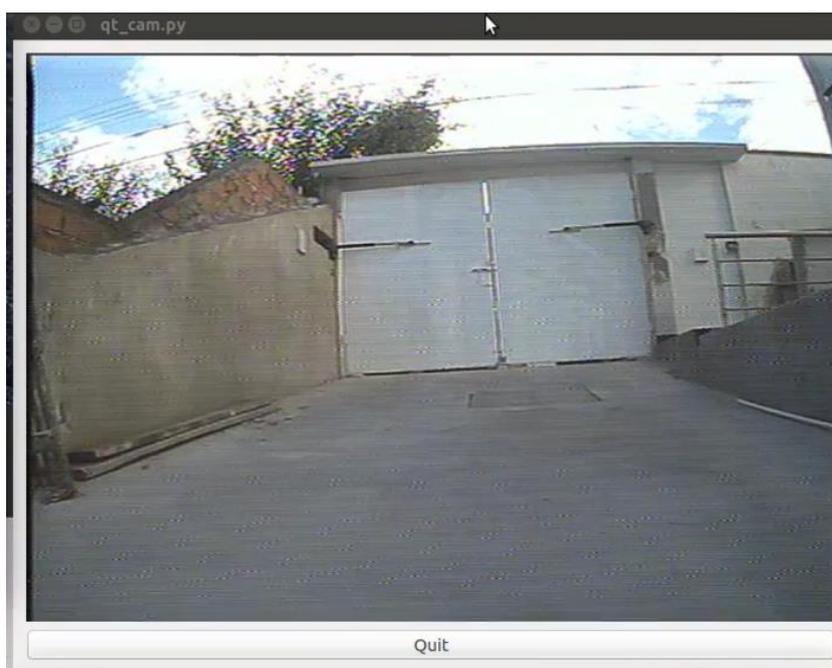


Figura 3.45 Ventana de Video

2. Ventana de monitoreo de variables

Las variables recuperadas de los sensores de la plataforma se muestran en esta ventana, estos valores permiten conocer el estado de la plataforma.

Esta ventana se muestra en la Figura 3.46.

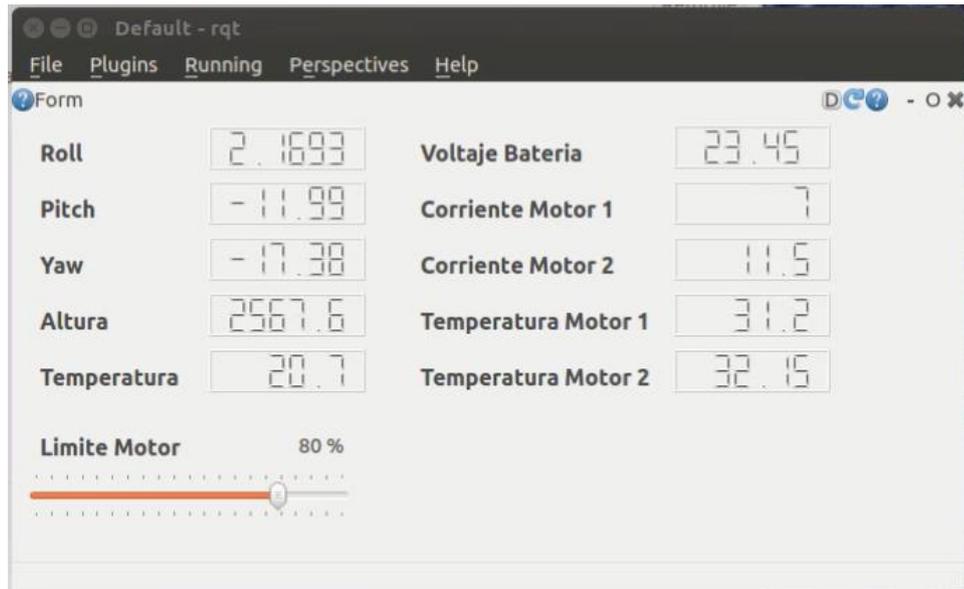


Figura 3.46 Ventana de monitoreo de variables

CAPÍTULO IV

En este capítulo se describen los procesos necesarios para la construcción de los distintos elementos de la plataforma y el prototipo funcional.

Con la plataforma ensamblada se verifica su funcionamiento con distintas pruebas que permitan comprobar las especificaciones del diseño.

4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA

La construcción de la plataforma incluye el proceso de adquisición, fabricación y ensamblaje de los distintos elementos diseñados y dimensionados.

Se divide el proceso de construcción en las siguientes secciones.

- Motor
- Eje
- Chasis
- Carrocería
- Shield

4.1.1 MOTOR

Se usan motores de sillas de ruedas eléctricas que cumplen con los requisitos de diseño.

El proceso requerido para la integración de los motores en la plataforma se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Proceso de Instalación de Motores

4.1.1.1 Piñón de Transmisión

Se coloca un piñón con las características provenientes de la etapa de diseño en el motor para la transmisión de potencia a las ruedas por medio de la cadena.

Las características del piñón son las siguientes:

- Número de Dientes: 28
- Paso Cadena: ANSI 40

El motor tiene un eje a la salida de la caja reductora de las siguientes características:

- Diámetro: 17 mm
- Largo: 30 mm
- Chavetera: 6x6x28 mm

El eje se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Eje Motor silla de ruedas

Se maquina el piñón a las dimensiones del eje mencionadas previamente (diámetro orificio y canal chavetera). Con lo que se obtiene el piñón de la Figura 4.3.



Figura 4.3 Piñón del Motor de 28 dientes

El piñón tiene una profundidad de 25.4 mm por lo que se fabrica un bocín para instalarlo en el eje.

