

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Desarrollo de prototipo de plataforma autónoma para exploración

José David Cáceres Sánchez
Siegfried Tieber Iguarán

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniería Mecánica

Quito, martes 30 de noviembre del 2010

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Desarrollo de prototipo de plataforma autónoma para exploración

**José David Cáceres Sánchez
Siegfried Tieber Iguarán**

Laurent Sass
Director de la Tesis

Omar Aguirre
Miembro del Comité de Tesis

Pedro José Meneses
Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo Proaño
Decano del colegio de
Ciencias e Ingeniería Politécnico

Quito, martes 30 de noviembre del 2010

© **Derechos de autor**
José David Cáceres Sánchez
Siegfried Tieber Iguarán

2010

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica para investigación. Este prototipo se basa en la integración de un sinnúmero de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos con el objetivo de establecer una plataforma móvil con habilidades básicas de autonomía para exploración y navegación. Adicional al modo de funcionamiento autónomo, la plataforma también cuenta con un modo de trabajo a radio control, permitiendo así, una intervención directa por parte del usuario.

La plataforma posee 3 sensores: GPS, brújula electrónica y un sensor de ultrasonido. Se utilizó un computador portátil como elemento principal en la integración de los elementos mecánicos y electrónicos. En base a la información recibida de los sensores, el computador envía señales al controlador digital de los motores. El modo de locomoción adoptado es el de Skid Steer con 4 ruedas. Está equipado con dos motores DC, cada uno de los cuales maneja el par de ruedas de su lado respectivo. Los motores son gobernados por el controlador digital. Dentro del sistema mecánico, se destaca la modularidad de la transmisión de las ruedas. Con esta característica se desea extender la adaptabilidad del móvil para que pueda acoger otras modalidades de locomoción; como por ejemplo: sistemas de oruga, ó ruedas diferenciales.

Por medio de este sistema integrado, se logró establecer capacidades de autonomía y navegación, como son: auto-posicionamiento, orientación y avance hacia una posición objetivo. Con el presente prototipo, se pretende dar los primeros pasos en lo que respecta a investigación y desarrollo de plataformas robóticas con capacidades de autonomía, control, fiabilidad y adaptabilidad más elevadas que se realicen a futuro.

Abstract

This work involves the design and construction of a prototype of a robotic platform for to be used as a test bed. The prototype is based on the integration of mechanical, electrical and electronic equipment in order to establish a mobile platform with basic autonomous skills of exploration and navigation. In addition to the autonomous mode, the platform also features a radio controlled mode, thus allowing a direct intervention by the user.

The platform has 3 sensors: GPS, electronic compass and an ultrasonic ranger. We used a laptop as the main element in the integration of the mechanical and electronic components. Based on the information received from the sensors, the computer sends commands to the digital motor controllers. The locomotion adopted is the Skid Steer with 4 wheels. It is equipped with two DC motors; each one handles the pair of wheels of their own side. The motors are controlled by the digital controller. An important feature of the mechanical system is the modularity of the drive train. By this means, the adaptability of the mobile is extended, so that the platform can adopt other forms of locomotion such as: tracks or wheel differential.

Through this integrated system, autonomy and navigation capabilities were established, such as: self-positioning, orientation and movement towards a target. With this prototype, we intend to take the first steps in research and development of robotic platforms with higher autonomous capacities, control, higher reliability and adaptability.

TABLA DE CONTENIDOS:

CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
<u>1.1 Antecedentes</u>	1
<u>1.2 Necesidad de creación de la plataforma</u>	3
<u>1.3 Aplicaciones prácticas y vulcanología</u>	4
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	5
<u>2.1 Estructura Diferencial</u>	5
<u>2.2 Estructura Skid Steer</u>	8
2.2.1 Modelo matemático	9
CAPITULO 3: ALCANCE, REQUISITOS DE DISEÑO Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO	15
<u>3.1 Alcance y requisitos de diseño</u>	15
3.1.1 Dimensiones y peso	15
3.1.2 Robustez y exploración en terrenos irregulares	16
3.1.3 Tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas	17
3.1.4 Diseño modular	18
3.1.5 Versatilidad en cuanto a sensores y componentes electrónicos	19
3.1.6 Capacidades de navegación: funcionamiento con radio control y autónomo	20
<u>3.2 Pruebas de desempeño</u>	22
CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE COMPONENTES E INTEGRACION DE COMPONENTES ELECTRONICOS	26
<u>4.1 Componentes de potencia</u>	26
4.1.1 Motores	26
4.1.2 Controlador de velocidad	33
4.1.3 Baterías	35
<u>4.2 Circuito de Potencia</u>	38
<u>4.3 Componentes Electrónicos y Sensores</u>	40
4.3.1 Cámara de Video	40
4.3.2 Sistema de Radiocontrol	43
4.3.3 Dispositivo GPS	47
4.3.4 Brújula Electrónica	47
4.3.5 Sensor de Ultrasonido	51

4.3.6 Computadora Portátil	56
4.3.7 Switch de cambio de modalidad RC/Serial	58
<u>4.4 Integración de componentes electrónicos y sensores</u>	60
<u>4.5 Comunicación</u>	67
4.5.1 Funcionamiento a radiocontrol	67
4.5.2 Funcionamiento autónomo	69
4.5.3 Circuito de Switch RC/RS232	72
CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LA PLATAFORMA – SISTEMA MECANICO	74
<u>5.1 Diseño Conceptual</u>	74
<u>5.2 Módulo Central</u>	78
5.2.1 Chasis	78
5.2.2 Compartimiento de componentes electrónicos	95
5.2.3 Parrilla delantera	102
5.2.4 Diseño final de módulo central	104
<u>5.3 Módulo de Transmisión</u>	106
<u>5.4 Listado de componentes y codificación</u>	122
<u>5.5 Análisis de carga y estrés</u>	128
5.5.1 Carga de Impacto	128
5.5.2 Análisis de desempeño	129
<u>5.6 Construcción y Ensamblaje</u>	158
CAPITULO 6: DISEÑO DE LA PLATAFORMA – PROGRAMACION	166
<u>6.1 Lógica del modo autónomo</u>	166
<u>6.2 Convenciones para la navegación</u>	173
<u>6.3 Algoritmos de toma de decisiones</u>	175
<u>6.4 Programación en Labview</u>	186
CAPITULO 7: RESULTADOS Y ANALISIS	188
<u>7.1 Resultados</u>	188
<u>7.2 Análisis de Resultados</u>	194
CAPITULO 8: CONCLUSIONES	200

CAPITULO 9: RECOMENDACIONES	204
BIBLIOGRAFIA	209
ANEXOS	211

LISTA DE FIGURAS:

-FIGURA 2.1-1: a) Radio de curvatura aceptable en automóvil.	
b) Radio de curvatura inaceptable en automóvil	6
-FIGURA: 2.1-2. Velocidades necesarias para un cambio de dirección aproximadamente en la misma posición en un vehículo diferencial	7
-FIGURA: 2.1-3 Radio de curvatura y centro de giro en un vehículo diferencial para un cambio de dirección aproximadamente en la misma posición	8
-FIGURA 2.2.1-1: Rueda de un vehículo skid steer	9
-FIGURA 2.2.1-2: Sistema de referencia inercial	10
-FIGURA 2.2.1-3: Diagrama de cuerpo libre	11
-FIGURA 2.2.1-4: Velocidades de las ruedas y centro instantáneo de giro ICR	12
-FIGURA 3.2-1: Pista de obstáculos modo radiocontrol – etapa de recorrido 1	24
-FIGURA 3.2-2: Pista de obstáculos modo radiocontrol – etapa de recorrido 2	25
-FIGURA 4.1.1-1: Curvas características del motor NPC-T64	31
-FIGURA 4.1.1-2: Velocidad angular y corriente vs torque	31
-FIGURA 4.1.2-1. Controlador AX 2850 HE	34
-FIGURA 4.1.3-1. Batería Toyo 6FMH18. 12V 20AH	36
-FIGURA 4.2-1. Diagrama de circuito de potencia	39
-FIGURA 4.3.1-1: Cámara de video en soporte móvil	41
-FIGURA 4.3.1-2: Transmisor y receptor de video “5.8GHz Airborne Video Downlink”	42
-FIGURA 4.3.2-1: Emisor Futaba T7C-2.4G	45
-FIGURA 4.3.2-2: Receptor Futaba R617FS	45
-FIGURA 4.3.3-1: Dispositivo GPS “GPT-810”	48
-FIGURA 4.3.4-1: Brújula electrónica “CMP S03 Magnetic Compass”	50
-FIGURA 4.3.4-2: Adaptador USB-I2C “Devantech USB-I2C module”	51
-FIGURA 4.3.5-1: Desempeño esperado del sensor de ultrasonido	52
-FIGURA 4.3.5-2: Sensor de ultrasonido LEGO	54
-FIGURA 4.3.5-3: Disposición de los sensores de ultrasonido LEGO	55
-FIGURA 4.3.5-4: Sensor de ultrasonido y bloque NXT de la marca LEGO	55
-FIGURA 4.3.5-1: Sensor de ultrasonido en base móvil	56
-FIGURA 4.3.5-3: Campo de visión del sensor de ultrasonido sobre base móvil	56
-FIGURA 4.3.6-1: VAIO Computer	57
-FIGURA 4.3.7-1: Switch de cambio de modalidad RC/Serial	59
-FIGURA 4.4-1: Integración de Componentes Electrónicos y Sensores	63
-FIGURA 4.5.3-1. Esquema de circuito de switch RC/RS232	73
-FIGURA 5.1.1-1: Diagrama conceptual del vehículo – división en módulos	77
-FIGURA 5.2.1-1: Configuración elegida de motores para el modelo skid steer	80
-FIGURA 5.2.1-2: Configuración de componentes eléctricos de potencia	81
-FIGURA 5.2.1-3: Base del chasis	82
-FIGURA 5.2.1-4: Chasis con componentes de potencia en posición	83
-FIGURA 5.2.1-5: Motor sujeto a bloque de aluminio	84
-FIGURA 5.2.1-6: Tensores de motores instalados en el chasis	85
-FIGURA 5.2.1-7: Ubicación y sistema de sujeción del controlador	87
-FIGURA 5.2.1-8: Eje central	88

-FIGURA 5.2.1-9: Eje interior, rodamiento y soporte principal	89
-FIGURA 5.2.1-10: Transmisión con poleas y bandas	91
-FIGURA 5.2.1-11: Tapa del chasis	92
-FIGURA 5.2.1-12: Sujeción de la cámara de video	93
-FIGURA 5.1.2-13: Sujeción de la brújula electrónica	84
-FIGURA 5.2.2-1: Base de componentes electrónicos y sensores	97
-FIGURA 5.2.2-2: Disposición de componentes electrónicos y sensores en la base	98
-FIGURA 5.2.2-3: Tapa de compartimiento de componentes electrónicos	101
-FIGURA 5.2.2-4: Unión del compartimiento de componentes electrónicos a la tapa del chasis	102
-FIGURA 5.2.3-1: Parrilla delantera	103
-FIGURA 5.2.3-2: Sensor de ultrasonido y base con motor	104
-FIGURA 5.2.4-1: Diseño final del módulo central	105
-FIGURA 5.3-1: Módulo de transmisión	107
-FIGURA 5.3-2: Módulo de transmisión – Despiece	107
-FIGURA 5.3-3: Ejes exteriores	109
-FIGURA 5.3-4: Ejes de las ruedas	110
-FIGURA 5.3-5: Sistema de catalinas y cadenas	112
-FIGURA 5.3-6: Soporte de ejes de las ruedas	113
-FIGURA 5.3-7: Rueda montada en uno de los ejes	115
-FIGURA 5.3-8: Sistema de fijación de las ruedas a los ejes	115
-FIGURA 5.3-9: Bujes para rodamientos	117
-FIGURA 5.3-10: Sujeción de rodamientos con bujes	118
-FIGURA 5.3-11: Módulo de transmisión	119
-FIGURA 5.3-12: Acople de módulos de transmisión a módulo central	120
-FIGURA 5.3-13: Acople de módulos de transmisión a módulo central - Detalle	120
-FIGURA 5.3-14: Varillas roscadas en módulos de transmisión	121
-FIGURA 5.5.2-1: Distribución de carga sobre el eje interior	130
-FIGURA 5.5.2-2: Distribución del estrés equivalente en el eje interior	131
-FIGURA 5.5.2-3: Distribución de las deformaciones en el eje interior	131
-FIGURA 5.5.2-4: Distribución del factor de seguridad en el eje principal	132
-FIGURA 5.5.2-5: Distribución de carga sobre el eje exterior	133
-FIGURA 5.5.2-6: Distribución del estrés equivalente en el eje exterior	134
-FIGURA 5.5.2-7: Distribución de la deformación en el eje exterior	134
-FIGURA 5.5.2-8: Distribución del factor de seguridad en el eje exterior	135
-FIGURA 5.5.2-9: Distribución de carga en el eje de la rueda	136
-FIGURA 5.5.2-10: Distribución del estrés equivalente en el eje de rueda	137
-FIGURA 5.5.2-11: Distribución de la deformación en el eje de rueda	137
-FIGURA 5.5.2-12: Distribución del factor de seguridad en el eje de rueda	138
-FIGURA 5.5.2-13: Cuadro de análisis de banda sincrónica	140
-FIGURA 5.5.2-14: Cuadro de análisis para cadena	143
-FIGURA 5.5.2-15: Fuerzas radiales sobre eje de rueda	145
-FIGURA 5.5.2-16: Fuerzas radiales sobre el eje exterior	146
-FIGURA 5.5.2-17: Cuadro de análisis para rodamiento d17 mm	149
-FIGURA 5.5.2-18: Cuadro de análisis para rodamiento d20 mm	150

-FIGURA 5.5.2-19: Cuadro de análisis para rodamiento d30 mm	151
-FIGURA 5.5.2-20: Cuadro de análisis para rodamiento d17 mm	154
-FIGURA 5.5.2-21: Carga sobre el bastidor	154
-FIGURA 5.5.2-22: Distribución del estrés equivalente en el bastidor	155
-FIGURA 5.5.2-23: Distribución de la deformación en el bastidor	156
-FIGURA 5.5.2-24: Distribución del factor de seguridad en el bastidor	156
-FIGURA 5.6-1: Despiece #1 del módulo central	159
-FIGURA 5.6-2: Despiece #2 del módulo central	159
-FIGURA 5.6-3: Despiece #3 del módulo central	160
-FIGURA 5.6-4: Módulo central ensamblado	160
-FIGURA 5.6-5: Despiece del módulo de transmisión	161
-FIGURA 5.6-6: Módulo de transmisión ensamblado	161
-FIGURA 5.6-7: Chasis con componentes eléctricos de potencia – modulo central	162
-FIGURA 5.6-8: Módulo central construido	162
-FIGURA 5.6-9: Módulo de transmisión construido	163
-FIGURA 5.6-10: Ensamblaje de módulo central y módulos de transmisión	163
-FIGURA 5.6-11: Vehículo autónomo ensamblado	164
-FIGURA 5.6-12: Vehículo autónomo ensamblado – vista lateral	164
-FIGURA 5.6-13: Vehículo autónomo ensamblado – tapa de componentes electrónicos cerrada	164
-FIGURA 5.6-14: Vehículo autónomo ensamblado – tapa de componentes electrónicos abierta	165
-FIGURA 6.1-1: Lógica en funcionamiento autónomo	169
-FIGURA 6.1 – 2: Esquema de error por precisión de la brújula	171
-FIGURA 6.3-1: Esquema de plano cartesiano utilizado	177
-FIGURA 6.3-2: Area de llegada en modalidad autónoma	184
-FIGURA 6.4-1: Esquema conceptual de programa de modalidad autónoma	186
-FIGURA 7.1-1: Prueba que consiste en subir y bajar un escalón en modo RC	191
-FIGURA 7.1-2: Prueba que consiste en subir y bajar una pendiente de inclinación mayor a 20°	191
-FIGURA 7.1-3: Plataforma descompuesta en módulo principal y módulos de transmisión	192
-FIGURA 7.1-4: Recorrido de la plataforma autónoma para la prueba de navegación con GPS	193

LISTA DE TABLAS:

-TABLA 3.2-1: Pruebas realizadas	22
-TABLA 4.1.1-1: Cálculo general de peso aproximado del bastidor	27
-TABLA 4.1.1-2: Cálculo general de peso aproximado	27
-TABLA 4.1.1-3: Coeficientes de fricción entre caucho y otros materiales	29
-TABLA 4.1.1-4: Resultados de pruebas de dinamómetro del motor NPC T64, realizadas por el fabricante	30
-TABLA 4.2-1. Descripción de fuente y cargas del circuito de potencia	38
-TABLA 4.3.1-1: Datos técnicos de cámara de video "Color CCD Airborne Camerawith audio"	42
-TABLA 4.3.1-2: Datos técnicos del sistema transmisor – receptor "5.8GHz Airborne Video Downlink "	43
-TABLA 4.3.2-1: Asignación de canales de radiofrecuencia	46
-TABLA 4.3.2-2: Datos técnicos de Transmisor Futaba T7C-2.4G	46
-TABLA 4.3.2-3: Datos técnicos de Receptor Futaba R617FS	47
-TABLA 4.3.3-1: Datos técnicos de dispositivo GPS "GPT-810"	49
-TABLA 4.3.4-1: Datos técnicos de Brújula electrónica "CMP S03 Magnetic Compass"	50
-TABLA 4.3.6-1: Requisitos de instalación LabVIEW 7.1	56
-TABLA 4.3.6-2: Especificaciones técnicas VAI0 Computer	57
-TABLA 4.4-1: Interfaces de comunicación	61
-TABLA 4.4-2: Alimentación de componentes electrónicos y sensores	62
-TABLA 4.5.1-1: Pines del conector DB15 del controlador usados para comunicación RC	68
-TABLA 4.5.2-1: Pines del conector DB15 del controlador usados para modo autónomo	70
-TABLA 4.5.2-2: Comandos para comunicación serial	71
-TABLA 5.2.1-1: Dimensiones y peso de componentes de potencia	79
-TABLA 5.2.1-2: Rodamientos que soportan ejes interiores	90
-TABLA 5.2.2-1: Componentes electrónicos y sensores	96
-TABLA 5.2.2-2: Principales componentes ubicados en la base de componentes electrónicos	99
-TABLA 5.3-1: Rodamientos del módulo de transmisión	116
-TABLA 5.4-1: Listado de componentes principales	124
-TABLA 5.4-2: Listado de componentes secundarios	126
-TABLA 5.5.2-1: Características de desempeño de la banda sincrónica 165L075	139
-TABLA 5.5.2-2: Parámetros utilizados en simulación bajo carga de la banda sincrónica 165L075	139
-TABLA 5.5.2-3: Comparación de valores de desempeño requerido con parámetros reales disponibles de la banda sincrónica 165L075	141
-TABLA 5.5.2-4: Características de desempeño de cadena Ansi-40	142
-TABLA 5.5.2-5: Parámetros utilizados en simulación bajo carga de cadena Ansi-40	142

-TABLA 5.5.2-6: Comparación de valores de desempeño requerido con valores de desempeño real	143
-TABLA 5.5.2-7: Horas de servicio de cadena y componentes	144
-TABLA 5.5.2-8: Tabla de carga axial en los rodamientos	148
-TABLA 5.5.2-9: Características de desempeño de los rodamientos	148
-TABLA 5.5.2-10: Cálculo de carga equivalente	152
-TABLA 6.3-1: Decisión de cuadrante del punto objetivo	178
-TABLA 6.3-2: Cálculo de orientación del punto objetivo	179
-TABLA 6.3-3: Determinación de sentido de giro – cuadrante Noreste	181
-TABLA 6.3-4: Determinación de sentido de giro – 4 casos	182
-TABLA 7.1-1: Resultados de Pruebas	188
-TABLA 7.2-1: Expectativas y resultados de Dimensiones y Peso	195

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Se tienen descripciones de máquinas y autómatas mecánicos anteriores al primer siglo antes de Cristo, sin embargo es hasta el año 1921 que el escritor Checo Karel Čapek, acuñó el término robot en su obra "Rossum's Universal Robots" o "R.U.R.", a partir de la palabra checa "robota", que significa servidumbre o trabajo forzado. El término robótica es introducido por Isaac Asimov, junto con sus populares "Tres leyes de la Robótica", que aparecen por primera vez en el año de 1942.

A pesar de que estos términos nacen de la ciencia ficción, en el siglo XX empezó un acelerado desarrollo en estos campos gracias al avance de la tecnología, el mismo que ha continuado en el siglo XXI.

Compañías privadas y estatales alrededor del mundo invierten millones de dólares cada año en el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas al campo de la robótica y la automoción. Se han desarrollado hasta el momento vehículos acuáticos, terrestres y aéreos que funcionan de manera autónoma. Se han creado incluso androides (robots antropomorfos, que imitan tanto la apariencia humana como su conducta) de gran tecnología.

Aunque la tecnología actual todavía está muy por debajo de la descrita en la ciencia ficción, este campo avanza a pasos acelerados.

El campo de la robótica es poco desarrollado en el país, lo que crea la necesidad de investigación y avance en este ámbito, sobre todo por parte de instituciones de educación superior como la Universidad San Francisco de Quito (USFQ).

Con este antecedente se crea en la Universidad San Francisco de Quito el centro de vehículos autónomos, el cual nace con la construcción de un avión no tripulado. Con el propósito de fomentar el crecimiento de dicho centro, se propone ahora la creación de un primer prototipo de una plataforma autónoma de exploración.

Esta plataforma permitirá desarrollar el campo de estudio mencionado, con la implementación de un vehículo terrestre, a diferencia del vehículo aéreo creado anteriormente. Esto abre paso a nuevas posibilidades de exploración, en diferentes campos de investigación.

1.2 Necesidad de creación de la plataforma

El desarrollo y construcción de un prototipo de plataforma móvil autónoma como el que se propone, implicará un avance en el ámbito de la robótica a nivel nacional. A pesar de que existen ya proyectos similares desarrollados en el exterior, surge la necesidad de probar y desarrollar dicha tecnología en el país.

El proyecto propuesto involucra diversas áreas de conocimiento, como la mecánica, eléctrica, electrónica e informática.

Dentro del área de la mecánica se aplicarán conocimientos relacionados con diferentes campos de estudio, tales como el diseño, mecánica de materiales, estática y dinámica, entre otros.

Referente al campo de la ingeniería eléctrica y electrónica se deberán diseñar e implementar circuitos eléctricos, así como aprender el funcionamiento e interacción de varios componentes y dispositivos electrónicos. También se deberán poner en práctica conocimientos relativos a los campos de la ingeniería de sistemas, necesarios para desarrollar programas y algoritmos para el desplazamiento del robot, lo que involucra la interacción de diferentes sensores y equipos.

La aplicación en conjunto de todos estos campos de conocimiento para la construcción de un vehículo autónomo, representará un aporte al desarrollo e implementación de tecnologías como la robótica en nombre de la Universidad San Francisco de Quito y para el Ecuador.

1.3 Aplicaciones prácticas y vulcanología

Además del aporte teórico a la investigación y a la implementación de nuevas tecnologías que el desarrollo de esta plataforma de exploración representa, se deben tomar en cuenta las aplicaciones prácticas que podrían dársele a un vehículo autónomo.

Una plataforma como la mencionada podría tener aplicaciones en diferentes campos de exploración. A manera de ejemplo, existe interés local (dentro de la USFQ) en implementar una plataforma autónoma como la propuesta para investigación vulcanológica: Una plataforma de exploración de este tipo podría servir para toma de muestras de gases o adquisición de datos de temperaturas en zonas de difícil acceso o peligrosas para el ser humano.

Este es solamente un ejemplo de las muchas aplicaciones potenciales que podría tener una plataforma de este tipo, en diferentes campos de investigación.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

En general, existen dos formas de locomoción: con ruedas o con extremidades. Las extremidades son recomendables para terrenos en donde el tamaño de los obstáculos es mayor a la mitad del espacio libre debajo del chasis, debido a la gran adaptabilidad que tienen a distintas formas de obstáculos. Por otro lado, los sistemas con extremidades tienen una velocidad muy limitada, y requieren de una potencia mayor a la requerida por un sistema con ruedas. El control de velocidad y posición requerido de las extremidades es más complejo que el necesario para la velocidad y posición de un sistema con ruedas.

Una plataforma con ruedas, es capaz de desplazarse en terrenos con obstáculos de hasta aproximadamente 40% la altura de las ruedas; y puede alcanzar velocidades mayores a la de una plataforma con extremidades.

Un requisito de desempeño deseado es superar obstáculos de hasta 5cm. Por otro lado, la velocidad lineal requerida es de 1.11 m/s. En vista de que se pueden superar obstáculos de 5 cm con ruedas de un radio mayor a 12.5 cm, y la velocidad requerida puede ser fácilmente obtenida por medio de ruedas, se escogió las ruedas como medio de locomoción.

2.1 Estructura Diferencial

La estructura diferencial es una configuración que permite el cambio de dirección de un móvil por medio de una diferencia de velocidades entre las ruedas de los lados derecho e izquierdo. La geometría diferencial más simple usada es la de 2 ruedas, cada una de las cuales es manejada por un motor, como se muestra en la

figura 2.1-1. También se utilizan configuraciones diferenciales de 4 o más ruedas. Se debe recalcar que se necesitan motores bidireccionales para esta configuración.

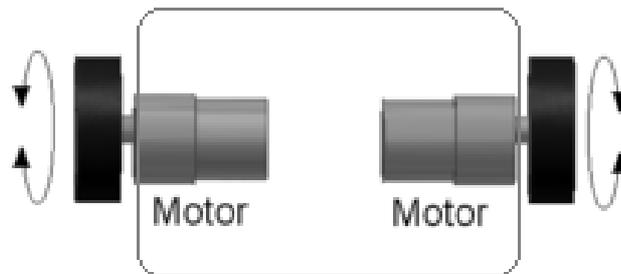


Figura 2.1-1. Móvil con ruedas diferenciales

VENTAJAS

El sistema de ruedas diferenciales, tiene una gran maniobrabilidad relacionada con el rango de radios de curvatura que puede adoptar. A diferencia del automóvil, en el cual el radio de curvatura tiene un mínimo, un móvil con ruedas diferenciales, es capaz de adoptar un radio de curvatura igual a cero.

De esta forma, un móvil con ruedas diferenciales, puede acoger radios de curvatura con su centro dentro del chasis, característica no disponible en un automóvil corriente, como se muestra en la figura 2.1-2:

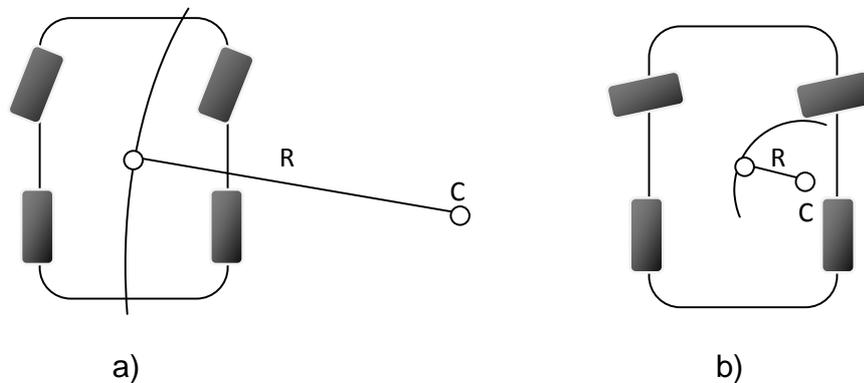


FIGURA 2.1-2: a) Radio de curvatura aceptable en automóvil. b) Radio de curvatura inaceptable en automóvil

En la figura 2.1-2 a) se muestra el radio de curvatura R , con centro en el punto C . Esta disposición es posible en un automóvil con ruedas delanteras direccionales. La figura 2.1-2 b) muestra una configuración no posible para un automóvil con este tipo de ruedas, debido a que el centro de curvatura se encuentra dentro del vehículo.

Por otro lado, un vehículo diferencial logra un cambio de dirección aproximadamente en su misma posición por medio de velocidades iguales pero opuestas en sus ruedas, como se muestra en la figura 2.1-3:

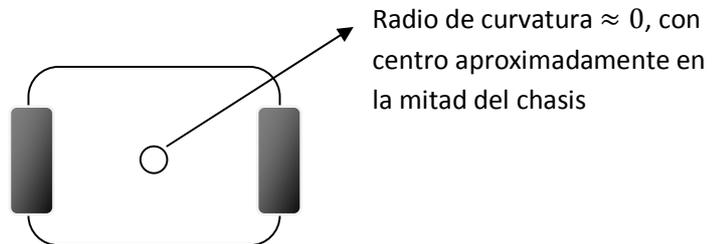


FIGURA: 2.1-3. Radio de curvatura y centro de giro en un vehículo diferencial para un cambio de dirección aproximadamente en la misma posición

DESVENTAJAS

Con un sistema de ruedas diferenciales es imposible ir en línea recta debido que una mínima diferencia de velocidad entre las ruedas causa un cambio de dirección. El control de la dirección y velocidad en línea recta es complejo.

2.2 Estructura Skid Steer

La estructura Skid Steer, es la misma que la de ruedas diferenciales, pero con la diferencia que tiene más de una rueda a cada lado. Las ruedas de un mismo lado son manejadas por el mismo motor.

La configuración skid steer puede ser encontrada en una amplia gama de móviles todo terreno, como por ejemplo montacargas, vehículos de minería y de guerra. Adicionalmente, son muy utilizados en aplicaciones relacionadas con la exploración.

Debido a sus múltiples ventajas (las mismas del modelo diferencial de dos ruedas), se desea adoptar el modelo skid steer para el presente proyecto.

Aunque existen varios beneficios mecánicos en la estructura de un skid steer, el control dinámico de su movimiento es complejo, debido a que las ruedas deben deslizarse lateralmente para lograr un cambio en la dirección del vehículo. Sin embargo, dado que no se implementará un control que implique retroalimentación respecto a la posición de las ruedas, no es necesario desarrollar un modelo dinámico del móvil que tome en cuenta los efectos del deslizamiento lateral.

2.2.1 Modelo matemático

Como se explicó anteriormente, no se realizará ningún tipo de control dinámico en el móvil. Por este motivo es posible aproximar el modelo cinemático del vehículo como el de un móvil con ruedas diferenciales.

MODELO CINEMATICO DE UNA RUEDA VERTICAL

En la figura 2.2.1-1, se muestra un esquema de una rueda vertical, con un movimiento que denota deslizamiento lateral, como es el caso de una rueda de un skid steer.

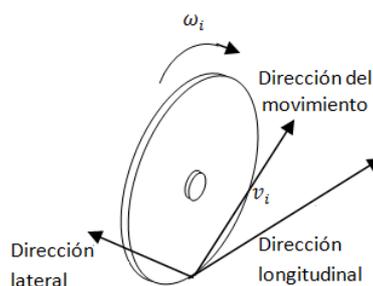


FIGURA 2.2.1-1: Rueda de un vehículo skid steer

Dado que se aproxima el comportamiento del móvil como el de uno con ruedas diferenciales, v_{iy} es nulo, y la relación entre la velocidad angular ω_i de la rueda con radio de giro r_i , y la velocidad lineal v_i , puede aproximarse por medio de la relación:

$$v_{ix} = r_i \omega_i$$

MODELO CINEMATICO DE UN MOVIL CON RUEDAS DIFERENCIALES

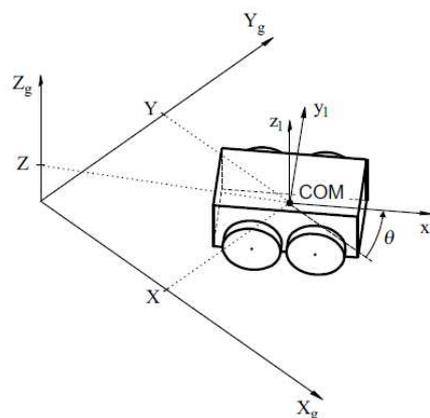


FIGURA 2.2.1-2: Sistema de referencia inercial

Se asigna un sistema de referencia inercial (X_g, Y_g, Z_g) , y uno local (x_l, y_l, z_l) con origen en el centro de masa del robot (COM). Es muy importante recalcar que en este modelo sólo se considera movimiento en un plano, donde Z es constante.

La velocidad lineal, mostrada en figura 2.2.1-3, y angular del robot están dadas por $\mathbf{v} = [x_l \ y_l \ z_l]^T [v_x \ v_y \ 0]$ y $\boldsymbol{\omega} = [x_l \ y_l \ z_l]^T [0 \ 0 \ \omega]$. Se define un vector de estado del robot en coordenadas inerciales $\mathbf{q} = [X_g \ Y_g \ Z_g]^T [X \ Y \ \theta]$, en donde X, Y es

la posición del centro de masa, y la orientación del sistema de referencia local con respecto al inercial. En consecuencia, el vector de estado de velocidades está dado por

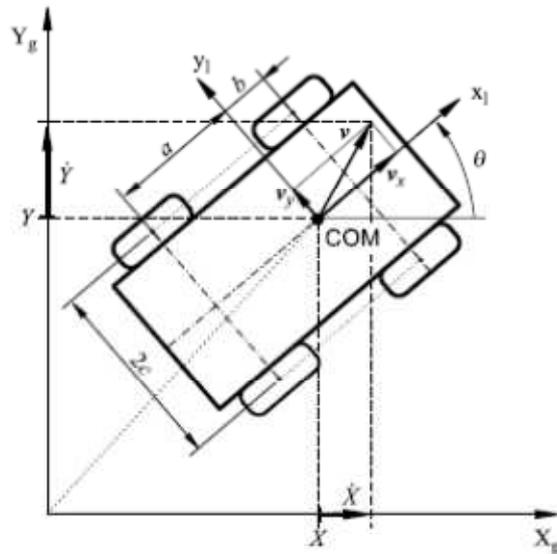


FIGURA 2.2.1-3: Diagrama de cuerpo libre

En la figura 2.2.1-3 se observa la siguiente relación entre \dot{X} y \dot{Y} y las coordenadas del vector de velocidad local v_x y v_y :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

Por otro lado, como se describió anteriormente, en el modelo cinemático de las ruedas, las velocidades lateral y longitudinal están dadas por:

Para el diseño del modelo cinemático se deben considerar todas las ruedas.

Se muestra un esquema de las mismas en la figura 2.2.1-4:

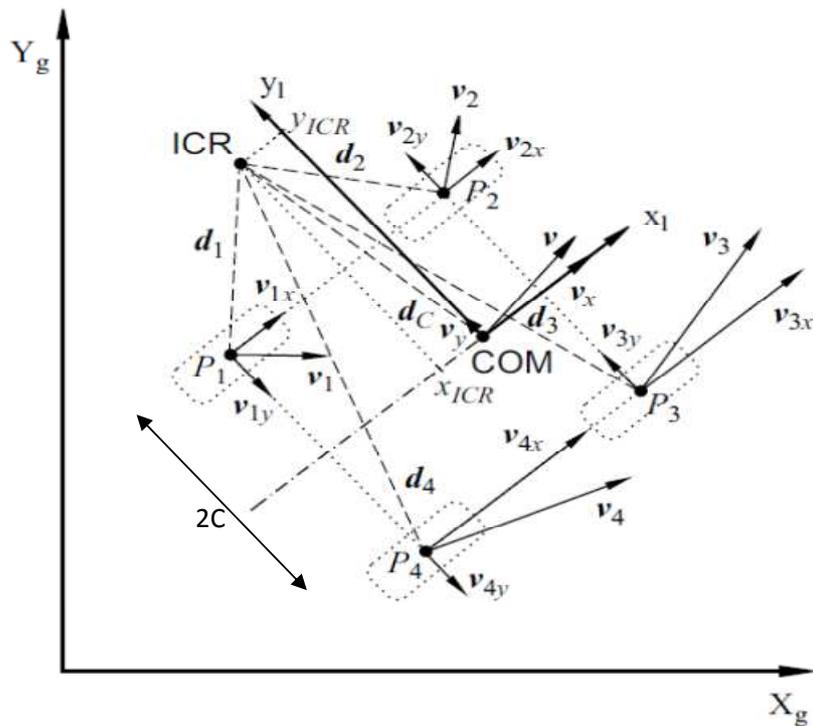


FIGURA 2.2.1-4: Velocidades de las ruedas y centro instantáneo de giro ICR

En la figura 2.2.1-4, \vec{d}_i es el vector posición del punto de apoyo P_i de la i -ésima rueda con respecto a ICR. \vec{d}_C es el vector posición del centro de masa del robot con respecto a ICR. Las coordenadas del vector \vec{d}_i son x_i y y_i .

Dadas las velocidades de las 4 ruedas, según la figura 2.2.1-4, se puede demostrar que:

$$(2)$$

En donde, v_L y v_R son las velocidades longitudinales de las ruedas de la izquierda y derecha, respectivamente.

Por otro lado, también se puede encontrar la relación entre las velocidades del robot y las de las ruedas:

$$\begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -c \\ 1 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

Asumiendo que el radio de giro de las ruedas es igual al radio geométrico de las mismas r , se pueden definir las velocidades angulares de las ruedas del lado izquierdo y derecho :

$$\begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

Finalmente, utilizando las dos últimas ecuaciones, se pueden expresar las velocidades del robot en función de las velocidades angulares , así:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ \frac{-\omega_L + \omega_R}{2c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

En este proyecto, se planea hacer los cambios de dirección del robot mientras mantiene su posición. Haciendo la simplificación tenemos que , y:

En consecuencia, tenemos:

En donde, $\Delta\theta$ es el cambio de dirección del robot, $\Delta\theta_R$ es el cambio de posición de las ruedas derechas, y $\Delta\theta_L$ es el cambio de ángulo de las ruedas izquierdas.

Finalmente, en base a la ecuación 4, tenemos que:

$$\begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix}$$

CAPITULO 3: ALCANCE, REQUISITOS DE DISEÑO Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO

3.1 Alcance y requisitos de diseño

El vehículo propuesto es un prototipo inicial. El alcance de este proyecto es desarrollar un móvil de prueba que posea ciertas características necesarias para una plataforma de exploración. Los ajustes y modificaciones necesarias para vincular el vehículo a procesos de investigación en diferentes campos de estudio, tanto como la implementación en éstos, deberán ser realizados a futuro y están fuera del alcance de este proyecto.

Los requisitos que se esperan de la plataforma se explican a continuación.

3.1.1 Dimensiones y peso

Se establece una restricción en cuanto a las dimensiones y el peso del vehículo debido a que estos factores influyen en la portabilidad del mismo. Dado que se deberán realizar múltiples pruebas de campo, el vehículo tendrá que ser transportado a diferentes locaciones.

Por este motivo se desea que las dimensiones de la plataforma autónoma sean adecuadas para que ésta pueda ser transportada en un vehículo de carga liviano (como una camioneta con vagón trasero) y su peso no sea excesivo, de manera que pueda ser levantada o manipulada por dos personas sin mayor complicación.