En la Figura 4.4 se muestra el eje con el bocín y la chaveta instalados.



Figura 4.4 Fotografía Eje de Motor con chaveta y bocín.

En la Figura 4.5 se muestra el eje del motor con el piñón asegurado por medio de una tuerca al final del eje.



Figura 4.5 Eje del motor con piñón asegurado

4.1.1.2 Soporte Motor

Para el montaje del motor sobre el chasis se realizaron soportes a la medida, estos soportes se realizaron mediante platina de acero doblada a 90 grados y soldada con espaciadores. Para prevenir la oxidación de la pieza se aplicó un recubrimiento de pintura.

En la Figura 4.6 se muestra el soporte del motor.



Figura 4.6 Soporte Motor

4.1.1.3 Encoder

El Encoder se acoplo al eje del motor que inicialmente tenía un freno magnético.

En la Figura 4.7 se muestra el eje del motor al cual se acopla el Encoder.



Figura 4.7 Eje Motor

En la Figura 4.8 se muestra el motor con encoder acoplado.



Figura 4.8 Motor con Encoder

4.1.2 EJE

El eje con las dimensiones resultantes del cálculo en la etapa de diseño se fabrica a partir de un eje de acero de transmisión AISI 1018 de 1.25 pulgadas, el mismo se muestra en la Figura 4.9.



Figura 4.9 Eje de acero de 1.25 pulgadas

En la fabricación del eje se realizan operaciones en 2 máquinas herramientas, torno y fresadora.

- **Torno**

En el torno se realizan las siguientes operaciones:

- Refrentado
Se realiza el refrentado de las 2 caras a los extremos del eje.
- Cilindrado
Se reduce el diámetro del eje en las distintas secciones acorde al plano.
- Roscado
Se genera una rosca en el final del eje para la tuerca que asegura la llanta al mismo.
- Tronzado
Se realiza para insertar el anillo de retención del piñón en el eje.
- Chaflanado
Se realiza en los extremos del eje para facilitar la inserción de los componentes.

En la Figura 4.10 se muestra el eje terminado en el torno después de realizarse todos los procesos.



Figura 4.10 Eje maquinado en el torno

- **Fresadora**

En la fresadora se realizan los canales chaveteros para la inserción de las chavetas.

En la Figura 4.11 se muestra el canal chavetero para las ruedas.



Figura 4.11 Canal chavetero

Para el ensamblaje del eje se necesita de una prensa para la inserción del piñón maquinado con el ajuste especificado.

En la Figura 4.12 se muestra el eje insertado en la prensa hidráulica dentro del orificio del piñón.



Figura 4.12 Piñón insertado en el eje

Los rodamientos son deslizantes por lo que no se necesita de una prensa para la colocación de los mismos.

En la Figura 4.13 se muestra al eje con los rodamientos y el piñón insertado.

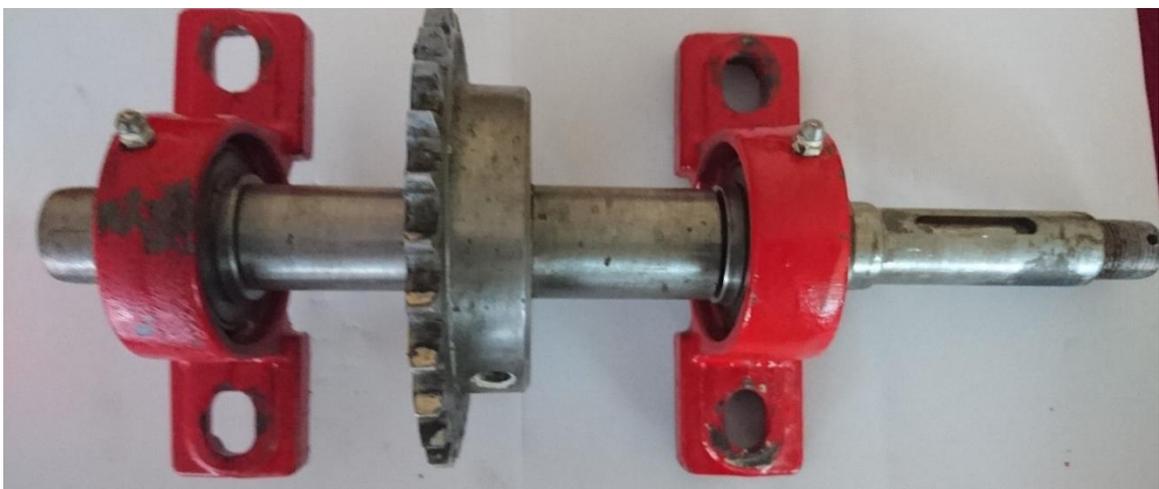


Figura 4.13 Eje con rodamientos y piñón

4.1.3 CHASIS

El chasis se fabricó a partir de tubo cuadrado de acero de 40 mm y 1.5 mm de espesor. Para el chasis se cortó el tubo a las medidas especificadas en los planos y se soldaron mediante soldadura MIG. En la Figura 4.14 se muestra el chasis con recubrimiento de pintura para proteger la estructura de la intemperie.



Figura 4.14 Chasis Pintado

En el chasis se montan los siguientes elementos:

- Motores mediante los soportes.
- Ejes con chumaceras.
- Banco de baterías.
- Caja de conexiones.
- Cableado.

En la Figura 4.15 se muestra el chasis con los ejes y los motores conectados mediante la cadena.