De esto se establecen las siguientes dimensiones y peso:

Largo máximo: 1 metro

Ancho máximo: 0.8 metros

Altura máxima: 0.65 metros

Peso máximo: 80 kg

3.1.2 Robustez y exploración en terrenos irregulares

Uno de los requisitos primordiales del prototipo de plataforma rodante es que tenga un diseño robusto, capaz de soportar condiciones adversas como terrenos irregulares, dado que se podría utilizar para exploración en espacios exteriores. Un uso potencial es en el campo de la investigación vulcanológica, como se mencionó anteriormente.

Para lograr un modelo con estas características, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

-Un diseño robusto de la estructura mecánica. Los materiales utilizados y las dimensiones del vehículo deberán responder a un proceso de diseño, según el peso final del vehículo y los esfuerzos a los que éste será sometido.

-Llantas suficientemente grandes para que éstas no puedan ser obstruidas por obstáculos pequeños. Se impone como requisito que la plataforma pueda superar obstáculos de hasta 5 cm de altura.

Se consideran adecuadas llantas de al menos 25cm de diámetro para superar estas obstrucciones sin problema. Las llantas deberán tener un labrado adecuado para poder recorrer terrenos irregulares.

-Un chasis elevado del suelo para que la plataforma no pueda ser obstruida por obstáculos pequeños o irregularidades pronunciadas en el terreno, como se mencionó en el punto anterior. Se considera adecuada una altura de al menos 15cm desde el chasis hasta el piso.

-Una sujeción firme y segura de todos los componentes de la plataforma. Se deberá poner especial atención en los componentes eléctricos y electrónicos que serán ubicados en el chasis.

El tema de terrenos irregulares incluye también pendientes o superficies inclinadas. Se cree adecuado, y suficiente, que se diseñe la plataforma para poder andar por superficies de hasta 20° de inclinación. Que esto se cumpla dependerá principalmente de la ubicación adecuada del centro de gravedad, la potencia de los motores y el peso del vehículo.

3.1.3 Tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas

El tiempo de operación continua de la plataforma (determinado principalmente por la capacidad de las baterías) y las velocidades a las que ésta debe operar están relacionadas, ya que en conjunto determinan la distancia máxima que el robot podrá recorrer.

El tiempo mínimo de operación continua se refiere al tiempo mínimo que las baterías deberán proveer a la plataforma de energía para su operación, antes de requerir ser recargadas. Se estima que un tiempo de 45 minutos es suficiente para las necesidades del prototipo y para una posible aplicación en algún campo de exploración.

Este tiempo de operación dependerá de la capacidad de las baterías y del consumo de energía por parte de los distintos componentes eléctricos y electrónicos, sobre todo de los motores.

La velocidad del vehículo es importante para que éste pueda recorrer distancias grandes en tiempos cortos. Se estima que una velocidad adecuada es la necesaria para recorrer 100 metros en 90 segundos. Esto significa una velocidad promedio de 1.11 m/s.

Si se asume que la carga de las baterías proporcionará un máximo de 45 minutos de operación, la velocidad promedio mencionada permitirá a la plataforma recorrer aproximadamente 3 kilómetros en línea recta, en un terreno plano y sin obstáculos.

Esta distancia se considera suficiente para una aplicación de investigación inicial. Si se coloca la plataforma en un punto cualquiera, permite asignarle un punto objetivo a 1km de distancia. La distancia para ir y volver del punto objetivo es de 2km, lo que deja una distancia potencial de 1km en caso de que la plataforma deba desviarse o encuentre pendientes que incrementen el consumo de energía.

3.1.4 Diseño modular

Una expectativa importante para el prototipo de plataforma es que tenga un diseño de tipo modular con respecto a las llantas y la transmisión. Esto significa que la estructura de las llantas pueda ser intercambiada fácilmente.

El alcance de este proyecto contempla la construcción de un único sistema de transmisión, sin embargo la característica de modularidad será de gran utilidad en

una plataforma como la desarrollada aquí, la cual tiene como objetivo realizar exploración en terrenos irregulares. Por ejemplo, se podrían construir diferentes modelos de tracción como uno con ruedas más grandes y con labrado más pronunciado o un sistema de ruedas tipo oruga para terrenos más irregulares. Estos tipos de tracción podrán ser implementados al mismo chasis, que contiene los motores y componentes eléctricos y electrónicos.

3.1.5 Versatilidad en cuanto a sensores y componentes electrónicos

Se propone un diseño versátil en cuanto a los componentes electrónicos. Esto permitirá gran capacidad de adaptabilidad e intercambio de éstos, tanto como implementación de nuevos componentes. Se espera que sensores y dispositivos adicionales, no contemplados en este prototipo inicial, puedan ser implementados con facilidad.

Componentes tales como sensores de temperatura o de detección de gases podrían ser útiles a futuro en campos de estudio en los que se quiera utilizar una plataforma robótica como la desarrollada.

Para lograr versatilidad en cuanto a este tipo de sensores y componentes electrónicos se deberá tener espacio físico para su ubicación y conexiones disponibles a un equipo de monitoreo y adquisición de datos, como una computadora portátil.

3.1.6 Capacidades de navegación: funcionamiento con radio control y autónomo

Se requiere que la plataforma pueda tanto ser operada a radio control (RC) como ser autónoma. Esta característica es importante, ya que la plataforma puede ser dirigida con control remoto en terrenos muy irregulares y complejos y ser autónoma en terrenos más regulares y sin obstáculos.

La característica de control con mando a distancia (RC) también servirá como medida de seguridad en caso de que el modo autónomo falle o encuentre alguna complicación que no pueda resolver. El cambio de modalidad autónoma a radio control deberá ser implementado para funcionar manualmente y a distancia (por medio del emisor de radiocontrol), según decida un operario.

ALCANCE DEL MANDO A CONTROL REMOTO

Se espera implementar el modo de mando a control remoto en conjunto con una cámara que transmita imágenes en tiempo real de manera inalámbrica. De esta manera la modalidad de control remoto se podrá utilizar cuando un operario tenga contacto visual con el vehículo, como cuando no lo tenga. En este caso, el operario se podrá guiar por las imágenes transmitidas por la cámara para manejar al vehículo.

Se propone también que la cámara tenga movilidad independiente del cuerpo de vehículo, lo que permitirá tener un mayor campo de visión. Para esto deberá montarse la cámara en un soporte móvil, manejado a radiocontrol.

Se propone un alcance mínimo de 1 km para los sistemas de radio control y de transmisión de imágenes.

ALCANCE DE MODALIDAD AUTÓNOMA

Se propone un funcionamiento autónomo básico. La plataforma deberá contar con un dispositivo de posicionamiento global (GPS) que le indique las coordenadas de su ubicación y una brújula electrónica que indique su orientación. Deberá contar también con un dispositivo que procese esta información y la relacione con la operación de los motores, como una computadora portátil.

Al darle una coordenada objetivo, el robot deberá calcular una trayectoria en línea recta desde su ubicación actual y desplazarse hasta las coordenadas propuestas.

La plataforma contará también con un sensor que le indique que debe detenerse si tiene algún obstáculo en frente.

El alcance del modo autónomo contempla únicamente el desplazamiento en línea recta, sin obstáculos. El desarrollo de algoritmos más complejos de programación para la navegación está fuera del alcance de este proyecto, pero podrá ser implementado a futuro en la plataforma.

3.2 Pruebas de desempeño

En la sección anterior, “Alcance y requisitos de diseño” se plantearon expectativas en cuanto a los siguientes criterios de diseño:

- Dimensiones y peso
- Robustez y exploración en terrenos irregulares
- Tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas
- Diseño modular
- Versatilidad en cuanto a sensores y componentes electrónicos
- Capacidades de navegación: funcionamiento con radio control y autónomo

Con el objetivo de tener un sistema de medición en base al cual evaluar los resultados de este proyecto, se planteó una serie de pruebas de desempeño a las que se debió someter la plataforma robótica una vez terminada. Se diseñaron pruebas específicas en cada uno de los campos mencionados. Estas se listan a continuación:

<u>Requisito de diseño</u>	<u>Prueba a realizar</u>
Diseño Robusto	Subir y bajar escalón en modo RC: Subir y bajar un escalón de al menos 7.5 cm de altura en diez ocasiones consecutivas, sin realizar ningún tipo de ajuste a la plataforma. La velocidad es de 1.1 m/s.
Diseño Robusto	Tiempo de operación sin mantenimiento: Se debe operar la plataforma por un tiempo de 10 horas sin tener que realizar ningún tipo de ajuste o mantenimiento. La carga de las baterías no se considera como mantenimiento.
Ruedas suficientemente grandes	Subir y bajar escalón en modo RC. (La misma prueba descrita en el primer campo de esta tabla sirve para probar este aspecto)

TABLA 3.2-1: Pruebas realizadas – (PARTE 1)

Requisito de diseño	Prueba a realizar
Chasis suficientemente elevado del suelo	Pasar sobre un obstáculo elevado: se deberá conducir la plataforma de modo que la parte central de ésta pase sobre un obstáculo de 15 cm de altura.
Navegación en pendientes o superficies inclinadas	Subir y bajar una pendiente mayor a 20° en modo RC: Se deberá subir y bajar una pendiente de esta inclinación en diez ocasiones consecutivas. La velocidad es de 1.1 m/s.
Tiempo de operación continua en modo RC	45 minutos de operación continua en modo RC: La plataforma debe ser capaz de operar, con todos sus componentes electrónicos y sensores, durante este tiempo en la modalidad de radiocontrol.
Tiempo de operación continua en modo autónomo	45 minutos de operación continua en modalidad autónoma: La plataforma debe ser capaz de operar, con todos sus componentes electrónicos y sensores, durante este tiempo en la modalidad autónoma
Velocidades esperadas	Velocidad máxima en la modalidad autónoma: Realizar un ciclo de operación en la modalidad autónoma en el que se recorra una distancia mayor a 100 metros, a una velocidad máxima de 1.1 m/s. Un ciclo de la modalidad autónoma contempla asignarle a la plataforma un punto objetivo, que ésta vaya al punto asignado y vuelva al de origen.
Modularidad	Prueba de modularidad: El vehículo debe constar de diferentes módulos, uno con los componentes eléctricos de potencia y componentes electrónicos (módulo central) y dos módulos con los componentes principales de la transmisión (módulos de transmisión).
Interacción de sensores	Probar interacción simultánea de sensores: Se deberá realizar una prueba del modo autónomo en la que el dispositivo GPS, la brújula electrónica y el sensor de ultrasonido interactúen de manera simultánea.
Cambio de modalidad RC - Serial	Cambio de modalidad operada a distancia: Se deberá hacer una prueba para verificar que el cambio de modalidad de autónoma a radiocontrol se puede realizar a una distancia mayor a 1000 metros.
Maniobrabilidad en el modo RC	Prueba de maniobrabilidad: Se deberá realizar una prueba en una pista de obstáculos simple, para verificar la maniobrabilidad en el modo de radiocontrol. En la prueba el operario no deberá tener contacto visual directo con la plataforma y se guiará por las imágenes transmitidas por la cámara de video. Un esquema de la pista de obstáculos propuesta se muestra en las figuras 3.2-1 y 3.2-1.

TABLA 3.2-1: Pruebas realizadas (PARTE 2)

Requisito de diseño	Prueba a realizar
Alcance modalidad autónoma	Navegación con GPS: Se deberá realizar una prueba asignando un mínimo de 3 puntos objetivo al robot. La plataforma deberá llegar a un área circular de 6 metros a la redonda de cada objetivo y realizar un giro de 360° para que la imagen sea captada por la cámara. Luego de esto deberá regresar al punto de origen.

TABLA 3.2-1: Pruebas realizadas (PARTE 3)

Las figuras 3.2-1 y 3.2-2, mostradas a continuación, presentan un esquema de la pista de obstáculos mencionada en punto de “Maniobrabilidad en el modo RC”, en la tabla 3.2-1.

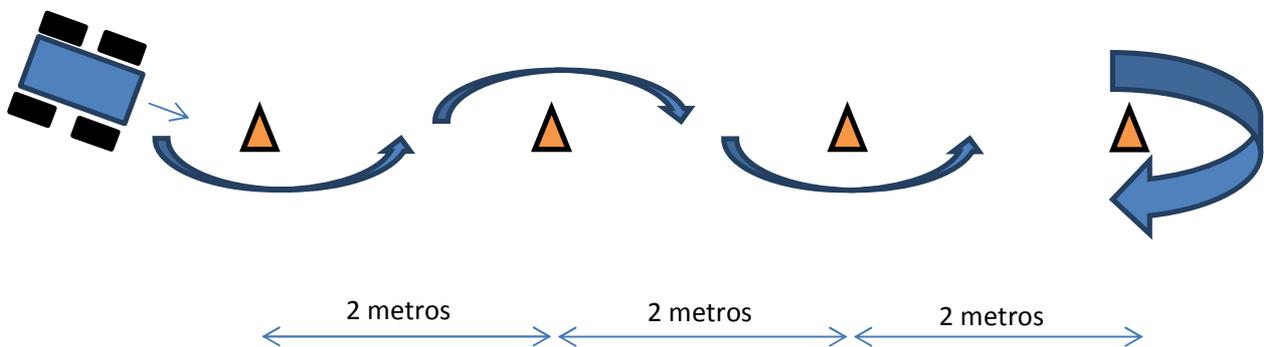


FIGURA 3.2-1: Pista de obstáculos modo radiocontrol – etapa de recorrido 1

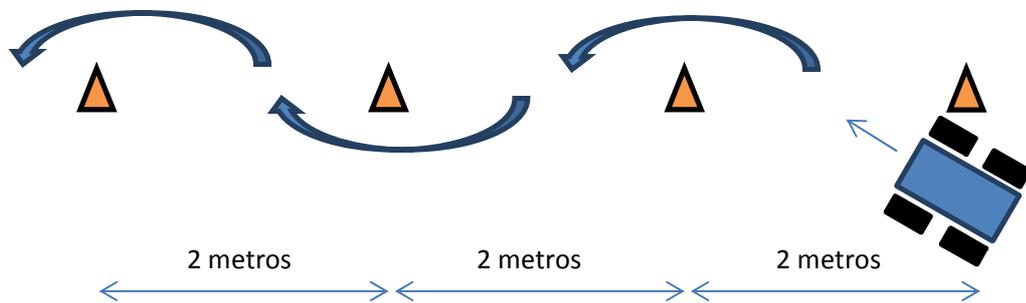


FIGURA 3.2-2: Pista de obstáculos modo radiocontrol – etapa de recorrido 2

La pista consiste en 4 obstáculos en forma de conos, con una base cuadrada de 30 cm de lado. Los obstáculos se encuentran en línea recta, separados a una distancia de 2 metros cada uno. El robot deberá recorrer la pista en un sentido y luego ir de vuelta al punto de partida.

CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE COMPONENTES E INTEGRACION DE COMPONENTES ELCTRICOS Y ELECTRONICOS

4.1 Componentes de potencia

4.1.1 Motores

En el caso de la plataforma propuesta, el control de velocidad es importante, ya que éste determinará la velocidad lineal y su dirección. Se utilizaron motores DC para mover el vehículo.

Las ventajas más importantes de un motor DC en relación a los motores AC son las siguientes:

- Fácil control de velocidad
- Fácil control de torque
- Capacidad de conexión directa a baterías

CALCULO DEL PESO

Se realizó el cálculo de peso en base a los pesos individuales de los elementos del móvil:

- Bastidor: Formado por tubos de aluminio de sección cuadrada, se estima peso de aproximadamente 7 kg.
- Ejes: 8 ejes de acero de transmisión con un peso aproximado total de 15 kg.

-Carga del bastidor: Los elementos que sostiene el bastidor, junto con su respectivo peso estimado se muestra a continuación:

Partes	masa(lbs)
Motores	26
Baterías	26
Driver	3
Elementos electrónicos	3
Tapas	15
Poleas, bandas, rodamientos	5
Bloques de aluminio	5
Total:	83
Equivalencia aprox. en kg:	38

TABLA 4.1.1-1: Cálculo general de peso aproximado del bastidor

-Placas laterales y catalinas: Las 8 catalinas pesarán aproximadamente 3kg. Por otro lado, las dos placas laterales, junto con los rodamientos y demás adaptadores, pesarán aproximadamente 4kg.

-Ruedas: Se utilizarán cuatro llantas con un peso total aproximado de 6 kg.

A continuación se presenta los pesos individuales y el total del móvil:

Partes	masa(kg)
Bastidor	7
Ejes	15
Carga del bastidor	38
Placas laterales y accesorios	7
Ruedas	6
Total robot	73

TABLA 4.1.1-2: Cálculo general de peso aproximado

DESEMPEÑO ESPERADO

-Cálculo de torques necesarios:

El mínimo coeficiente de fricción que debe haber para que el robot ascienda en la pendiente de 30 grados es:

$$F_{TractionMaxima} - Peso * \sin\varphi = 0$$

$$\mu * Weight * \cos\varphi - Peso * \sin\varphi = 0$$

$$\mu = \tan\varphi = \tan 30 = 0.577$$

En este caso particular de $\mu = 0.557$, el máximo torque que se puede aplicar en cada rueda sin que patine está dado por:

$$\frac{4T_{Máximo}}{r} = F_{Traction} = \mu_{minimo} * Weight * \cos\varphi$$

$$T_{Máximo} = 0.25 * r * \mu_{minimo} * Peso * \cos\varphi = 0.25 * 0.127 * 0.557 * 80 * 9.81 * \cos 30 \\ = 11.27Nm$$

En la tabla 4.1.1-3 se detalla una tabla de los distintos coeficientes de fricción estática que tiene el caucho con otros materiales:

<u>Material</u>	<u>Coefficiente de fricción con el caucho</u>
Cartón	0.5 – 0.8
Asfalto seco	0.9
Asfalto húmedo	0.25 – 0.75
Concreto seco	0.6 – 0.85
Concreto húmedo	0.45 – 0.75

TABLA 4.1.1-3: Coeficientes de fricción entre caucho y otros materiales

Como se puede ver, cuando el móvil se encuentre en asfalto seco, el coeficiente de fricción será el máximo (0.9). Esto será el limitante al torque que los motores pueden ejercer. A continuación se muestra el cálculo de éste torque para cada motor:

$$\frac{2T_{Máximo}}{r} = \mu_{máximo} * peso * \cos\varphi$$

$$T_{Máximo} = 0.25 * r * \mu_{máximo} * peso * \cos\varphi$$

$$T_{Máximo} = 0.5 * 0.127 * 0.9 * 80 * 9.81 * \cos 30 \approx 40 Nm$$

Por otro lado, se espera tener una alimentación de 24 Voltios para cada motor. Dado que se espera una velocidad final en plano de 1.1 m/s, se necesitará una velocidad angular de aproximadamente 9 rad/s.

En resumen, se tienen los siguientes requerimientos:

$$Voltaje Disponible = 24V$$

$$Torque (T_r) = 40 Nm$$

$$Velocidad\ angular\ nominal = 9rad/s$$

En consecuencia, la máxima potencia requerida es de:

$$P_o = \tau\omega = 40\ Nm * 9 \frac{rad}{s} = 360\ Watts = 0.48\ hp$$

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

En base al peso y desempeño deseado del móvil, se decidió utilizar los motores NPC-T64, del fabricante NPC Robotics (www.npcrobotics.com), los cuales son generalmente usados para sillas de ruedas motorizadas. Este motor cuenta con una caja de reducción de 20:1, lo cual simplifica en gran manera el diseño de la transmisión.

CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR NPC-T64

En base a la información dada por NPC Robotics (www.npcrobotics.com), se encontró la siguiente información del motor NPC-T64:

Torque in inch/pounds	Amps	RPM	HP
30	8.6	238	.11
60	12.5	230	.22
90	16.2	225	.32
120	20.0	218	.41
150	23.5	211	.52
180	27.5	206	.62
210	31.6	200	.71
240	35.1	194	.81
270	39.2	187	.89
300	43.1	181	.95 →
825	110	STALL	

TABLA 4.1.1-4: Resultados de pruebas de dinamómetro del motor NPC T64, realizadas por el fabricante

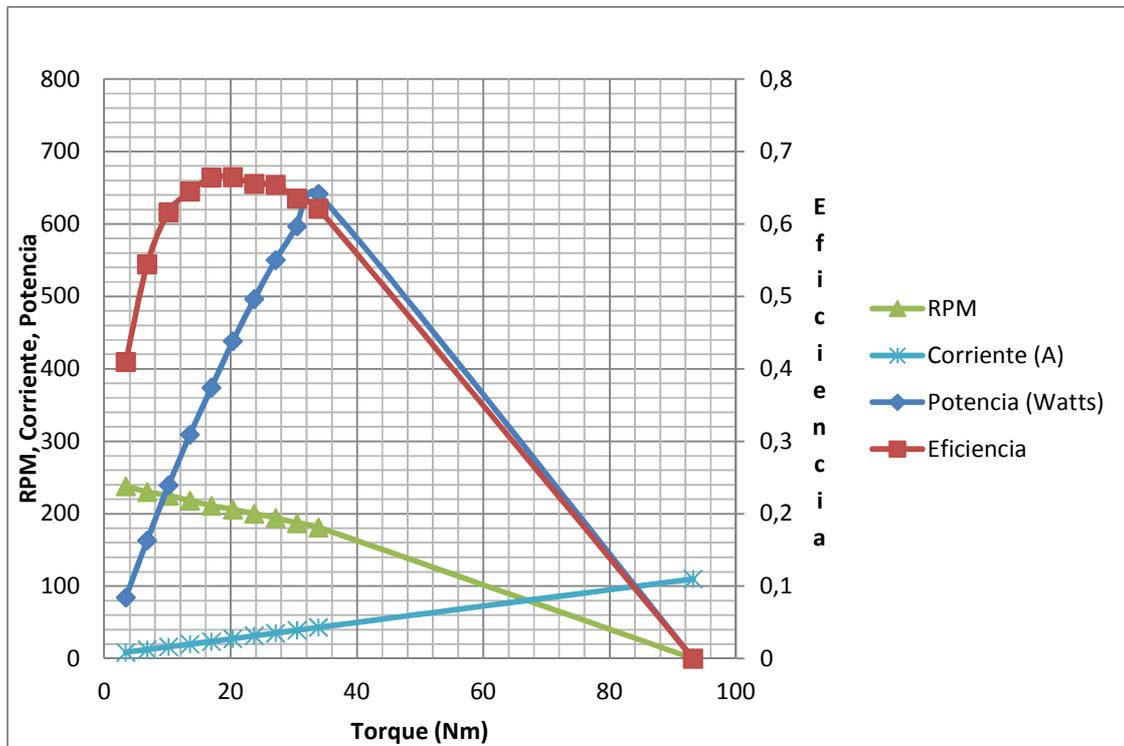


FIGURA 4.1.1-1: Curvas características del motor NPC-T64

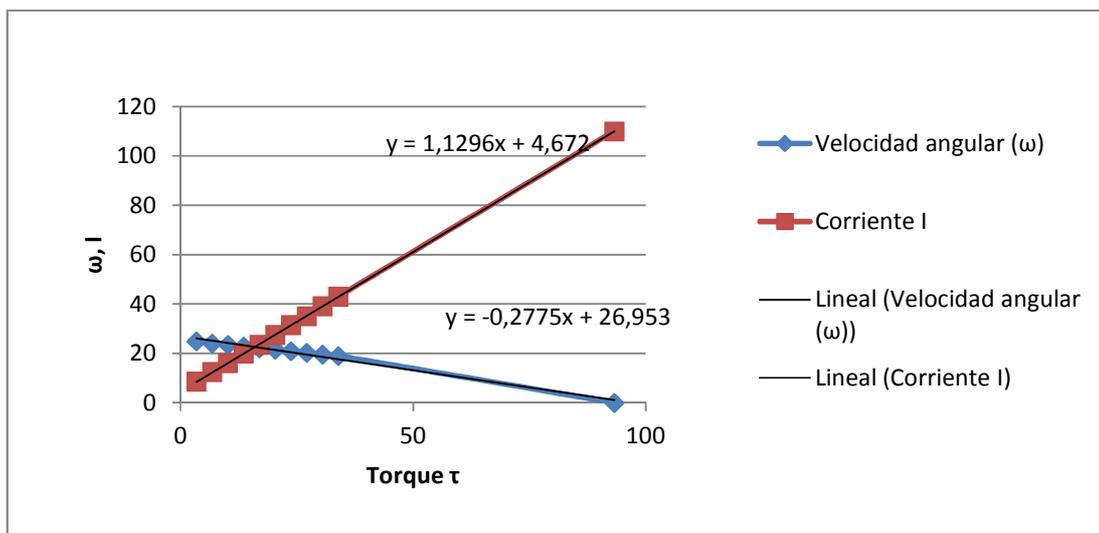


FIGURA 4.1.1-2: Velocidad angular y corriente vs torque

Los parámetros que definen el funcionamiento del motor son los siguientes:

$$\text{Stall Torque } (T_s) = 93.21 \text{ Nm}$$

$$\text{Voltaje Nominal} = 24V$$

$$\text{Stall Current } (I_s) = 110A$$

$$\text{Velocidad angular sin carga } (\omega_o) = 25.474 \text{ rad/s}$$

$$\text{Corriente sin carga } (I_o) = 4.707 \text{ A}$$

$$\text{Constante de torque del motor } (K_T) = 0.885 \text{ Nm/Amps}$$

$$\text{Resistencia } (R) = 0.156 \text{ Ohms}$$

Por otro lado, se puede observar que la máxima potencia es de alrededor 0.8 hp y que la constante K_m del motor es de:

$$K_m = \frac{K_T}{\sqrt{R}} = \frac{0.885 \text{ Nm/Amps}}{\sqrt{0.156 \text{ Ohms}}} = 2.240686 \frac{\text{Nm}}{\sqrt{\text{Watts}}}$$

ANALISIS DEL MOTOR EN BASE A REQUERIMIENTO

Podemos ver que el motor NPC T64 cubre los requisitos de potencia. Por otro lado, el voltaje nominal es exactamente el disponible, 24 Voltios.

Se observa que a una carga de 40 Nm la velocidad angular será de aproximadamente 15 rad/s, lo que corresponderá a una velocidad lineal de aproximadamente 1.88 m/s en una pendiente de 30 grados.

Se aplicó también un método de análisis basado en la constante del motor K_m (George A. Beauchemin), el cual se muestra a continuación:

Primeramente, se calcula la constante mínima necesaria del motor K'_m , según la siguiente ecuación:

$$K'_m = \frac{\text{Máximo Torque necesario}}{\sqrt{\text{Potencia de entrada} - \text{potencia de salida}}}$$
$$K'_m = \frac{43.16 \text{ Nm}}{\sqrt{24V * 50Amps - 43.16Nm * 18rad/s}} = 2.098 \frac{\text{Nm}}{\sqrt{\text{Watts}}}$$

Finalmente, como la constante del motor mínima necesaria K'_m , es menor que la constante del motor K_m , el motor NPC-T64 tendrá un buen desempeño en base a los requisitos impuestos.

4.1.2 Controlador de velocidad

Se necesita un controlador de velocidad para el motor DC. Este controlador recibe la señal de la velocidad demandada, y en base a esto, envía una señal de voltaje, que es la que maneja los motores.

DESEMPEÑO ESPERADO

En general, en base al motor escogido, se necesita un controlador de posición y velocidad para un motor DC de escobillas.

El controlador debe ser capaz de manejar la corriente consumida por el motor. La máxima corriente que puede consumir el motor ocurre cuando este es sometido a

una carga que impide su movimiento, esta corriente corresponde a 110 amperios. También debe manejar los 24 V de los motores.

Para maximizar la funcionalidad del controlador, se necesita que éste pueda trabajar en lazo abierto y con retroalimentación. Dependiendo de la precisión requerida, se elegirá trabajar en lazo abierto o cerrado. En el caso presente, se implementará un control en lazo abierto, sin embargo, se desea que el controlador también tenga la capacidad de trabajar en lazo cerrado para futuras aplicaciones.

Otro aspecto determinante en la funcionalidad del controlador, es su capacidad y facilidad de comunicación. Se requieren dos modos de comunicación: RS232 (por puerto serial) y radio control. El primero permitirá el comportamiento autónomo del vehículo y el segundo un control manual a distancia.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

En base a los requerimientos de desempeño, se escogió el controlador AX 2850 HE de la casa comercial Roboteq, el cual se muestra en la figura 4.1.2-1:



FIGURA 4.1.2-1: Controlador AX 2850 HE

A continuación se presenta las principales ventajas de este controlador:

- Puede controlar dos motores al mismo tiempo.
- Tiene tres modos de comunicación: RS232, análogo (ejemplo: joystick), y a radio control.
- Cuenta con un módulo de lectura para encoder óptico, permitiendo un control en lazo cerrado.
- Puede soportar hasta 140 amperios.
- Tiene un sistema de protección anti voltajes excesivos ó demasiado bajos.

Mayor información sobre el desempeño y especificaciones de este controlador se pueden encontrar en la dirección electrónica http://www.roboteq.com/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=79.

4.1.3 Baterías

Son la fuente de voltaje necesario para alimentar el controlador y los dos motores.

DESEMPEÑO ESPERADO

La fuente debe ser recargable, y capaz de otorgar 24 Voltios para alimentar los dos motores. Por otro lado, esto también permitirá alimentar el controlador, ya que éste funciona con voltajes desde 12V a 40V.

Por otro lado, para suplir la necesidad de autonomía por 45 minutos, se necesitará una fuente que pueda entregar 40 amperios por este tiempo, ya que cada uno de los motores tiene un consumo promedio de 20 amperios por hora.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

Las baterías utilizadas en motos son las más indicadas para esta aplicación ya que el voltaje y corriente requeridos son parecidos. En base a los requerimientos de desempeño se eligieron las baterías Toyo 6FMH18 (Pb). En vista de que los motores escogidos funcionan a 24 Voltios, y estas baterías son de 12 V, se adquirió dos de éstas.

Por otro lado, cada una de estas baterías es de 20Ah, es decir, pueden otorgar 20 amperios por una hora. Esto cubre las expectativas de tiempo de autonomía de la plataforma. La figura 4.1.3-1 muestra una imagen de la batería escogida:



FIGURA 4.1.3-1: Batería Toyo 6FMH18. 12V 20AH

Mayor información sobre estas baterías puede encontrarse en la siguiente dirección electrónica: <http://www.japatoyo.com/en/2004816103344337.pdf>

4.2 Circuito de Potencia

Es el circuito encargado de proveer el amperaje y voltaje necesarios al controlador, para la alimentación del mismo y de los motores.

Los elementos presentes en el circuito de potencia son: dos motores, dos baterías y el controlador. A continuación se muestra una descripción breve de los mismos en términos de voltaje y corriente.

<u>Elemento</u>	<u>Voltaje</u>	<u>Corriente</u>
Baterías (conectadas en serie):	12 voltios X2	-
Controlador:	12 V a 40 V por canal Alimentación: 12 V mínimo	Resiste hasta 140 Amp en los 2 canales Consume 200mA a 12V o 100mA a 24V
Motores:	24 V	20 a 30 Amp

Tabla 4.2-1. Descripción de fuente y cargas del circuito de potencia

Se decidió utilizar cable AWG8 para el circuito. En la figura 4.2-1 se muestra un esquema del circuito de potencia:

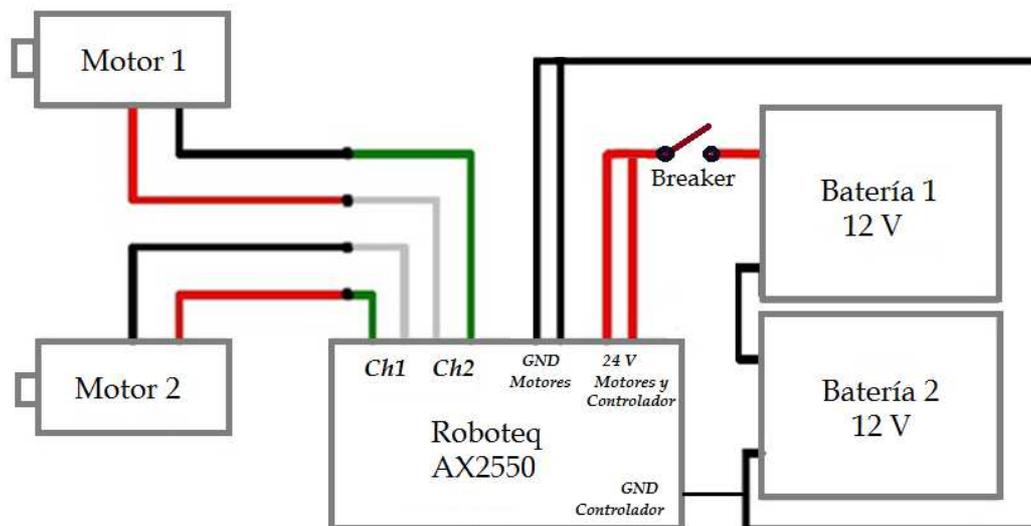


Figura 4.2-1. Diagrama de circuito de potencia

Para proteger los distintos elementos del circuito de potencia, se utilizó un breaker de 60 Amp en la alimentación positiva del controlador. Se decidió utilizar esta protección dado que, según el desempeño esperado del móvil, cada motor no consumirá más de 30 Amp. Sin embargo, en caso de un accidente, como por ejemplo un atascamiento de los motores, la corriente podría aumentar hasta 110 Amp.

Adicionalmente, el controlador cuenta con una protección interior ante amperajes excesivos y voltajes demasiado altos o bajos.

4.3 Componentes Electrónicos y Sensores

En esta sección se explican los requisitos necesarios de los diferentes componentes electrónicos y sensores. Posteriormente se muestran los componentes seleccionados y se mencionan las características más relevantes de éstos.

4.3.1 Cámara de Video

Se requiere que el prototipo de plataforma implemente un sistema de transmisión de video de manera inalámbrica. Esta característica servirá para asistir en el modo de operación con radiocontrol, cuando el vehículo este fuera del campo de visión de operario. También permitirá visualizar y grabar video en el modo autónomo.

Adicionalmente a la cámara de video se requiere un transmisor y un receptor. Se necesitan también baterías para cada componente (cámara, transmisor y receptor). También se necesita un monitor al cual transmitir las imágenes.

DESEMPEÑO ESPERADO

En la sección 3.1.3, "Tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas", se plantea que la plataforma debe ser capaz de recorrer una distancia de hasta 1 km en el modo de funcionamiento autónomo. De esto surge la necesidad de que los componentes electrónicos que transmiten información de manera inalámbrica tengan el mismo alcance.

Se requiere un alcance de 1 km de distancia para la transmisión de video inalámbrica. Transmisión de video a color también será útil para futuras aplicaciones de la plataforma.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

La cámara utilizada es el modelo “Color CCD Airborne Camera with Audio” de www.wirelessvideocameras.com. Esta es una cámara inalámbrica a color, con un rango de 1 milla (1600 metros) de distancia.

Este equipo se montó sobre un soporte móvil para dar mayor ángulo de visión a la cámara. Dos servomotores operados a control remoto permiten realizar movimientos horizontales y verticales de la cámara (sistema PAN-TILT).

El sistema se muestra en la FIGURA 4.3.1-1, a continuación:

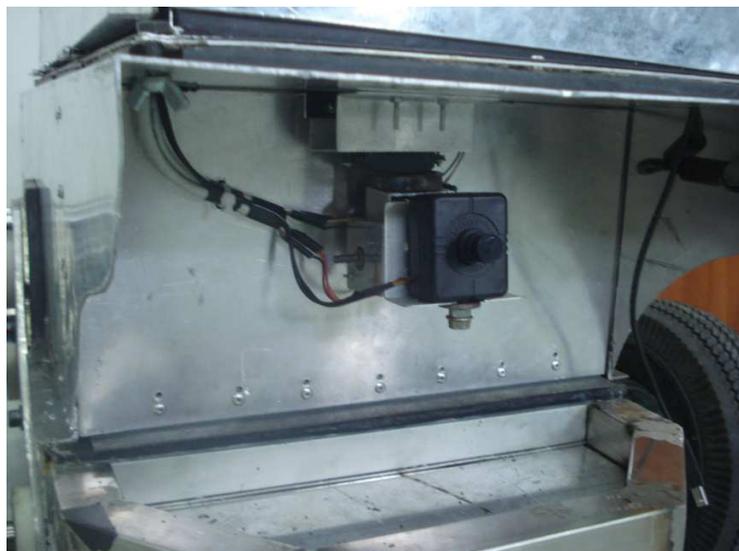


FIGURA 4.3.1-1: Cámara de video en soporte móvil

Datos técnicos relevantes de la cámara de video se listan en la tabla 4.3.1-1:

<u>Cámara de video "Color CCD Airborne Camera with audio"</u>	
resolución:	380 líneas de TV
voltaje:	12V
consumo de energía:	100mA
tamaño:	36 x 36 x 33mm
peso:	42.5 gramos

TABLA 4.3.1-1: Datos técnicos de cámara de video "Color CCD Airborne Camera with audio"

El sistema transmisor – receptor utilizado es el modelo “5.8GHz Airborne Video Downlink” de www.wirelessvideocameras.com. Una imagen de este sistema se muestra a continuación:



FIGURA 4.3.1-2: Transmisor y receptor de video "5.8GHz Airborne Video Downlink"

Datos técnicos relevantes se muestran en la tabla 4.3.1-2:

<u>Sistema transmisor y receptor de video "5.8GHz Airborne Video Downlink "</u>		
	TRANSMISOR	RECEPTOR
rango:	1 milla (1600metros)	1 milla (1600metros)
frecuencia:	5.8GHz	5.8GHz
voltaje:	12V	12V
consumo de energía:	250mA	350mA
tamaño:	63.5 x 76.2 x 25.4mm	56 x 44 x 15mm
peso:	113 gramos	-

TABLA 4.3.1-2: Datos técnicos del sistema transmisor – receptor "5.8GHz Airborne Video Downlink "

Información y datos técnicos adicionales acerca de la cámara y el sistema de transmisión de video inalámbrico en el Anexo A.

Adicionalmente a los componentes detallados, se utiliza un adaptador de video a un puerto USB y una computadora de escritorio (adicional a la computadora portátil que controla la plataforma) para la adquisición de video.

4.3.2 Sistema de Radiocontrol

La plataforma debe contar con un sistema de control por radio para poder ser operada a distancia. Este sistema consiste en un control remoto, un receptor y baterías para éstos.

DESEMPEÑO ESPERADO

Se espera la plataforma de exploración pueda ser operada en el modo de radio control (guiada por la cámara de video inalámbrica) a una distancia de hasta 1 km.

Otro requisito del sistema de radiocontrol es que éste disponga de al menos 5 canales para las diferentes funciones que se desean manejar a radiocontrol: un canal para cada uno de los motores, dos canales para los movimientos horizontal y vertical de la cámara (sistema PAN-TILT) y un canal para el switch de cambio de modalidad RC/Autónoma. Estas se describen en el siguiente punto.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

El modelo de los equipos de radiocontrol seleccionados fue el control remoto T7C-2.4G, junto con el receptor R617FS, ambos componentes de la compañía Futaba. Con este sistema se cuenta con 7 canales, con transmisión a una frecuencia de 2.4GHz.