Figura 4.15 Chasis con Ejes y Motores

4.1.4 CARROCERIA

La carrocería protege a los elementos internos de la intemperie y del contacto de elementos mecánicos por el usuario, la misma comprende de 3 partes:

- Tapa Superior.
- 2 Tapas Laterales.

La carrocería de la plataforma se construyó en base a una plancha de acero de 1.4 mm. La plancha se dobló mediante una dobladora hidráulica de dientes, el patrón de doblado mejora la resistencia del material a distintas cargas.

En la carrocería se montan los siguientes elementos:

- Antenas
- Interruptor con Llave
- Conectores
- Cámara

Todos estos elementos se montan en la Tapa Superior. En la Figura 4.16 se muestra la Tapa Superior sin los elementos instalados.



Figura 4.16 Tapa Superior

La Tapa Superior está hecha con plancha de acero por lo que es necesario un recubrimiento para prevenir la oxidación de la misma.

En la Figura 4.17 se muestra la carrocería con la primera capa de pintura.



Figura 4.17 Carrocería Capa Base

En la Figura 4.18 se muestra la carrocería con la capa final de pintura de poliuretano.



Figura 4.18 Carrocería capa final de pintura

En la Figura 4.19 se muestra la parte posterior de la carrocería con las antenas, conectores y selector con llave instalados.



Figura 4.19 Componentes instalados carroceria.

En la parte interna de la carrocería se instalaron los cables para las conexiones del cargador de baterías, alimentación de la plataforma, cámara y antenas. Esto se muestra en la Figura 4.20.



Figura 4.20 Cableado Interno Carrocería

Para la conexión de los elementos entre la carrocería y el chasis se implementó un conector para todo el cableado tal como se muestra en la Figura 4.21.



Figura 4.21 Conector Eléctrico Chasis

4.1.5 RUEDAS

Las ruedas de las plataformas se adaptaron a partir de ruedas para carretillas, estas ruedas pueden soportar peso pero no están diseñadas para transmitir potencia.

Se realizaron 2 modificaciones en las ruedas para su correcto funcionamiento en la plataforma.

- **Bocín con canal chavetero.**

Se insertó un bocín como el de la Figura 4.22 fabricado con las características necesarias para acoplarse en los ejes de transmisión.



Figura 4.22 Bocín Ruedas plataforma

El bocín permite la transmisión de potencia de los motores a las ruedas a través de los ejes de transmisión.

Se muestra en la Figura 4.23 la rueda con el bocín insertado y asegurado con un cordón de suelda.



Figura 4.23 Rueda con Bocín

- **Refuerzo Pared**

Se reforzó la pared del aro mediante la adición de una arandela soldada tanto a la pared como al bocín del mismo, en la Figura 4.24 se muestra el aro reforzado con la arandela.



Figura 4.24 Aro reforzado

4.1.6 SHIELD ARDUINO

Para la conexión de los distintos sensores, actuadores y módulos a la placa Arduino se realiza un shield que se coloca encima de la Placa y en su parte superior provee las conexiones necesarias para los distintos elementos.

El shield es una placa de circuito impreso que conecta los elementos con la placa Arduino. Se muestra en la Figura 4.25 la placa en su etapa de fabricación sin perforaciones.

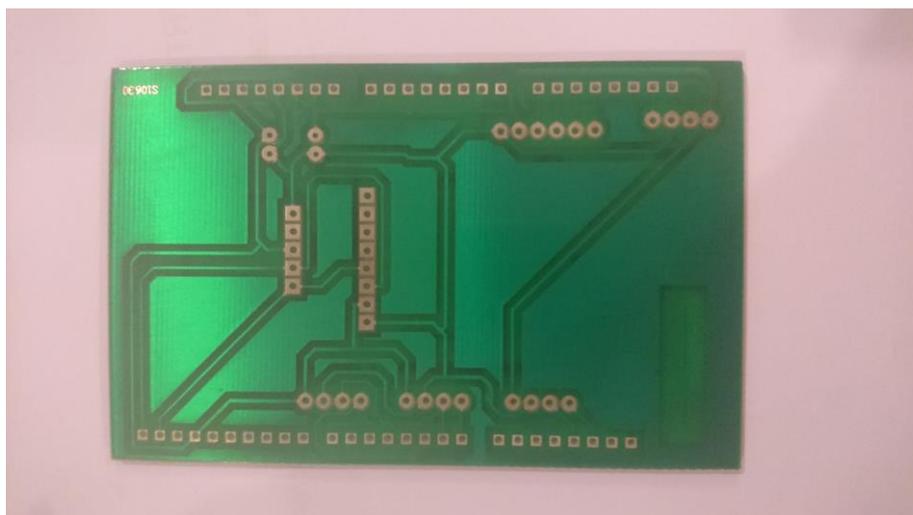


Figura 4.25 Vista Posterior Placa Circuito Impreso

En la Figura 4.26 se muestra el shield con los sensores montados y las conexiones para los distintos módulos y sensores.

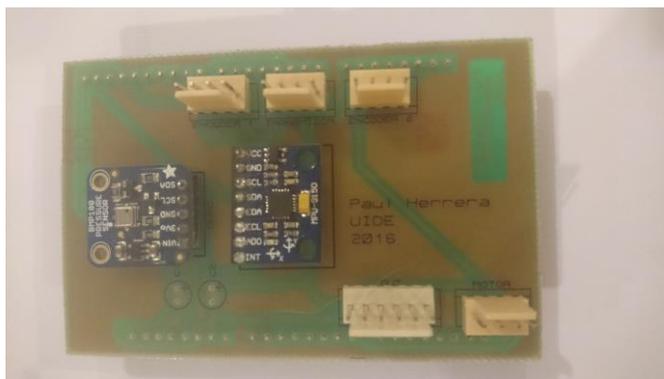


Figura 4.26 Shield Arduino

4.1.7 BANCO DE BATERÍAS

Se implementó un banco de baterías de 24 V y 14 Ah para la alimentación de la plataforma. Este banco de baterías está conformado por 4 baterías de 12 V y 7 Ah como la de la Figura 4.27.