Los componentes del sistema de radiocontrol se muestran en las figuras 4.3.2-1 y 4.3.2-2:



FIGURA 4.3.2-1: Emisor Futaba T7C-2.4G



FIGURA 4.3.2-2: Receptor Futaba R617FS

La plataforma de exploración utiliza 5 de los 7 canales de radiofrecuencia, dispuestos de la siguiente manera:

Canal	Función
1	motor derecho
2	servomotor para movimiento lateral de la cámara
3	servomotor para movimiento vertical de la cámara
4	motor izquierdo
5	switch modalidad RC / autónoma
6	-
7	-

TABLA 4.3.2-1: Asignación de canales de radiofrecuencia

Los canales 6 y 7 están libres para implementaciones futuras.

Datos técnicos relevantes se muestran en las tablas 4.3.2-2 y 4.3.2-3:

<u>Transmisor Futaba T7C-2.4G</u>	
frecuencia:	2.4GHz
voltaje:	9.6V
consumo de energía:	140mA
tamaño:	-
peso:	-
número de canales:	7

TABLA 4.3.2-2: Datos técnicos de Transmisor Futaba T7C-2.4G

Receptor Futaba R617FS	
frecuencia:	2.4GHz
voltaje:	4.8V
consumo de energía:	80mA
tamaño:	41.6 x 27.5 x 9.2mm
peso:	9.8g
número de canales:	7

TABLA 4.3.2-3: Datos técnicos de Receptor Futaba R617FS

No se hace referencia al alcance del sistema transmisor-receptor en el catálogo de los equipos. Sin embargo, se encontró en foros de aeromodelismo (<http://www.aeromodelismovirtual.com/showthread.php?p=116376>), donde usuarios emplean estos mismos equipos, que algunos usuarios vuelan “en promedio a 2.5 kms sin problema”. Otros usuarios afirman haber volado teniendo más de 3km de separación entre el emisor y el receptor sin perder calidad en la señal.

Se realizaron pruebas con los equipos adquiridos a 1.2 km de distancia sin perder la transmisión de información, lo cual es suficiente para el alcance del proyecto planteado.

Más información y especificaciones técnicas en el Anexo A.

4.3.3 Dispositivo GPS

El modo de navegación autónoma del prototipo de plataforma necesita de un dispositivo GPS para poder determinar su posición, tanto como para poder identificar coordenadas objetivo.

DESEMPEÑO ESPERADO

Se espera que el dispositivo GPS a implementar en el vehículo tenga una precisión de uno hasta tres metros, suficientes para la aplicación propuesta. Dado que el costo de este tipo de dispositivos aumenta de manera significativa al aumentar su precisión, se considera que una precisión mayor a la mencionada no se justifica en este prototipo inicial.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

El dispositivo GPS seleccionado es el modelo GPT-810 de la casa comercial GoPass.

Este modelo tiene una precisión de 3m, puede operar hasta 18 horas de manera continua con una batería recargable incorporada y se puede comunicar vía bluetooth con un computador. Este dispositivo ofrece una alternativa adecuada para los requisitos de la plataforma.



FIGURA 4.3.3-1: Dispositivo GPS “GPT-810”

Datos técnicos relevantes se muestran a continuación:

Dispositivo GPS "GPT-810"	
tiempo de adquisición de datos:	36 segundos, promedio
actualización:	<1 segundo
precisión:	3 metros
operación continua:	18 horas (batería interna)
tamaño:	93.5 x 46 x 10.8mm
peso:	49.5g

TABLA 4.3.3-1: Datos técnicos de dispositivo GPS "GPT-810"

Información y especificaciones adicionales en el Anexo A.

4.3.4 Brújula Electrónica

Otro componente esencial para el funcionamiento autónomo es una brújula electrónica. El dispositivo GPS permite a la plataforma conocer su posición en el planeta, pero no su orientación. Este dato se obtiene de una brújula.

DESEMPEÑO ESPERADO

Se estima que una resolución de 1° es suficiente para este dispositivo, aunque resoluciones de décimas de grado son comunes en estos sensores, a costos relativamente bajos.

La precisión de una brújula electrónica no es muy alta. Una precisión de 5° puede ser suficiente, si la programación en el modo autónomo puede compensar este aspecto.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

El modelo de brújula electrónica elegido es el CMP S03 – Magnetic Compass, de Robot Electronics (www.robotelectronics.co.uk). Este modelo tiene una resolución de 0.1° y precisión de 3-4° aproximadamente.

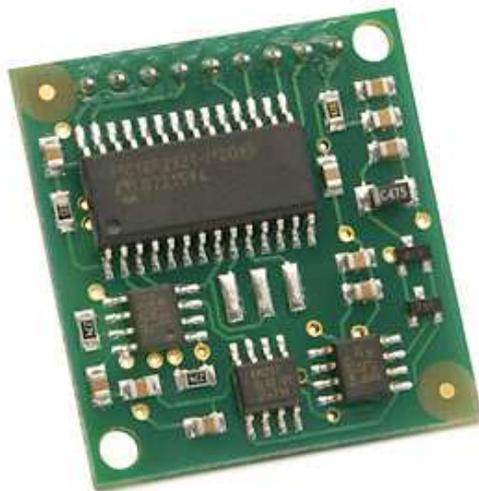


FIGURA 4.3.4-1: Brújula electrónica “CMP S03 Magnetic Compass”

Datos técnicos relevantes se muestran a continuación:

<u>Brújula electrónica "CMP S03 Magnetic Compass"</u>	
resolución:	0.1 grados
precisión:	3-4 grados
voltaje:	5V (de la computadora portátil directamente)
consumo de energía:	25mA
tamaño:	32 x 35mm

TABLA 4.3.4-1: Datos técnicos de Brújula electrónica "CMP S03 Magnetic Compass"

La brújula electrónica seleccionada tiene una salida de datos de tipo I2C. Para adaptar este componente al dispositivo de procesamiento de datos (computadora portátil en este caso), se utilizó el adaptador Devantech USB-I2C module, el cual tiene una salida tipo USB. Este componente se muestra en la figura 4.3.4-2:



FIGURA 4.3.4-2: Adaptador USB-I2C “Devantech USB-I2C module”

Información adicional y datos técnicos tanto de la brújula electrónica como del adaptador USB-I2C en el Anexo A.

4.3.5 Sensor de Ultrasonido

Se implementaron sensores de ultrasonido como medida de seguridad, para que el vehículo se detenga en caso de detectar un obstáculo frente a él. Estos sensores y el modo de paro están activos durante el funcionamiento autónomo únicamente.

El modo autónomo está diseñado para recorrer trayectorias rectas y sin obstáculos, pero se decidió implementar estos sensores como paro de emergencia.

En aplicaciones futuras pueden utilizarse estos sensores, con la implementación de algoritmos de programación más avanzados, para diseñar un modo autónomo que implique esquivar obstáculos.

DESEMPEÑO ESPERADO

Se requiere que los sensores tengan un alcance mínimo de 45cm y se cubra un campo de visión de 130°. Estas características permiten al vehículo autónomo detenerse a tiempo, antes de chocar, si detecta un obstáculo. Un diagrama de esta configuración se muestra en la figura 4.3.5-1 (las distancias se muestran en mm):

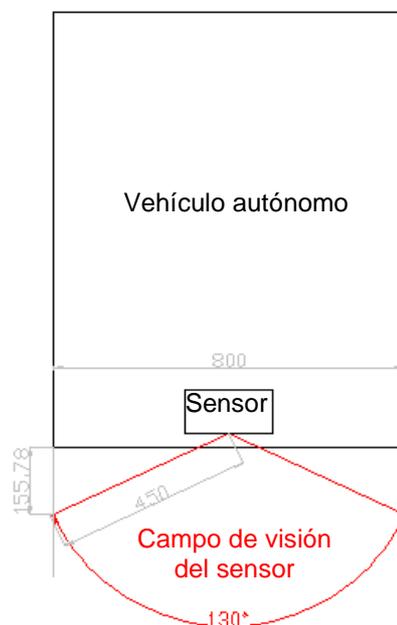


FIGURA 4.3.5-1: Desempeño esperado del sensor de ultrasonido

La figura 4.3.5-1 muestra un esquema del desempeño esperado del sensor de ultrasonido. Se tiene un ancho máximo del vehículo de 0.80 metros (establecido en la sección 3.1.1, "Dimensiones y peso") y un sensor con un alcance de 0.45 metros que cubre un campo de visión de 130°. Se puede observar que los casos críticos se dan en los extremos del campo de visión del sensor, donde un obstáculo es detectado a aproximadamente 0.15 metros de distancia. Se estima que esta distancia da tiempo suficiente al vehículo para detenerse.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

Se eligieron sensores de ultrasonido de la serie Mindstorms de LEGO, ya que estos sensores pueden detectar obstáculos a una distancia máxima de 45 cm, aproximadamente.

Se decidió que sería útil implementar un sensor de la marca LEGO, ya que la serie Mindstorms posee diversos tipos de dispositivos los cuales son bastante prácticos, dado que pueden ser instalados de manera fácil y rápida. La implementación de estos sensores se justifica en este prototipo inicial pero podrían ser reemplazados por dispositivos más avanzados en aplicaciones futuras.



FIGURA 4.3.5-2: Sensor de ultrasonido LEGO

POSICIONAMIENTO DE LOS SENSORES

Tras una serie de pruebas, se determinó que los sensores utilizados cubren un campo de visión de aproximadamente 50° . Con el objetivo de cubrir el campo de visión requerido, se instalaron en la plataforma 3 sensores de ultrasonido: uno en el centro de la plataforma y dos orientados a 45° respecto al primero. Con esta configuración se cubre un campo de visión total de 140° , donde los campos de visión de los sensores individuales se solapan. Un diagrama se muestra en la figura 4.3.5-3:

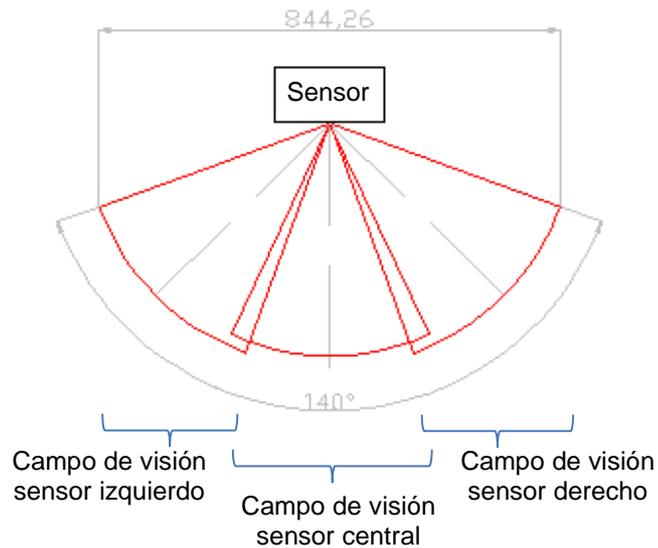


FIGURA 4.3.5-3: Disposición de los sensores de ultrasonido LEGO

Adicionalmente a los sensores de ultrasonido se necesita utilizar un bloque NXT (también de la casa comercial LEGO), el cual interpreta la información de los sensores y la envía a la computadora. Una imagen del bloque NXT, junto con los tres sensores de ultrasonido en la configuración descrita se muestran en la figura 4.3.5-4:

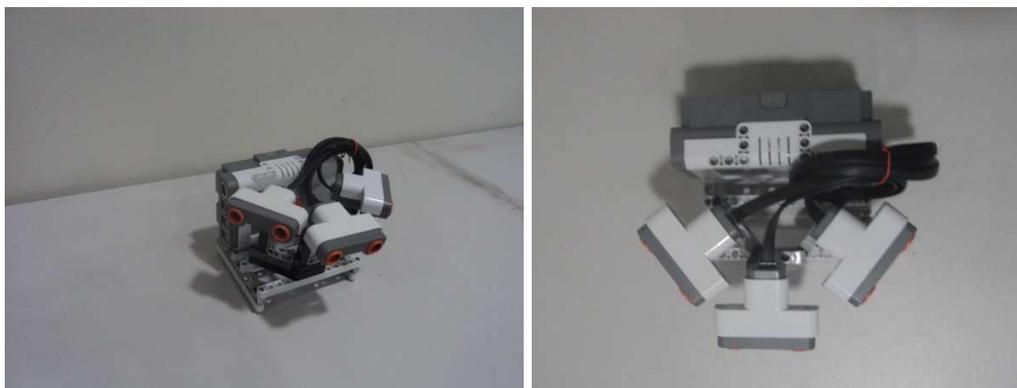


FIGURA 4.3.5-4: Sensores de ultrasonido y bloque NXT de la marca LEGO

4.3.6 Computadora Portátil

Se necesita de una computadora portátil que actúe como controlador de la plataforma en el funcionamiento autónomo. Para esta modalidad se eligió LabVIEW versión 7.1 como software de desarrollo.

DESEMPEÑO ESPERADO

La computadora portátil empleada debe cumplir con los requerimientos mínimos para la instalación del software mencionado. Estos requisitos son:

Requisitos mínimos para LabVIEW versión 7.1	
Procesador:	Pentium III/Celeron 866 MHz or equivalent
RAM:	256 MB
Sistemas operativos:	Windows 7/Vista/XP/Windows Server 2003 R2 (32-bit)/Windows Server 2008 R2 (64-bit)
Espacio en el disco:	1.6 GB

TABLA 4.3.6-1: Requisitos de instalación LabVIEW 7.1

Además de estas especificaciones técnicas, se desea que la computadora posea al menos 4 puertos USB para conexión con el dispositivo GPS, brújula electrónica, sensor de ultrasonido y controlador de los motores.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

La computadora portátil utilizada en el prototipo de plataforma es el modelo VAIO Computer del fabricante Sony Electronics, Inc. Este equipo posee las siguientes especificaciones técnicas:

Especificaciones Técnicas VAIO Computer	
Procesador:	intel core 2 duo 2.0GHz
RAM:	2Gb
Sistema operativo:	windows vista home de 32 bits
Disco duro:	120 GB

TABLA 4.3.6-2: Especificaciones técnicas VAIO Computer

Las especificaciones técnicas de la computadora portátil utilizada sobrepasan los requisitos mínimos del software Labview 7.1, por lo que este equipo es adecuado para ser implementado en el desarrollo de la plataforma.

La VAIO Computer cuenta con 3 puertos USB. En el prototipo desarrollado aquí se emplean 4 puertos USB simultáneamente, por lo que se debió conectar un HUB USB a uno de los puertos.

Una imagen del modelo VAIO Computer utilizado se muestra en la figura 4.3.6-1:



FIGURA 4.3.6-1: VAIO Computer

4.3.7 Switch de cambio de modalidad RC/SERIAL

Se necesita un switch para hacer un cambio entre las modalidades de radiocontrol y autónoma.

DESEMPEÑO ESPERADO

El switch de cambio de modalidad debe poder ser operado por medio del control remoto de la plataforma, a una distancia mínima de 1km.

MODELO ELEGIDO Y ESPECIFICACIONES

El switch de radiocontrol se fabricó a partir de los diagramas obtenidos de la página web <http://www.ef-uk.net/data/rc-switch.htm>. Este switch permite activar dos relés, necesarios para el cambio de modalidad de funcionamiento de la plataforma robótica, por medio de una señal del receptor de radiocontrol.

El alcance del comando de cambio de modalidad depende del alcance del sistema transmisor-receptor de radiocontrol. Como se explicó en la sección 4.3.2, "Sistema de Radiocontrol", se probó que este sistema tiene un alcance mayor a 1.2km.

Una imagen del switch construido se muestra en la figura 4.3.7-1:

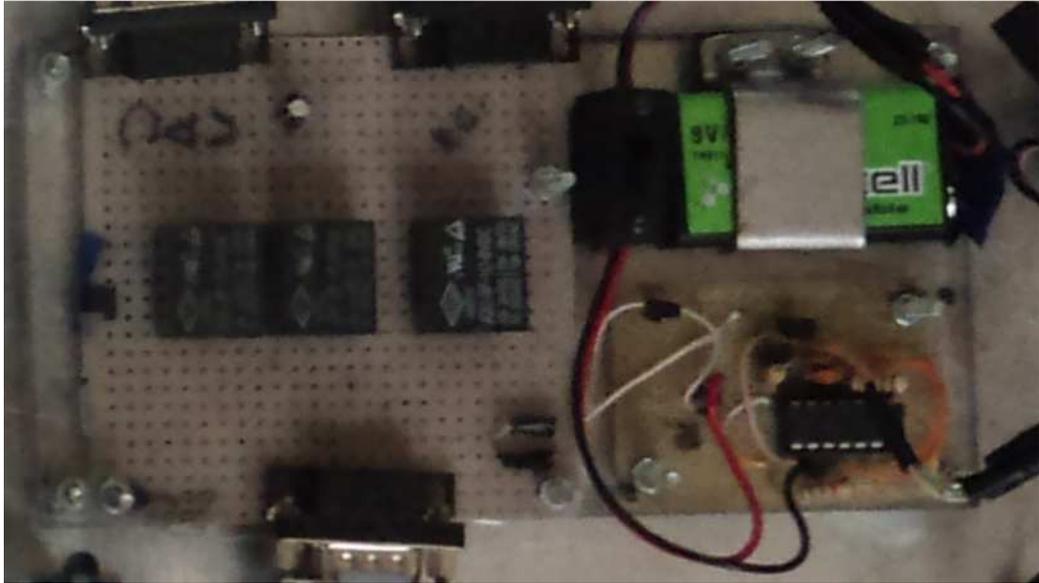


FIGURA 4.3.7-1: Switch de cambio de modalidad RC/SERIAL

El switch de cambio de modalidad es alimentado por una batería de 9 voltios.

El diagrama del circuito del switch se detalla en el Anexo A.

4.4 Integración de componentes electrónicos y sensores

La integración de todos los componentes electrónicos y sensores no es un tema sencillo, ya que además del cableado necesario, si se desea que dos componentes se comuniquen, éstos deben manejar el mismo protocolo. Hay componentes, como una computadora personal, que manejan varios protocolos de comunicación simultáneamente.

Si dos componentes que se quieren comunicar no manejan el mismo protocolo, se puede implementar un dispositivo que adapte un protocolo a otro, como se explica más adelante.

TIPOS DE INTERFACES DE COMUNICACIÓN

El primer paso en el proceso de integración de los diferentes componentes electrónicos y sensores, es conocer cómo cada dispositivo transmite información, lo que depende de la interfaz de comunicación que maneje cada uno. La tabla 4.4-1 muestra cómo se maneja cada componente en este aspecto:

<u>Componente</u>	<u>Interfaz de comunicación</u>
-dispositivo GPS:	bluetooth SERIAL
-brújula electrónica:	I2C
-sensor de ultrasonido:	I2C
-control remoto:	señal de radiofrecuencia
-receptor de radiocontrol:	señal de radiofrecuencia
-computadora portátil:	USB SERIAL
-switch RC/SERIAL:	señal de radiofrecuencia
-controlador motores:	SERIAL RS232
-cámara de video:	RCA
-emisor de la cámara:	señal de radiofrecuencia
-receptor de la cámara:	señal de radiofrecuencia
-computadora para recibir imágenes:	USB RCA

TABLA 4.4-1: Interfaces de comunicación

Además de los aparatos electrónicos que cumplen una función específica, se utilizaron adaptadores para pasar de una interfaz de comunicación a otra, cuando esto se requería. Estos dispositivos se listan a continuación:

-conector de PWM: conecta canales 1 y 4 del receptor de RF al controlador de los motores

-receptor de bluetooth: recepta la información del GPS y la transmite a la computadora portátil vía el puerto USB

-adaptador I2C-USB: utilizado para comunicar la brújula electrónica con un puerto USB de la computadora portátil

-adaptador USB-RS232: envía información de la computadora portátil al controlador de los motores

-adaptador RCA-USB: transfiere la imagen de la cámara de video, desde el receptor de ésta hasta una computadora fija (computadora adicional a la computadora portátil montada en la plataforma)

-bloque NXT: comunica el sensor de ultrasonido con la computadora portátil, vía USB

La interacción de estos adaptadores con los componentes de la tabla 4.3-1 se muestra más adelante, en la figura 4.3-1.

INTEGRACIÓN RESPECTO A PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Un diagrama con los componentes electrónicos y sensores que manejan diferentes interfaces de comunicación y como éstos fueron integrados se muestra en la figura 4.4-1:

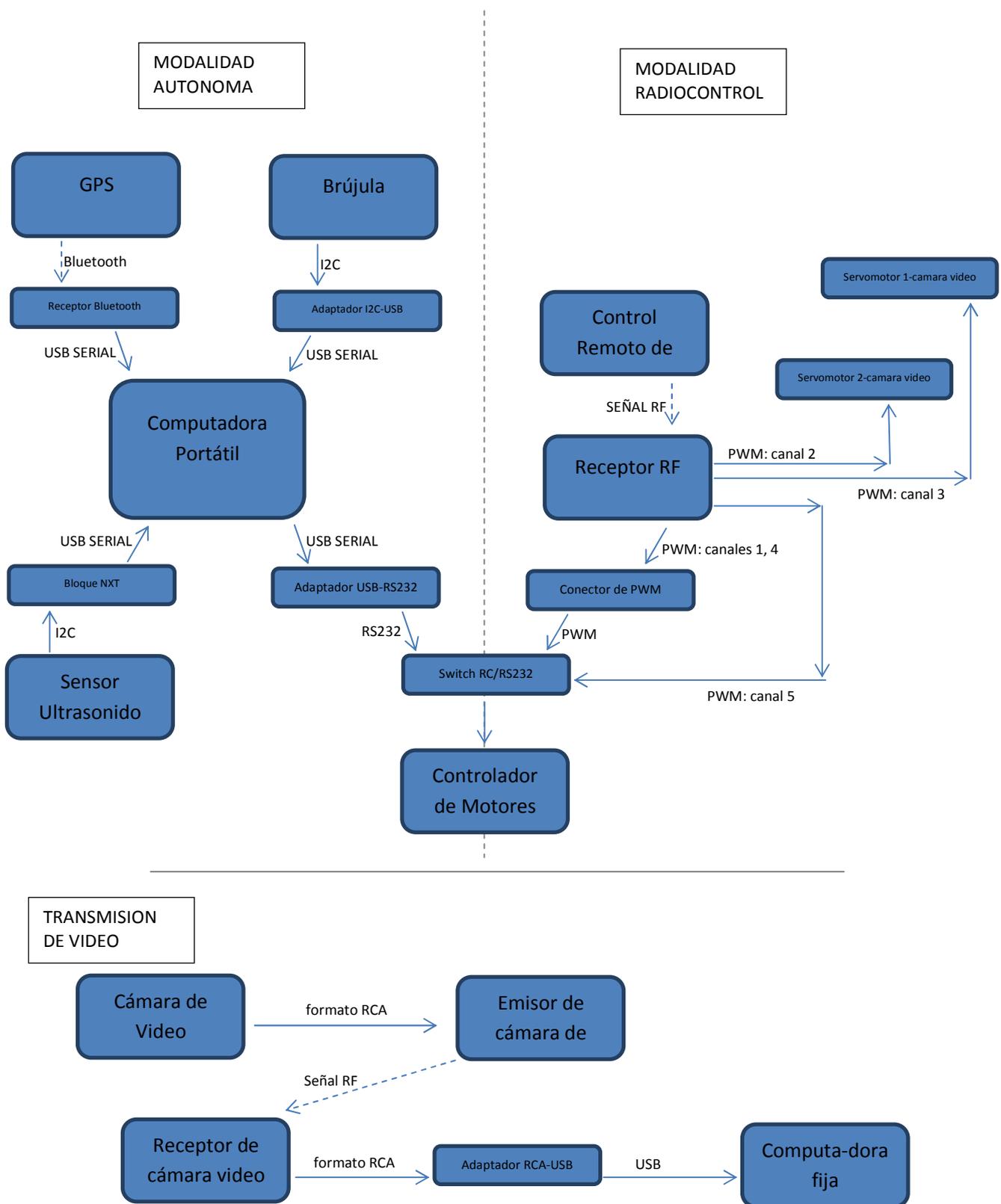


FIGURA 4.4-1: Integración de Componentes Electrónicos y Sensores

La figura 4.4-1 está dividida en tres subsecciones. Las dos subsecciones superiores, separadas por una línea vertical entrecortada, representan los componentes utilizados para el funcionamiento autónomo (a la izquierda) y los componentes utilizados para el funcionamiento a radiocontrol (a la derecha).

La subsección inferior presenta los componentes utilizados para la transmisión de video de manera inalámbrica. Esta subsección es independiente del sistema conformado por las subsecciones superiores.

La computadora fija en la subsección de transmisión de video se refiere a una computadora diferente a la computadora portátil montada en la plataforma, como se explicó anteriormente.

Las flechas en la figura muestran en qué sentido fluye la información. Las flechas sólidas son los sistemas de comunicación que requieren de cables para la transmisión de información y las flechas entrecortadas representan los sistemas que transmiten información de manera inalámbrica (bluetooth y señal de radiofrecuencia).

INTEGRACIÓN RESPECTO A ALIMENTACION Y CABLEADO ELECTRICO

Otro aspecto importante respecto a la integración de los diferentes componentes electrónicos y sensores, es la alimentación eléctrica de éstos. En la siguiente tabla se muestra el tipo de alimentación de cada componente y se indica si éstos necesitan de una batería externa o tienen una incorporada:

<u>COMPONENTES ELECTRONICOS</u>	
<u>Dispositivo:</u>	<u>Fuente de Poder:</u>
-dispositivo GPS	batería interna
-brújula electrónica	toma alimentación de computadora portátil
-sensor de ultrasonido	toma alimentación de bloque NXT
-control remoto	batería interna: 9.6 VDC
-receptor de radiocontrol	batería externa: 4.8VDC
-computadora portátil	batería interna: 19.5VDC
-switch RC/SERIAL	batería externa: 9VDC
-cámara de video	batería externa: 12VDC
-emisor de la cámara	batería externa: 12VDC (misma batería que la cámara)
-receptor de la cámara	alimentación a 120VAC (receptor funciona a 12VDC con adaptador)
-computadora para transmitir imágenes	alimentación a 120VAC
<u>ADAPTADORES</u>	
<u>Dispositivo:</u>	<u>Fuente de Poder:</u>
-adaptador RF-RS232	no necesita alimentación
-receptor de bluetooth (salida a puerto USB)	toma alimentación de computadora portátil
-adaptador I2C-USB	toma alimentación de computadora portátil
-adaptador USB-RS232	toma alimentación de computadora portátil
-adaptador RCA-USB	toma alimentación de computadora portátil
-bloque NXT	batería interna (6 baterías AA)

TABLA 4.4-2: Alimentación de componentes electrónicos y sensores

De la tabla 4.3-1 se puede observar que se necesitan las siguientes baterías (adicionales a las baterías internas de algunos componentes):

-batería de 4.8VDC para el receptor de radiocontrol

-batería de 9VDC para el switch de modalidad SERIAL – RC

-batería de 12VDC para la cámara de video y el emisor de ésta

En el robot construido se utilizan estas baterías por separado. Una alternativa a esto es tomar la alimentación para estos componentes de una batería de 12VDC adicional, transformando el voltaje de 12V a 4.8V y 9V para el receptor de radiocontrol y el switch de modalidad SERIAL-RC, respectivamente.

La conexión de estas baterías se realiza directamente a los respectivos componentes, mediante los conectores o terminales adecuados.

4.5 Comunicación

La manera en la que los diferentes componentes eléctricos de potencia y componentes electrónicos se integran se describió en las secciones 4.2 y 4.4, respectivamente.

En esta sección se analizan los diferentes componentes electrónicos que intervienen en cada modalidad de funcionamiento de la plataforma y se detalla la manera en la que los mandos de las modalidades de radiocontrol y autónoma se comunican con el controlador de los motores.

4.5.1 Funcionamiento a radiocontrol

El funcionamiento a radio control (RC) permite un control directo del móvil por parte del usuario. En esta modalidad el usuario puede operar el robot por medio de su propio campo visual o por medio de imágenes transmitidas por una cámara de video inalámbrica, permitiéndole así tele operar el robot.

La principal ventaja de este medio de control del móvil es que se puede evitar obstáculos fácilmente. Por otro lado, no se requiere una programación previa para su aplicación.

Los componentes involucrados de este tipo de operación son los siguientes:

- Control remoto y receptor de radio frecuencia: envía y recibe las señales necesarias para el manejo de los dos motores, los dos servomotores del soporte mecánico de la cámara, y el switch de radio frecuencia a RS232.
- Controlador de motores: recibe las señales del receptor de radio frecuencia, para luego interpretarlas y emitir el respectivo voltaje de alimentación a los motores.

-Circuito Switch RC/RS232: recibe la señal del receptor de radio frecuencia, para activar el modo RC o el modo RS232.

-Cámara de video inalámbrica: permite al usuario observar el ambiente al cual se avecina el móvil, cuando éste se encuentra fuera de la vista del usuario.

COMUNICACION RC CON EL CONTROLADOR

El controlador de motores puede manejar 3 canales RC. Dos canales para el control de la posición y velocidad de los motores, y un tercero que puede ser usado para una salida ON/OFF a la se pueden conectar cargas inductivas y resistivas. Esta salida puede conducir 2A hasta a 24 V. El tercer canal se dejó libre para implementaciones futuras.

El controlador recibe señal del receptor de radiofrecuencia en forma de pulsos de voltaje. Esta comunicación se da por medio de un conector DB15. La asignación de los principales pines del conector DB15, en el modo RC, se muestra en la tabla 4.5-1:

Número de Pin	Entrada o salida	Descripción
3	Entrada	Canal 1: señal RC para motor
4	Entrada	Canal 2: señal RC para motor
5	Salida	Tierra del controlador

Tabla 4.5.1-1: Pines del conector DB15 del controlador de motores usados para comunicación RC

En el presente proyecto, se hizo uso de los canales 1 y 4 del receptor de radiofrecuencia para el control de los motores.

Un diagrama de la integración del receptor de radiocontrol y la computadora portátil (vía comunicación serial) con la utilización del switch operado a radiocontrol se muestra más adelante, en la figura 4.5.3-1, en la sección 4.5.3, "Circuito de Switch RC/RS232".

4.5.2 Funcionamiento autónomo

El funcionamiento autónomo permite prescindir de la presencia del usuario. En este caso, el "cerebro" del sistema es la computadora portátil a bordo de la plataforma. Este computador se encarga de recibir las señales de los sensores y en base a éstas tomar decisiones y enviar señales de mando a los actuadores. Este funcionamiento permite que el robot cuente con capacidades de navegación autónomas.

La lógica del funcionamiento autónomo es explicada en detalle en el capítulo 6.1, "Lógica de modo autónomo".

Los componentes electrónicos que conforman el sistema autónomo son los siguientes:

-Computadora portátil: recibe, procesa y envía señales de mando al controlador de los motores. Se utilizó el paquete de software Labview como medio de programación y comunicación.

-Sensores: se utilizan como medio de percepción del ambiente que rodea al robot. Se tienen tres: dispositivo GPS, brújula electrónica y sensor de ultrasonido.

-Circuito Switch RC/RS232: recibe la señal del receptor de radio frecuencia, para activar el modo RC o el modo RS232.

COMUNICACIÓN SERIAL CON EL CONTROLADOR

En el modo autónomo, la conexión entre el controlador y el computador se ejecuta por medio del puerto serial del controlador. El modo de operación del controlador necesario para esta configuración es comunicación serial RS232.

El modo de operación RS232 permite el control del robot por medio de un software en la computadora portátil. Se pueden enviar comandos y solicitudes, y configurar los parámetros de funcionamiento del controlador. Por otro lado, para el envío manual de comandos se puede utilizar un programa de emulación de terminal llamado Roborun PC utility 1.9.

A continuación, en la tabla 4.5.2-1, se muestra la asignación de cada pin del conector DB15 en el modo RS232:

Número de Pin	Entrada o salida	Descripción
2	salida	Datos RS232 desde el controlador al PC (TxData)
3	entrada	Datos RS232 desde la PC al controlador (RxData)
5	salida	Tierra del controlador

Tabla 4.5.2-1: Pines del conector DB15 del controlador de motores usados para modo autónomo

Protocolo de comunicación RS232

El protocolo de comunicación RS232, está dado por los siguientes parámetros, especificados en el manual del controlador:

-9600 bits/s

-7-bit datos

-1 start bit

-1 stop bit

-paridad impar.

-sin flow control.

COMANDOS DE COMUNICACION

Se pueden enviar comandos o solicitudes al controlador por medio de series de caracteres, seguidos de un “enter”. Los comandos utilizados en este proyecto se presentan en la tabla 4.5.2-2:

Comando	Descripción
!Ann	Girar motor en canal 1 hacia adelante a velocidad nn
!ann	Girar motor en canal 1 en reversa a velocidad nn
!Bnn	Girar motor en canal 2 hacia adelante a velocidad nn
!bnn	Girar motor en canal 2 en reversa a velocidad nn

Tabla 4.5.2-2: Comandos para comunicación serial

Los comandos utilizados para el avance del robot son !A35 y !B35, que resultan en una velocidad lineal de 1.1 m/s, aproximadamente. Los comandos utilizados para la secuencia de giro son !A15 y !b15 para un giro a la izquierda y !a15

y !B15 para un giro a la derecha. La velocidad de giro resultante es de 0.35 rad/s, aproximadamente.

Parámetros de configuración del controlador

También es posible acceder y cambiar varios parámetros de funcionamiento del controlador. Entre estos se tiene: modo de entrada de control, límite de amperios, aceleración, ganancias PID, modo de control del motor, entre otros.

Un diagrama de la integración del receptor de radiocontrol y la computadora portátil (vía comunicación serial) con la utilización del switch operado a radiocontrol se muestra más adelante, en la figura 4.5.3-1, en la sección 4.5.3, “Circuito de Switch RC/RS232”.

4.5.3 Circuito de Switch RC/RS232

Se instaló un circuito de cambio entre las modalidades RC y RS232. La activación de este switch es realizada por radio control, a través del canal 5 del receptor de radiofrecuencia.

Un esquema del circuito utilizado para esta finalidad se muestra en la figura 4.5.3-1:

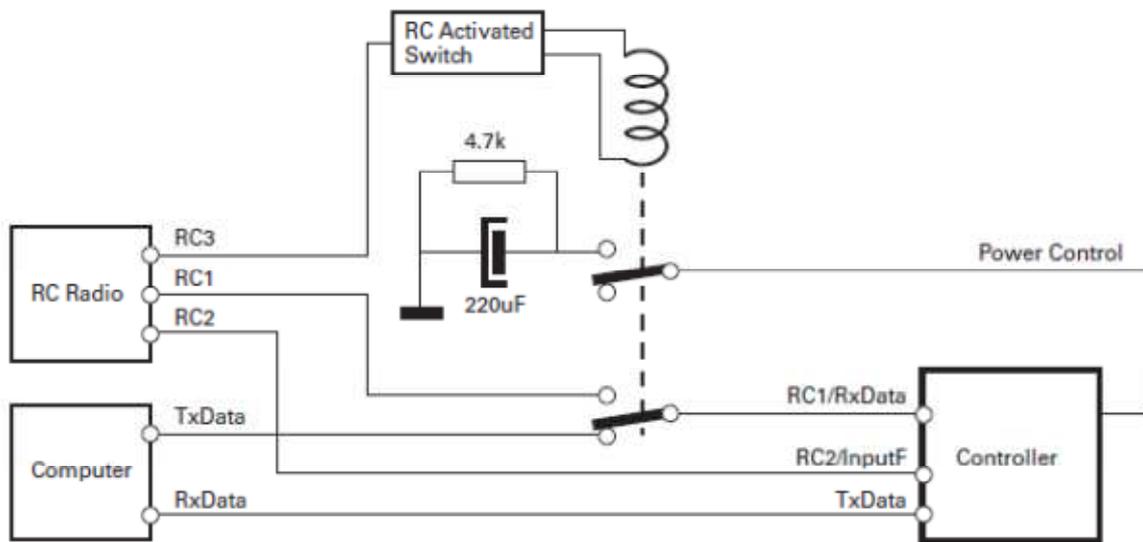


Figura 4.5.3-1. Esquema de circuito de switch RC/RS232

La resistencia de $4.7k\Omega$ y el capacitor de $220\mu F$ mostrados en la figura constituyen un sistema para reiniciar el controlador cada vez que el switch es activado. Esto es necesario siempre que se cambia de modalidad al robot.

CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LA PLATAFORMA – SISTEMA MECANICO

5.1 Diseño Conceptual

ESTRUCTURA SKID STEER

En el capítulo 2, “Marco teórico”, se expusieron las ventajas de la configuración de ruedas tipo skid steer y se estableció que se utilizaría este modelo para el prototipo propuesto.

CONCEPTO DE MODULARIDAD

Como se definió en la sección 3.1, “Alcance y requisitos de diseño”, se desea que la plataforma tenga un diseño de tipo modular. A continuación se explica detalladamente el concepto de modularidad y como éste fue implementado en el prototipo de plataforma construido.

Una definición de modularidad encontrada en el sitio web [www.mitecnologico.com](http://www.mitecnologico.com/Main/ModularidadObjetos) (<http://www.mitecnologico.com/Main/ModularidadObjetos>) resulta útil:

“La modularidad es la capacidad que tiene un sistema de ser estudiado, visto o entendido como la unión de varias partes que interactúan entre sí y que trabajan para alcanzar un objetivo común, realizando cada una de ellas una tarea necesaria para la consecución de dicho objetivo. Cada una de esas partes en que se encuentre dividido el sistema recibe el nombre de módulo”

Se añade también:

“La Modularidad es la propiedad de un sistema que permite su descomposición en un conjunto de módulos cohesivos y débilmente acoplados.”

De esta manera, el objetivo de implementar un diseño modular en el prototipo de plataforma de exploración, es obtener flexibilidad. Construir el vehículo como un conjunto de módulos trae la ventaja de que puede ser fácilmente adaptable a diferentes situaciones, cambiando uno de los módulos por otro que cumpla una tarea similar.

Es importante recalcar que el concepto de modularidad descrito arriba implica que los módulos están “débilmente acoplados”. En el caso de la plataforma construida, el vehículo debe ser robusto, pero el concepto de módulos débilmente acoplados se refiere a que éstos deben ser fáciles de reemplazar uno por otro. Es decir, no se debería tener que desarmar gran parte del vehículo para intercambiar un módulo. Para esto, es importante recalcar que la manera en la que los módulos se acoplan debe ser estándar, para poder reemplazar un módulo por otro que cumpla una función similar.

El concepto de modularidad y su aplicación en el vehículo construido se explican a continuación.

COMPONENTES MODULARES:

Se definió que sería adecuado dividir al vehículo en un conjunto de módulos, con el objetivo de asignar a cada módulo una función específica. El alcance de este proyecto contempla diseñar y construir únicamente los módulos mencionados a

continuación, pero de requerirse a futuro, podrían construirse nuevos módulos para otras aplicaciones.

El objetivo es crear un vehículo compuesto de módulos independientes, cada uno con una función específica. Los módulos que se definieron son los siguientes:

-Módulo central

-Módulos de transmisión (x2)

-Módulo central:

Contiene a los componentes eléctricos de potencia: motores, baterías y controlador de los motores. Los componentes electrónicos y sensores se encuentran también aquí. Se puede considerar a éste como el “modulo principal”, dado que cada uno de los otros módulos se sujeta únicamente a éste. La idea del concepto de modularidad es el poder intercambiar los otros módulos de manera fácil, manteniendo el principal.