Figura 4.27 Batería 12 V 7 Ah

En la Tabla 4.1 adaptada del Anexo 6 se muestran las dimensiones de las baterías utilizadas en la plataforma.

Tabla 4.1 Dimensiones de la batería

Largo	151 mm
Ancho	65 mm
Alto	93.5 mm
Peso	2.32 Kg

En la Tabla 4.2 se muestran las características eléctricas más importantes recopiladas del Anexo 6.

Tabla 4.2 Características Eléctricas

Voltaje Nominal	12 V
Numero de Celdas	6
Tiempo de Vida	5 Años
Capacidad Nominal	
Tasa de Descarga 20 Horas	7 Ah
Tasa de Descarga 10 Horas	6.8 Ah
Tasa de Descarga 5 Horas	5.65 Ah
Tasa de Descarga 1 Hora	4.56 Ah
Temperatura Operación	
Funcionamiento	-20 a 60 °C
Carga	-10 a 60 °C
Almacenamiento	-20 a 60 °C
Voltaje de Carga	
Modo Cíclico	14.5 a 14.9 V
Standby	13.6 a 13.8 V
Corriente Inicial de carga	1.8 A

En la Figura 4.28 se muestra un diagrama del arreglo de batería con sus conexiones en serie y paralelo con lo que se obtiene los 24 V necesarios para la plataforma.

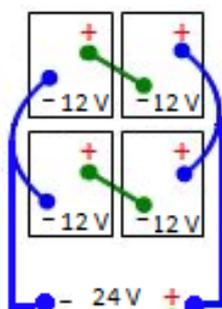


Figura 4.28 Arreglo baterías

En la Figura 4.29 se muestran las 4 baterías instaladas y conectadas en la plataforma.

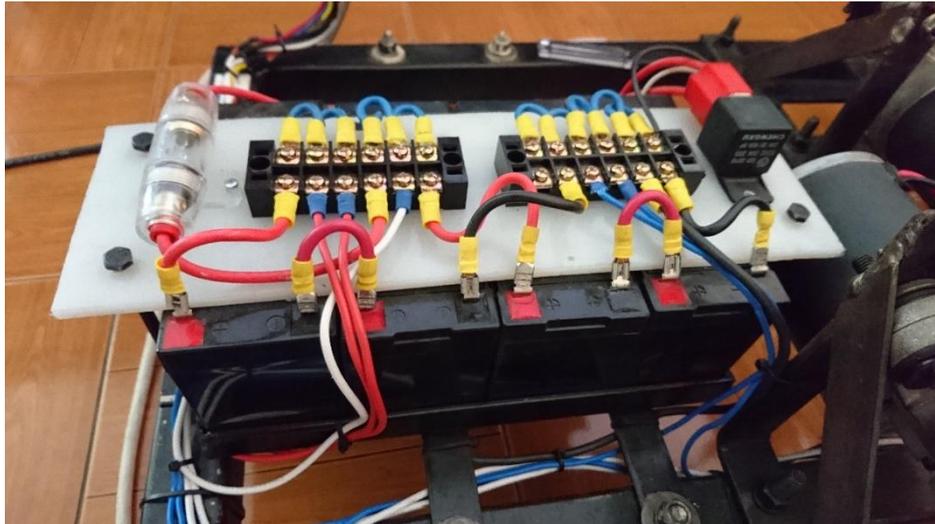


Figura 4.29 Banco de Baterías

4.1.7.1 Cargador de Baterías

Para la carga de las baterías se usa un cargador de baterías de silla de ruedas, debido a la disposición de las baterías en el arreglo descrito en la Figura 4.28 y con los datos de la Tabla 4.2 se tiene que se necesita un cargador para baterías de 24 V que provea una corriente inicial máxima de 3.6 A.

En la Figura 4.30 se muestra el cargador de baterías utilizado para la carga del banco de baterías.



Figura 4.30 Cargador de Baterías

El cargador tiene las características de la Tabla 4.3 que cumple los requerimientos del banco de baterías.

Tabla 4.3 Características cargador de baterías

Voltaje	24 V
Corriente	4 A
Conector	3 pines XLR
Tiempo de Carga	1-2 Horas

4.1.8 ENSAMBLAJE PLATAFORMA

El proceso para el ensamblaje de la plataforma mediante todos los componentes se muestra en la Figura 4.31.



Figura 4.31 Proceso de ensamblaje plataforma

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En las pruebas de funcionamiento se prueba las capacidades de la plataforma en distintos terrenos y bajo las diferentes condiciones de operación para la cual fue diseñada.

4.2.1 ADQUISICIÓN DE SEÑALES Y CALIBRACIÓN DE SENSORES

Objetivo

La plataforma tiene varios sensores que envían información sobre su estado a la estación base, estos datos ayudan al operario para determinar la posición de la plataforma.

Mediante esta prueba se comprueba que los datos de los sensores mostrados en la interfaz de usuario concuerden con la realidad de la plataforma.

Procedimiento

Para la medición de estos datos se inicia con la plataforma en una superficie plana, en la que se conocen cuáles son los ángulos de posición para recolectar los datos mediante la interfaz de usuario. La plataforma se desplaza para verificar la variación de los datos y regresa a su posición inicial para recolectar los datos.

Con los datos de la interfaz de la plataforma se realiza una comparación con los datos iniciales.

De ser necesario se realiza un calibración de los sensores para su correcto funcionamiento.

Resultados

De las pruebas realizadas se obtienen los datos de la plataforma a nivel en la Tabla 4.4 como se muestra en la interfaz de la Figura 4.32.

Tabla 4.4 Datos plataforma a nivel

	Roll	Pitch
Plataforma	0.28	-6.17
Real	0	0

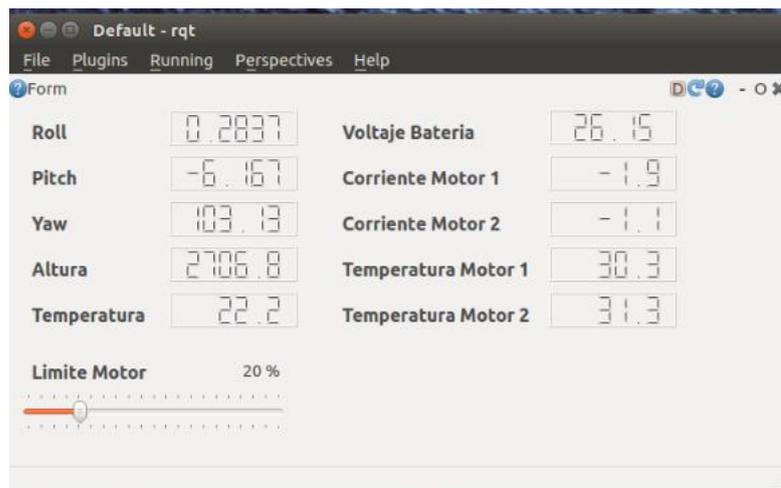


Figura 4.32 Mediciones iniciales plataforma

Los datos de la Tabla 4.5 se realizaron al colocar la plataforma en una superficie con 15 grados de inclinación para verificar la variación del ángulo de cabeceo o pitch.

Tabla 4.5 Datos plataforma inclinación de 15 grados (pitch)

	Roll	Pitch
Plataforma	0.28	9.56
Real	0	15

En la Tabla 4.6 se realizó la misma prueba para el ángulo de cabeceo pero la ubicación de la plataforma varía en 90 grados para encontrar el ángulo de alabeo o roll.

Tabla 4.6 Datos plataforma inclinación 15 grados (roll)

	Roll	Pitch
Plataforma	15.35	-5.98
Real	15	0

Después de las pruebas y resultados se realiza una corrección debido offset en el ángulo de cabeceo, realizada la calibración se obtuvo los datos en la interfaz que se muestra en la Figura 4.33.

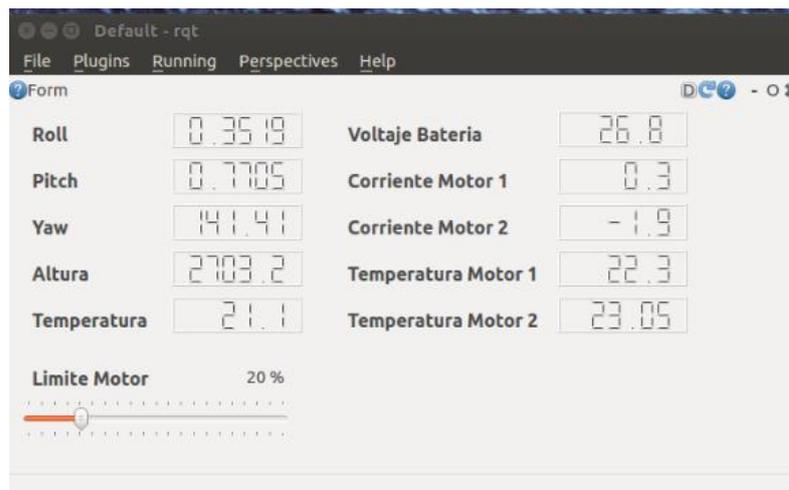


Figura 4.33 Mediciones Finales Plataforma

- La calibración del sensor de inclinación de la plataforma mediante escenarios predefinidos permite establecer el error y realizar la corrección.
- El error del sensor de inclinación se debe al montaje del mismo en la plataforma.

4.2.2 AUTONOMÍA DE FUNCIONAMIENTO

Objetivo

Mediante esta prueba se busca obtener la autonomía real de la plataforma en los distintos terrenos de operación. Se definen las siguientes condiciones iniciales para la prueba:

- Carga inicial de las baterías:
El banco de baterías con una carga de 100%.
- Presión de los neumáticos:
Todos los neumáticos con una presión de 30 PSI.
- Equipos:
Todos los periféricos necesarios para el funcionamiento de la plataforma se encuentran en funcionamiento.

Debido a la estructura de la plataforma, esta puede desplazarse en una trayectoria lineal con un consumo bajo de energía, por otro lado para rotar sobre su propio eje necesita una mayor energía debido a que se debe superar la fuerza producida por el rozamiento estático.

Procedimiento

El tiempo de operación inicia con el movimiento de la plataforma cumpliendo las condiciones iniciales para la prueba y termina en el momento en el cual la plataforma no pueda realizar giros sobre su propio eje.

En la Figura 4.34 y Figura 4.35 se muestra la plataforma sobre algunos terrenos en los que se realizaron las pruebas.



Figura 4.34 Plataforma sobre Césped



Figura 4.35 Plataforma sobre Arena

Resultados

De las pruebas realizadas con los criterios descritos previamente se obtienen los datos que se muestran en la Tabla 4.7, las pruebas se realizaron en terrenos con inclinación variable.