Dado que los motores se ubican en este módulo, se debe transmitir el movimiento desde el módulo central hasta los módulos de transmisión. Con el objetivo de mantener el concepto de modularidad se planteó que el movimiento de los motores sería transmitido hasta dos ejes ubicados en el módulo central (posteriormente se refiere a éstos como ejes centrales). El acople de los módulos de transmisión y la transmisión de movimiento se haría por medio de estos ejes únicamente.

-Módulos de transmisión:

Están conformados por componentes del sistema de transmisión. El sistema de transmisión debe poder ser desacoplado del vehículo como un bloque entero, con todas sus partes contenidas en éste.

Se prevén dos módulos de transmisión independientes, uno ubicado a cada lado del vehículo. Como se mencionó en el punto anterior, estos módulos deben ser acoplados al módulo principal por medio de los denominados ejes centrales.

Un diagrama conceptual del vehículo, compuesto por los módulos descritos, se muestra en la figura 5.1-1:

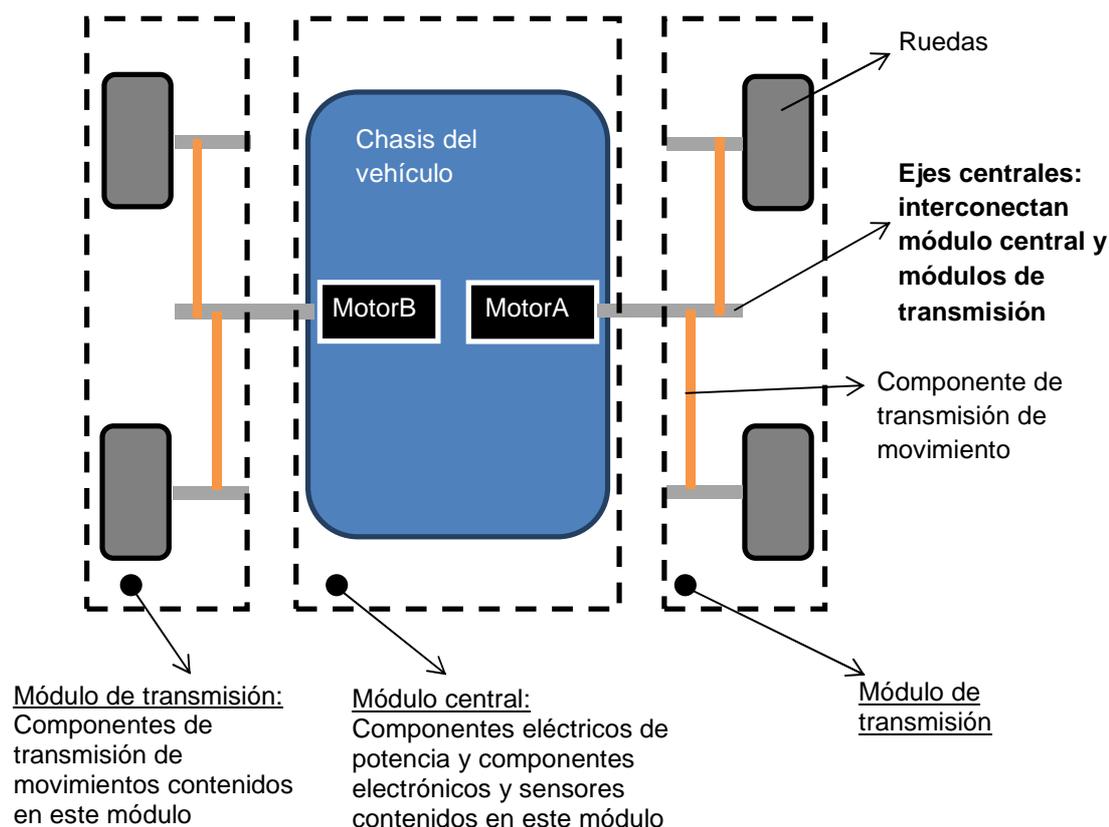


FIGURA 5.1-1: Diagrama conceptual del vehículo – división en módulos

5.2 Módulo Central

En esta sección se describe el módulo central, cuya función es servir como estructura del vehículo y contener tanto los componentes eléctricos de potencia, como los componentes electrónicos. Se refiere a éste también como el módulo principal, ya que los demás módulos van fijos a éste.

Los componentes y piezas manufacturadas, tanto como las imágenes de éstas, presentadas en esta sección, se describen de manera conceptual. Planos con dimensiones y especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo B.

Por motivos de claridad en la descripción, el módulo central se ha subdivide en tres secciones:

-Chasis: está compuesto de una base, sobre la cual se sujetan los componentes electrónicos de potencia (motores, baterías, controlador de motores), y una tapa que protege a éstos

-Compartimiento de componentes electrónicos: alberga a los componentes electrónicos y sensores. Está ubicado en la parte superior del chasis

-Parrilla delantera: sección que sobresale de la plataforma en la parte delantera. Alberga al sensor de ultrasonido

Estas tres secciones se detallan a continuación.

5.2.1 Chasis

El proceso de selección de los componentes eléctricos de potencia se detalla en el capítulo 4.1, "Componentes de Potencia". Los componentes de éste tipo son los motores, baterías y un controlador, el cuál suministra y regula la energía que proveen

las baterías, para entregarla a los motores. En esta sección se utilizan únicamente las dimensiones y pesos de dichos componentes para su distribución sobre el chasis.

Los componentes seleccionados, con sus respectivas dimensiones y pesos, son los siguientes:

<u>Componente</u>	<u>Número de componentes</u>	<u>Dimensiones (largo x ancho x altura)</u>	<u>Peso</u>
motores:	2	25.7 x 13.9 x 11.4 cm	5.9 kg
baterías:	2	18.1 x 7.6 x 16.0 cm	6.0kg
controlador:	1	22.9 x 14.0 x 4.6 cm	1.36 kg

TABLA 5.2.1-1: Dimensiones y peso de componentes de potencia

UBICACIÓN DE COMPONENTES

Es importante tomar en cuenta que el modelo elegido de skid steer exige que un motor mueva las dos ruedas de un lado y el otro motor las ruedas del otro lado. Por este motivo los motores son los componentes más críticos y es la ubicación y orientación de estos componentes la que determinó la ubicación y orientación de los demás componentes de potencia.

Luego de varios diseños preliminares y análisis de diferentes alternativas, se determinó la siguiente configuración para los motores, mostrada en la figura 5.2.1-1 (la base del chasis se muestra en la figura 5.2.1-1 como referencia de la ubicación de los motores. Más adelante se determinan las dimensiones del chasis):

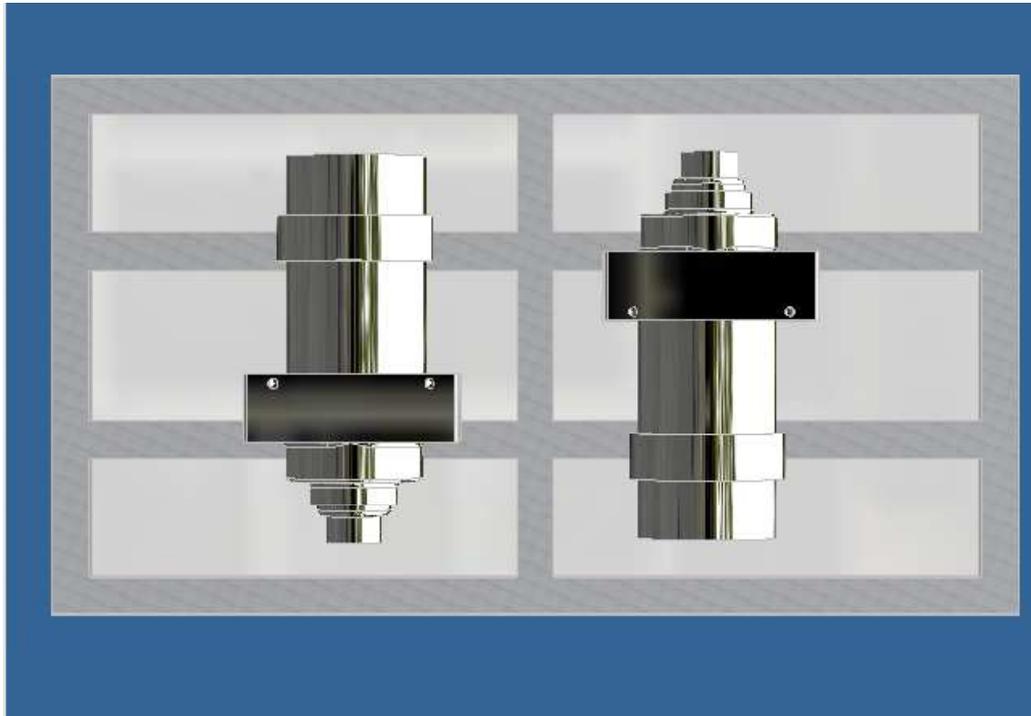


FIGURA 5.2.1-1: Configuración elegida de motores para el modelo skid steer

La disposición mostrada consiste en motores no alineados, orientados transversalmente con respecto al chasis del vehículo. En esta configuración el movimiento de los motores debe ser transmitido desde los motores hasta los ejes centrales, como se estableció en la sección 5.1, “Diseño conceptual”.

Teniendo la orientación y posición de los motores, se determinó la posición de los demás componentes de potencia. Las baterías están ubicadas en los extremos

delantero y trasero del chasis. Esta configuración permite una distribución simétrica del peso, lo cual es importante para la estabilidad y ubicación del centro de masa y rotación.

El controlador fue ubicado en el centro del chasis, entre los dos motores. Es importante señalar que este componente se orientó de manera vertical en el chasis para tener fácil acceso a los conectores en la parte superior.

Una vista superior de la configuración planteada para los componentes de potencia se muestra a continuación:

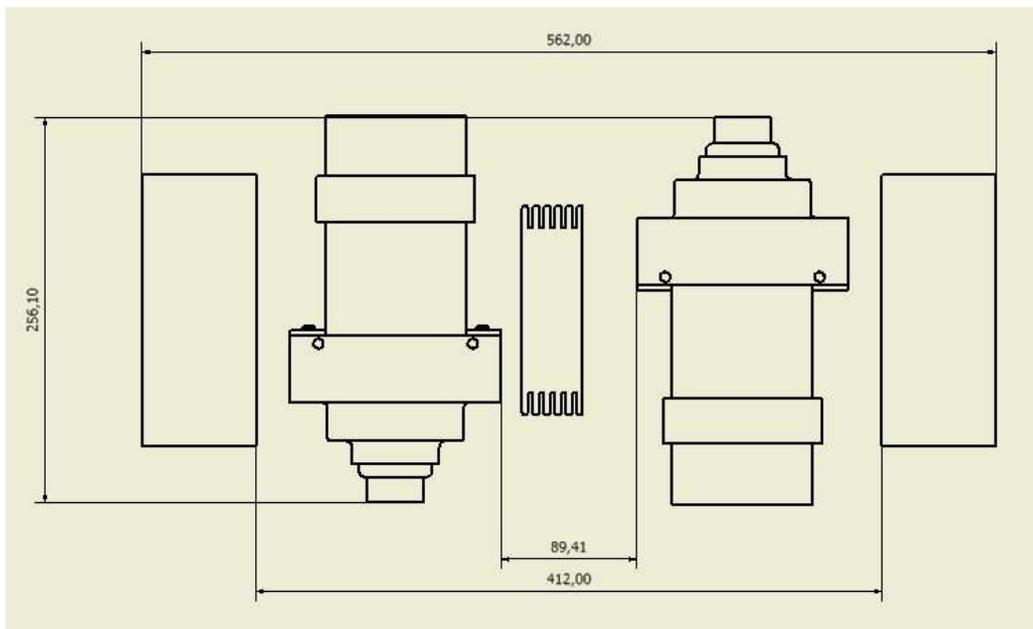


FIGURA 5.2.1-2: Configuración de componentes eléctricos de potencia

DISEÑO DEL CHASIS

El chasis fue fabricado de tubos cuadrados de aluminio de una pulgada de ancho y 1.5 mm de espesor y consiste de cuatro tubos paralelos orientados

longitudinalmente respecto al vehículo y tres tubos orientados transversalmente. El diseño de esta configuración se muestra en la figura 5.2.1-3:

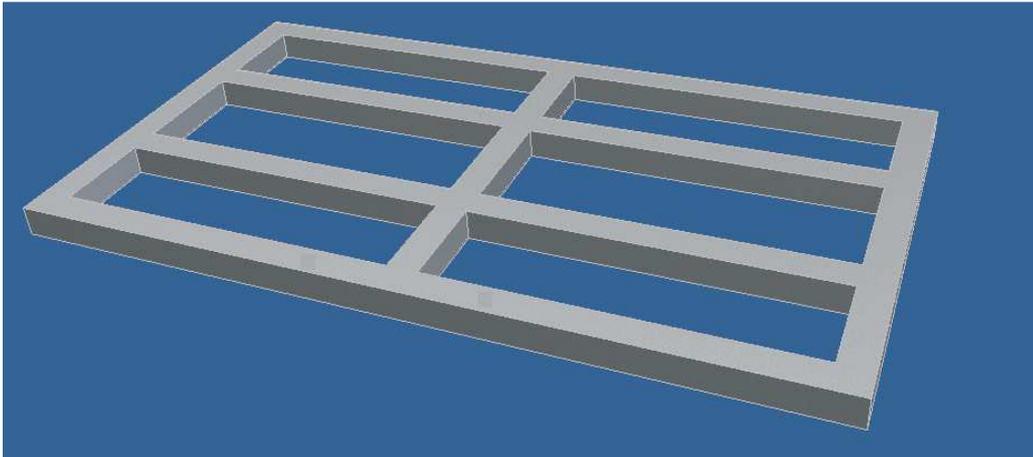


FIGURA 5.2.1-3: Base del chasis

Se decidió construir el chasis de aluminio ya que este material es considerablemente menos denso que el acero. Análisis de esfuerzos utilizando el método de elementos finitos para este y otros componentes se detallan en la sección 5.5, “Análisis de carga y estrés”. Estos análisis demuestran que se cumple con las expectativas y requisitos de diseño.

Además de la estructura de tubos de aluminio, se instaló una placa de este mismo material y de 1.5mm de espesor, la cual fue doblada y sujeta a la parte inferior del chasis, para cubrir los componentes de potencia del polvo y la humedad del ambiente. Esta placa fue asegurada con remaches.

Las dimensiones finales del chasis, necesarias para la instalación de todos los componentes de potencia son 60cm x 31cm. Se muestra a continuación una imagen

del chasis con todos los componentes que van ubicados sobre esta estructura. Se incluye también la placa ubicada en la parte inferior, mencionada anteriormente:

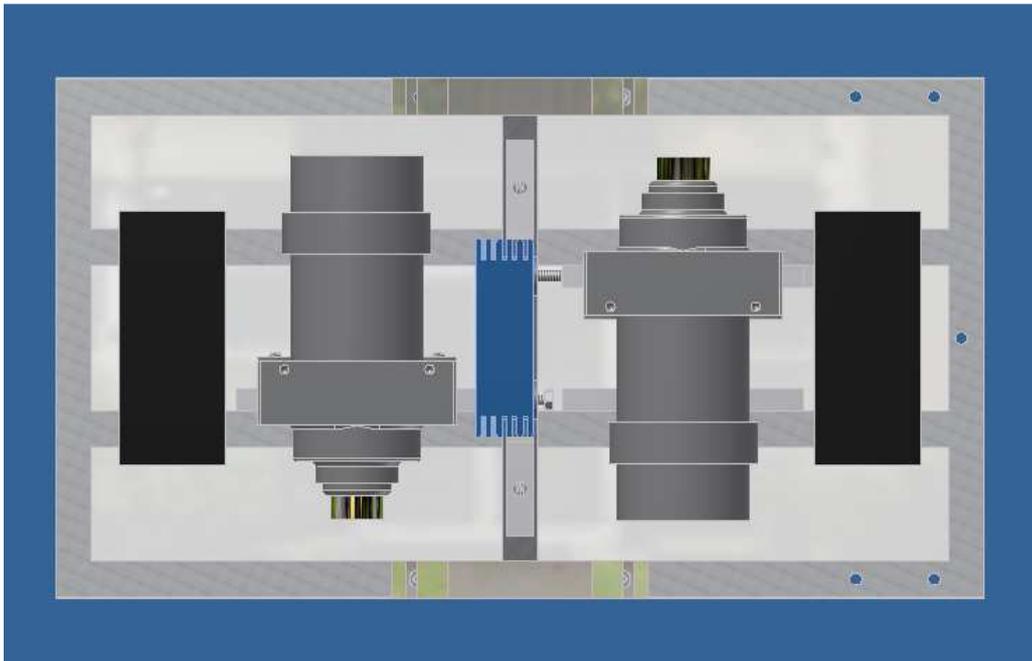


FIGURA 5.2.1-4: Chasis con componentes de potencia en posición

SUJECCIÓN DE LOS MOTORES

Los medios por los cuales los diferentes componentes de potencia fueron sujetos al chasis son de suma importancia, por lo que no se debe obviar este tema.

La parte trasera de los motores se ubicó encima de uno de los tubos longitudinales centrales del chasis. La parte delantera de los motores fue sujeta a un bloque de aluminio, el cual fue asegurado a la placa de aluminio en la parte inferior

del chasis. El motor junto con el bloque de aluminio en la parte frontal, se muestran a continuación:

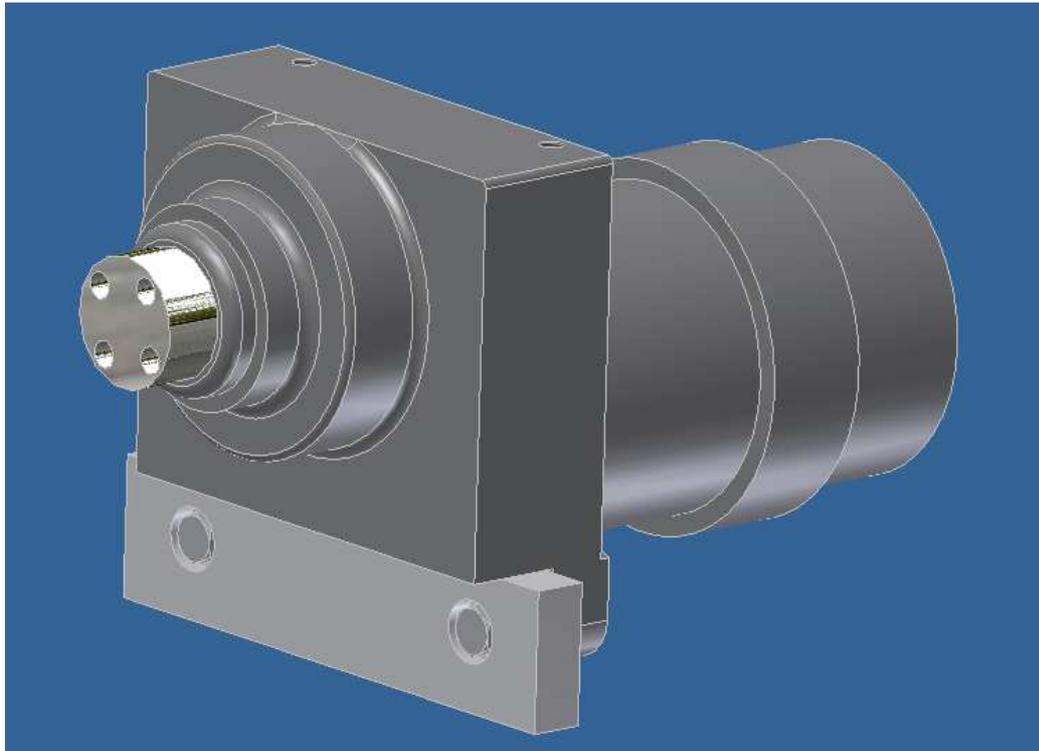


FIGURA 5.2.1-5: Motor sujeto a bloque de aluminio

El movimiento de los motores debe ser transmitido a los ejes centrales. Se definió que esta etapa de la transmisión se haría utilizando poleas y bandas dentadas, motivo por el cual se debió implementar un sistema de sujeción de los motores que permita a éstos desplazarse longitudinalmente con respecto al chasis, para tensar las bandas. Esto se logró sujetando los bloques de aluminio que aguantan los motores con pernos desde la parte inferior del chasis. Estos pernos se deslizan en agujeros alargados (comúnmente denominados “ojo chino”) en la placa inferior del bastidor.