Tabla 4.7 Resultados Pruebas de Autonomía

Superficie	Tiempo de Funcionamiento (Minutos)	Inclinación Máxima
Césped	18	11%
Césped y Tierra Compacta	16	89%
Arena	12	9%
Concreto	16	33%
Concreto con Pintura	20	18%
Asfalto	18	16%
Promedio	16.67	

- Se logró una inclinación máxima de 89% durante las pruebas de funcionamiento que equivale a 40 grados con respecto a la horizontal, la limitante para alcanzar mayores inclinaciones se encuentra en el rozamiento entre las ruedas de la plataforma y el terreno de exploración.

Se realiza la Tabla 4.8 con los datos de las secciones 3.2.5 y 4.1.7 en el que se muestra el tiempo de funcionamiento estimado en relación a la capacidad de las baterías.

- La capacidad teórica del banco de baterías de 27 Ah es resultante del cálculo obtenido en la sección 3.2.5 para una autonomía de 60 minutos.
- La capacidad experimental mediante el arreglo de baterías descrito en la sección 4.1.7 es de 14 Ah.
- La capacidad real de las baterías implementada se reduce a 9.12 Ah debido a la tasa de descarga utilizada en el proyecto que excede a la diseñada por el fabricante.

Tabla 4.8 Capacidad del banco de baterías

	Capacidad Baterías (Ah)	Tiempo de Funcionamiento (Minutos)
Teórica	27	60
Experimental	14	31.11
Práctico	9.12	20.27

- La autonomía promedio de la plataforma de las pruebas realizadas en los distintos terrenos de aplicación fue de 16.67 minutos cumple en un 82.25% con la autonomía real del banco de baterías calculada en 20.27 minutos.
- La autonomía de la plataforma tiene una relación directa a la capacidad del banco de baterías de la misma.
- Al aumentar la tasa de descarga de las baterías se reduce su capacidad nominal.
- El voltaje del banco de baterías cae debajo de los 24 V en ciertas maniobras que requieren de una mayor corriente inicial.

4.2.3 ALCANCE EN EXPLORACIÓN

Objetivo

El alcance de la plataforma se define por la distancia máxima que se puede alcanzar con la misma desde la estación base, a esta distancia se debe tener la información para realizar maniobras y regresar a la estación base.

Procedimiento

Se realiza la medición de la distancia y trayectoria de la plataforma mediante la instalación temporal de un GPS sobre la plataforma durante la prueba.

Se muestra el GPS sobre la plataforma en la Figura 4.36.



Figura 4.36 Plataforma con GPS instalado

Las pruebas se realizan en un terreno sin obstáculos para obtener el mayor alcance posible, en la Figura 4.37 se muestra la plataforma en una prueba de alcance realizada en un espacio abierto.



Figura 4.37 Plataforma prueba de alcance

En la Figura 4.38 se muestra la trayectoria obtenida del GPS sobrepuesta en el mapa en la ubicación de la prueba.



Figura 4.38 Trayecto de prueba

Resultados

La Tabla 4.9, muestra la latencia promedio de acuerdo a la distancia después de las pruebas realizadas, se presentan los datos de distancia entre la estación y la plataforma y la latencia de los datos que se reciben en la interfaz, los datos se envían desde plataforma cada segundo y al ser verificados se muestran en la interfaz.

Tabla 4.9 Latencia de los Datos de Transmisión de la Plataforma

Distancia desde la Estación	Latencia de los datos de Transmisión
0	1
10	1
20	1
30	1.2
40	1.6
50	1.4
60	2
70	2.4
80	3
90	3.4

100	3.4
110	3.8
120	4.4
130	5
140	5.33
150	6.5
160	7

En la Figura 4.39 se muestra como varía la latencia de los datos en relación a la distancia.

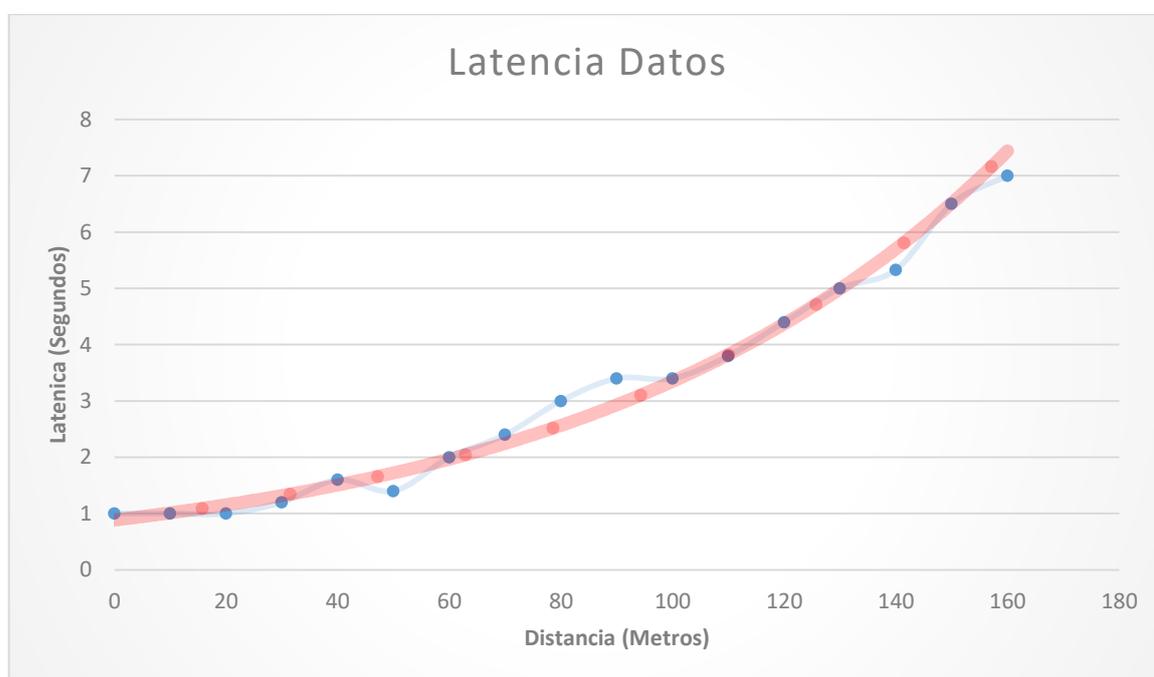


Figura 4.39 Latencia Datos

- La latencia en la recepción de los datos desde la plataforma aumenta de forma exponencial con respecto a la distancia hasta perder la comunicación.
- Los datos de control enviados a la plataforma se mantienen estables hasta la desconexión entre los radios de comunicación a una distancia máxima de 160m.
- El mensaje de información tiene una longitud de 52 bytes mientras que el de control de 20 bytes, debido a la longitud de los mensajes la transmisión toma

más tiempo, por lo que la probabilidad de que se filtre ruido y que no llegue el mensaje de forma correcta a destino es mayor.

- Debido a la verificación de los mensajes mediante software solo se muestran los mensajes correctos, esto ocasiona que la latencia de datos de información se incrementa respecto a la distancia.

4.3 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costo comprende el valor de los materiales y los servicios empleados para la construcción del prototipo de la plataforma.

Los materiales comprenden productos terminados y materiales que se transforman mediante distintos procesos de fabricación en elementos de la plataforma. En la Tabla 4.10 se detallan los elementos con su cantidad y valor.

Tabla 4.10 Materiales Prototipo

Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
2	Motores DC 24v con Reductora	\$ 150.00	\$ 300.00
1	Eje Acero 1 1/8 pulgadas 1.5 m	\$ 60.00	\$ 60.00
1	Tubo Cuadrado 40x40x1.2 6m	\$ 32.00	\$ 32.00
6	Piñones ANSI 40 28T	\$ 7.50	\$ 45.00
1	Cadena ANSI 40 3m	\$ 21.50	\$ 21.50
1	Plancha Acero 1.4	\$ 24.30	\$ 24.30
8	Rodamientos 1/4 Pulgadas	\$ 8.50	\$ 68.00
4	Llantas de Carretilla	\$ 15.60	\$ 62.40
4	Batería 12 V 7 Ah	\$ 22.50	\$ 90.00
1	Arduino MEGA 2560 R3	\$ 28.00	\$ 28.00
1	Acelerómetro MPU-9150	\$ 19.50	\$ 19.50
1	barómetro BMP-180	\$ 12.50	\$ 12.50
1	Cámara de CCTV	\$ 30.00	\$ 30.00
1	Kit Transmisión Video	\$ 35.00	\$ 35.00
1	Kit Transmisión RF (Módulos SIK)	\$ 29.90	\$ 29.90
1	Electrónicos Varios	\$ 15.00	\$ 15.00
1	Extras	\$ 350.00	\$ 350.00
		Total	\$ 1,223.10

En la categoría Extras se comprende distintos elementos que no se pueden cuantificar tales como:

- Consumibles (Cables ,Discos de Corte, Material Soldadura)
- Gastos de Transporte
- Servicios
- Pintura
- Conectores
- Terminales
- Pernos, tuercas y tornillos

En la Tabla 4.11 se detallan el valor de los servicios de fabricación contratados para la construcción de los elementos de la plataforma.

Tabla 4.11 Servicios de Fabricación

Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
1	Corte y soldadura tubo (chasis)	\$ 130.00	\$ 110.00
4	Maquinado Ejes de Transmisión	\$ 70.00	\$ 280.00
6	Maquinado Piñones de Transmisión	\$ 15.00	\$ 90.00
1	Fabricación Circuito Impreso	\$ 25.00	\$ 25.00
1	Corte y Doblado plancha	\$ 35.00	\$ 35.00
		Total	\$ 540.00

Mediante la suma de los valores de materia prima y servicios se obtiene que la plataforma tuvo un valor de fabricación de **\$1,763.20** (Mil setecientos sesenta y tres dólares con 20 centavos) ,en este costo no se incluye el valor de desarrollo de la ingeniería, ni el valor agregado del producto.

Debido a que el desarrollo del software de control se realizó mediante el uso de software libre no es necesario la compra de ninguna licencia para la operación del mismo.

CONCLUSIONES

- Se construyó un prototipo de plataforma móvil de exploración de exteriores teleoperada con los elementos disponibles adaptados a las necesidades del proyecto, la plataforma tiene un peso de 56 Kg , una autonomía máxima de 20 minutos y un alcance de exploración máxima de 160 m.
- La teleoperación se realizó de manera intuitiva y segura con la información proveniente de los sensores instalados en la plataforma.
- La realización de la interfaz de control y de comunicaciones mediante ROS permitió la integración de periféricos en el proyecto que pueden ser reemplazados según las necesidades del proyecto sin cambios de fondo debido a la modularidad del software.
- La plataforma al ser construida por módulos permite la incorporación de nuevos elementos así como la repotenciación de los existentes tales como el banco de baterías y los radios de comunicación.

RECOMENDACIONES

- La configuración de las baterías de la plataforma puede implementarse mediante una batería única con las características necesarias para lograr la autonomía deseada, la tarjeta de potencia provee compatibilidad con batería SLA y de iones de litio que tiene una mejor relación peso/ potencia que las usadas en el proyecto.
- Los módulos de comunicaciones del proyecto pueden ser intercambiados directamente por módulos RFD900 que proveen un mayor alcance.
- Las antenas utilizadas en la plataforma y en la estación base son omnidireccionales y de baja eficiencia, en la estación base se pueden reemplazar por antena direccionales de mayor potencia e implementar un sistema de seguimiento para incrementar el rango.
- Los módulos analógicos para la recuperación de imagen pueden cambiarse por módulos de mayor potencia y resolución de así requerirse.
- La estructura por ser del tipo chasis con carrocería tiene un peso mayor que la de una carrocería compacta, el chasis en fase de prototipo permite la incorporación de distintos elementos de desarrollo con mayor rapidez.
- Las ruedas para el proyecto no son diseñadas para ser utilizadas bajo tracción, se adaptaron en base al desarrollo del mismo, con las adaptaciones se logró un correcto funcionamiento de las ruedas en la plataforma. El uso de ruedas diseñadas para ser utilizadas bajo tracción reduciría el stress de las mismas en ciertas condiciones de uso que podrían ocasionar una falla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SRI. (2015) Artificial Intelligence Center. [Online]. <http://www.ai.sri.com/shakey/>
- [2] MIT. (2015) Biomimetic Robotics Lab.
- [3] ROS. (2014, Mayo) ROS. [Online]. <http://wiki.ros.org/es>
- [4] Robotnik. Guardian. [Online]. <http://www.robotnik.eu/mobile-robots/guardian/>
- [5] ROS. (2015, Octubre) Robotnik Automation Guardian. [Online]. <http://wiki.ros.org/Robots/Guardian>
- [6] Robohib. (2014, Marzo) ROS 101: drive a husky. [Online]. <http://robohub.org/ros-101-drive-a-husky/>
- [7] ROS. (2015, Marzo) ABB. [Online]. <http://wiki.ros.org/abb>
- [8] ROS. (2014, Junio) RQT Graph. [Online]. http://wiki.ros.org/rqt_graph
- [9] ROS. (2015, Jan.) msg - ROS Wiki. [Online]. <http://wiki.ros.org/msg>
- [10] Spong Hokayeng. (2008, Julio) Award-Winning Paper Looks at Evolution of Gentler Robots. [Online]. <http://www.utdallas.edu/news/2008/07/08-001.php>
- [11] Electrical Engineering Books. (2016) Typical Brushed Motor in Cross-Section. [Online]. <http://eee-books01.blogspot.com/2015/06/typical-brushed-motor-in-cross-section.html>
- [12] Scale Model Exchange. (2013, Enero) Traction Motors. [Online]. <http://www.smex.net.au/reference/Motors02.php>
- [13] Eduardo J. Carletti. (2015) Control de motores de CC. [Online]. http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_ControlAncho.htm
- [14] Karl J. Aström and Tore Hägglund, "Control PID," in *Control PID avanzado*. Madrid: Pearson Educación, 2009, pp. 81-114.
- [15] LibreOffice. Paquete de Oficina Libre. [Online]. <https://es.libreoffice.org/>
- [16] Clearpath Robotics. (2013) HUSKY UGV. [Online]. <http://www.clearpathrobotics.com/husky/features/>
- [17] Rogers Chris. (2010) The Mega BOT. [Online]. http://www.inspectorbots.com/Mega_Bot.html

- [18 J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*. New York: John Wiley & Sons, INC.,
] 2001.
- [19 Richard G Budynas and j. Keith Nisbett, "Shaft and Shaft Components," in
] *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill, 2011, pp. 359-
409.
- [20 Richard G. Budynas and J. Keith Nisbet, "Cojinetes de Contacto Rodante," in
] *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Miguel Rios, Ed. Mexico, Mexico:
McGraw Hill, 2008, ch. 11, pp. 549-596.
- [21 Robert L Mott, "Flexiones de Vigas," in *Resistencia de Materiales*, Luis Miguel
] Cruz Castillo, Ed. Mexico D.F., Mexico: Pearson Education, 2009, ch. 9, pp. 452-
525.
- [22 Robert L Mott, "Apendice A-25," in *Resistencia de Materiales*, Luis Castillo, Ed.
] Mexico, Mexico: Pearson Education, 2009, pp. 738-742.
- [23 InvenSense. (2016) MPU-9150. [Online].
] <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9150/>
- [24 Adafruit. BMP-180 Barometric Pressure/ Temperature/ Altitude. [Online].
] <https://www.adafruit.com/products/1603>
- [25 Arduino. Compare Board Specs. [Online].
] <https://www.arduino.cc/en/Products/Compare>
- [26 PJRC. (2015, Junio) Encoder Library. [Online].
] https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Encoder.html
- [27 Dimension Engineering. USB Sabertooth Packet Serial Library for Arduino.
] [Online].
[https://www.dimensionengineering.com/software/USBSabertoothArduinoLibrary/
html/](https://www.dimensionengineering.com/software/USBSabertoothArduinoLibrary/html/)
- [28 Richards Tech. RTIMULib-Arduino. [Online]. [https://github.com/richards-
\] tech/RTIMULib-Arduino](https://github.com/richards-tech/RTIMULib-Arduino)
- [29 ROS. usb_cam. [Online]. http://wiki.ros.org/usb_cam
]
- [30 Robotnik. (2013, Febrero) Interfaces de Usuario en ROS. [Online].
] <http://www.robotnik.es/interfaces-de-usuario-en-ros/>