SISTEMA DE TENSORES PARA MOTORES

El sistema de tensores para los motores es otro componente de suma importancia, ya que si no se tiene la tensión suficiente en las bandas, el funcionamiento de la plataforma puede verse seriamente afectado. El sistema desarrollado consiste en una barra de acero orientada transversalmente, la cual va desde un extremo al otro del chasis. Sobre la barra se soldaron dos secciones de eje con un agujero roscado que los atraviesa. En dichos orificios se introducen pernos, los cuales al girar avanzan en sentido longitudinal con respecto a la plataforma y empujan el bloque de aluminio que sujeta los motores. Este desplazamiento de los motores tensa las bandas. En la figura 5.2.1-6 se muestra el diseño de los tensores, con los motores sujetos al chasis:

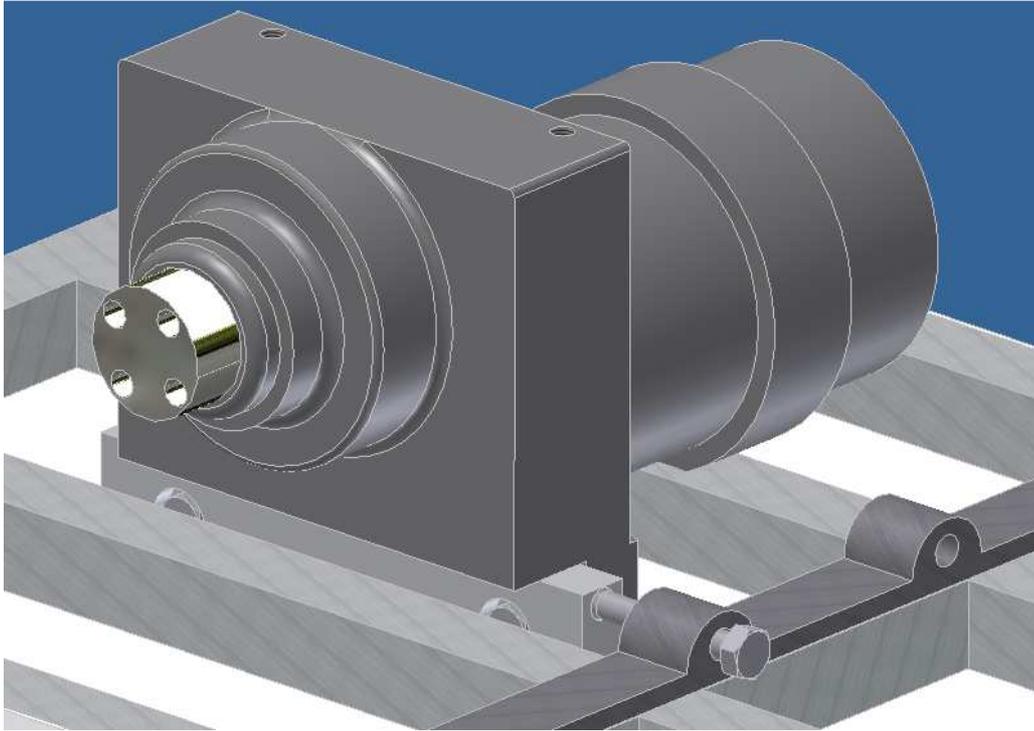


FIGURA 5.2.1-6: Tensores de motores instalados en el chasis

SUJECIÓN DE LAS BATERÍAS

La sujeción de las baterías se realizó colocando dos perfiles de aluminio, transversalmente con respecto al chasis del vehículo, a los lados de cada batería, y sujetándolas con amarras de plástico. Las amarras son un sistema de sujeción de tipo permanente, es decir que una vez instalado, se debe destruir la amarra para remover las baterías. Esto no representa ningún inconveniente, ya que una vez colocadas las baterías en su posición no hay necesidad de moverlas. En caso de moverlas, deberán colocarse nuevas amarras, lo cual es rápido y resulta económico.

SUJECION DEL CONTROLADOR

Se requirió construir un soporte para sujetar el controlador de los motores verticalmente. Este soporte consiste de dos ángulos de aluminio unidos por medio de pernos a dos placas de acero dobladas en forma de "L". Los ángulos de aluminio sujetan el controlador, mientras que las placas de acero van fijadas al chasis. La figura 5.2.1-7 muestra el diseño del sistema de sujeción con el controlador:

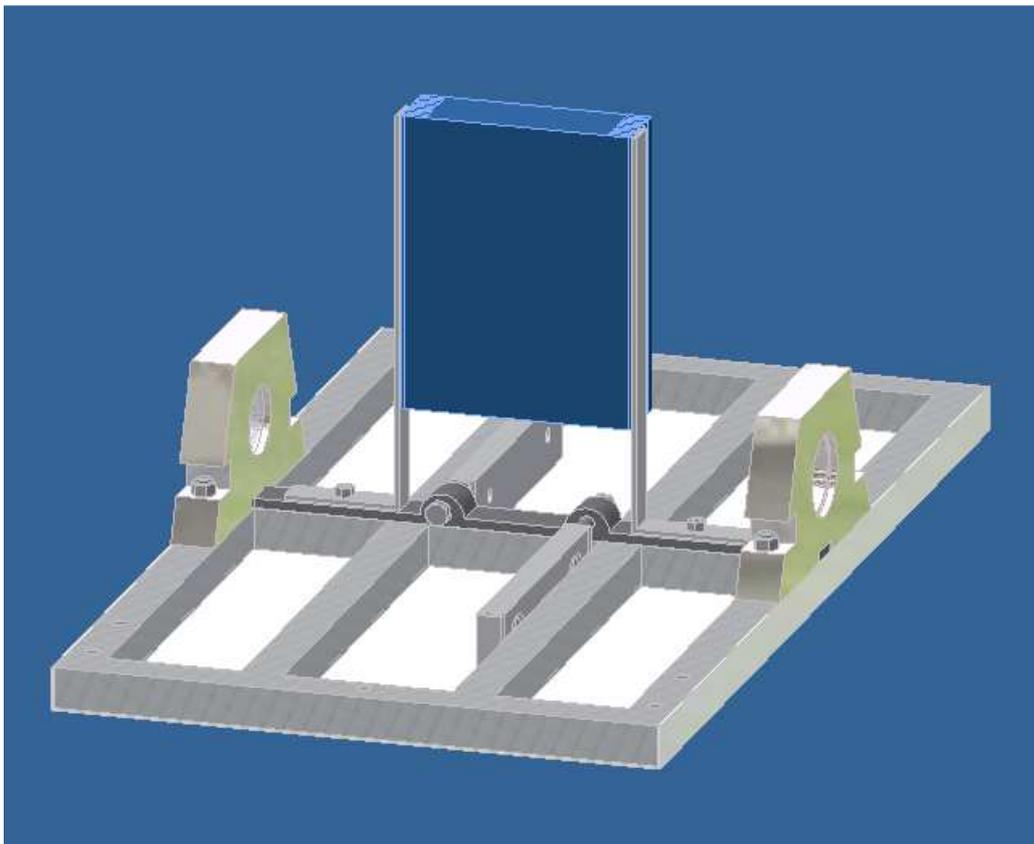


FIGURA 5.2.1-7: Ubicación y sistema de sujeción del controlador

EJES INTERIORES

En la sección 5.1, "Diseño Conceptual", se estableció que el vínculo entre el módulo de chasis y los de transmisión serían los llamados ejes centrales. Estos ejes

consisten en la unión de dos ejes: ejes interiores y ejes exteriores. Los ejes interiores pertenecen al módulo de chasis, mientras que los exteriores a los módulos de transmisión. El eje interior se acopla dentro del exterior y el movimiento es transmitido por una claveta.

Una imagen del conjunto de estos dos ejes, para formar uno de los denominados ejes centrales, se muestra en la figura 5.2.1-8:

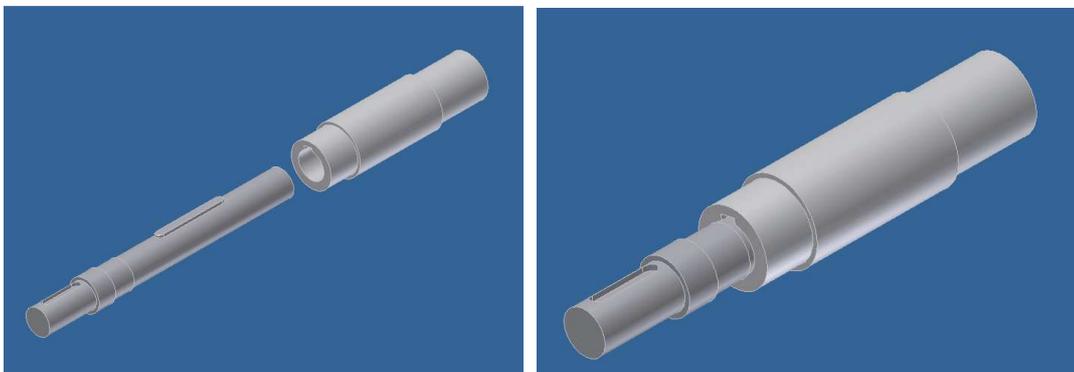


FIGURA 5.2.1-8: Eje central

El eje interior gira sobre un rodamiento, el cual se fija a un bloque de aluminio, denominado soporte de eje interior. Este soporte se sujeta con pernos a la parte inferior del chasis. Una imagen de este conjunto (eje interior, rodamiento y soporte de eje interior), montado en el chasis, se muestra en la figura 5.2.1-9:

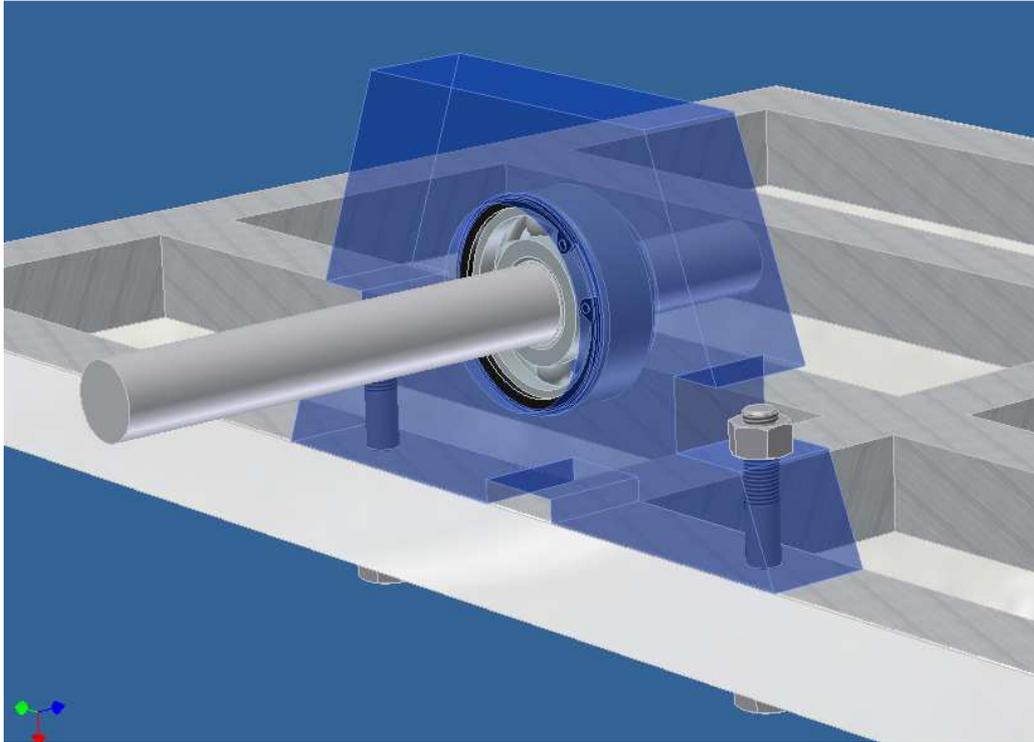


FIGURA 5.2.1-9: Eje interior, rodamiento y soporte de eje interior

RODAMIENTOS

Los rodamientos que soportan los ejes interiores son de la casa comercial SKF. Estos rodamientos son de tipo rígido de una hilera de bolas, aptos para soportar cargas elevadas en el sentido radial y cuentan también con un sello protector contra polvo y humedad. Los rodamientos utilizados son el modelo 6304. Las características de estos componentes se muestran en la tabla 5.2.1-2:

Modelo	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ancho(mm)	Capacidad de carga dinámica (kN)	Capacidad de carga estática (kN)	Velocidad límite (rpm)
6304	20	52	15	16.8	7.8	19000

TABLA 5.2.1-2: Rodamientos que soportan ejes interiores

TRANSMISION CON POLEAS Y BANDAS DENTADAS

Los ejes interiores reciben, por medio de una polea sujeta a éstos y una banda dentada, el movimiento desde los motores.

El vehículo posee 4 poleas, cuya relación de transmisión es de 1:1, es decir la velocidad y el torque no son alterados con la transmisión de movimiento. Dicha transmisión se logra con bandas dentadas entre cada par de poleas. Es importante aquí el uso de bandas dentadas, ya que este sistema permite una transmisión de movimiento suave y sin deslizamiento. El funcionamiento de estos componentes se muestra en la figura 5.2.1-10:

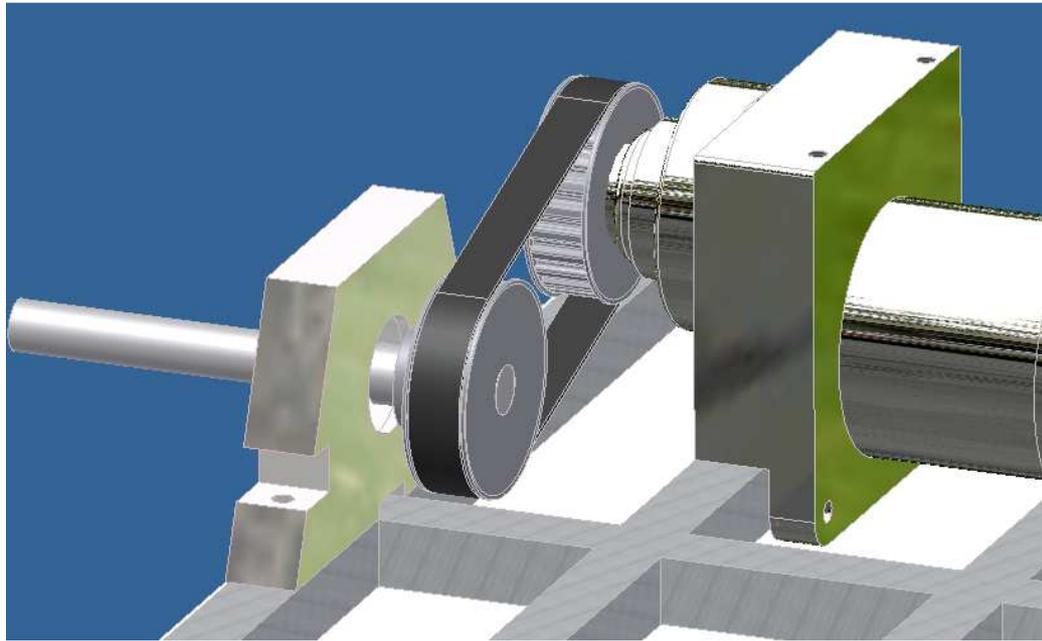


FIGURA 5.2.1-10: Transmisión con poleas y bandas

TAPA DEL CHASIS

Se diseñó una tapa que cubre el chasis, la cual cumple con dos funciones principales:

- servir de protección para los componentes eléctricos de potencia
- crear un segundo nivel, sobre los componentes de potencia, para ubicar los componentes electrónicos y sensores

La tapa diseñada se muestra en la figura 5.2.1-11:

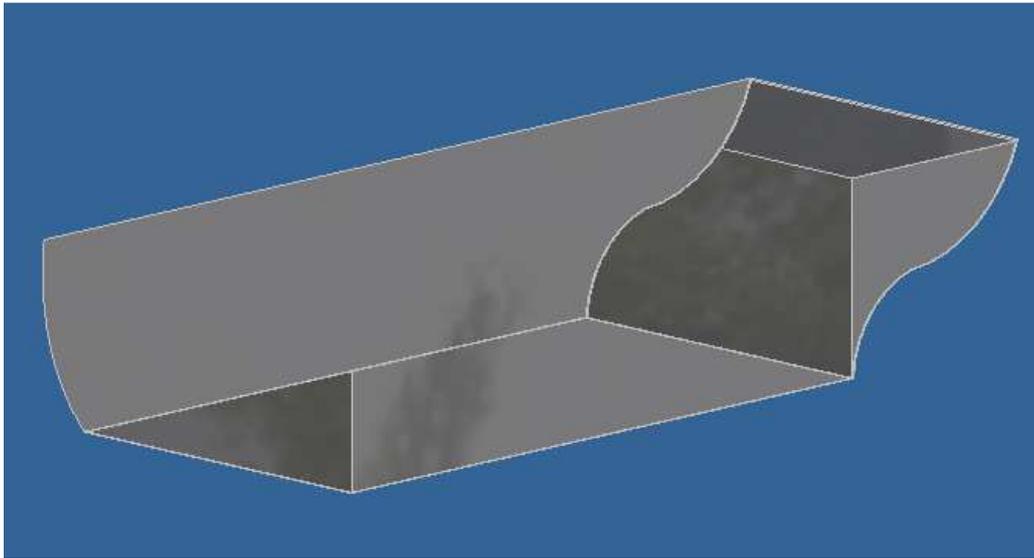


FIGURA 5.2.1-11: Tapa del chasis

La tapa cuenta, en su parte delantera, con una sección que sobresale del chasis. Esta sección sirve como visera para tapar el sensor de ultrasonido y la cámara de video, que irán ubicados en la parte delantera, del sol directo o la lluvia.

Un orificio en la parte superior de la tapa permite que el controlador sobresalga a través de éste, para tener fácil acceso a los conectores y botones de configuración del controlador. Más adelante se explica el diseño del compartimiento que protege los componentes electrónicos. La tapa de este compartimiento cubre también al controlador.

SUJECION DE LA TAPA DEL CHASIS

La tapa mostrada se ubica en la parte superior del chasis y se sujeta a éste por medio de pernos.

CAMARA DE VIDEO

La cámara de video de fijó a la tapa del chasis, por lo que se creyó conveniente mencionarla aquí.

La cámara esta montada en una base compuesta por dos articulaciones, cada una con un servomotor conectado a un canal del receptor de radiofrecuencia (y del control remoto, respectivamente). Esto permite que la cámara se mueva de manera horizontal y vertical, a mando de un operario.

SUJECION DE LA CAMARA DE VIDEO

La base que sujeta la cámara de video está fija a la tapa del chasis, por medio de pernos, en la parte frontal del vehículo. Se muestra en la figura 5.2.1-12:

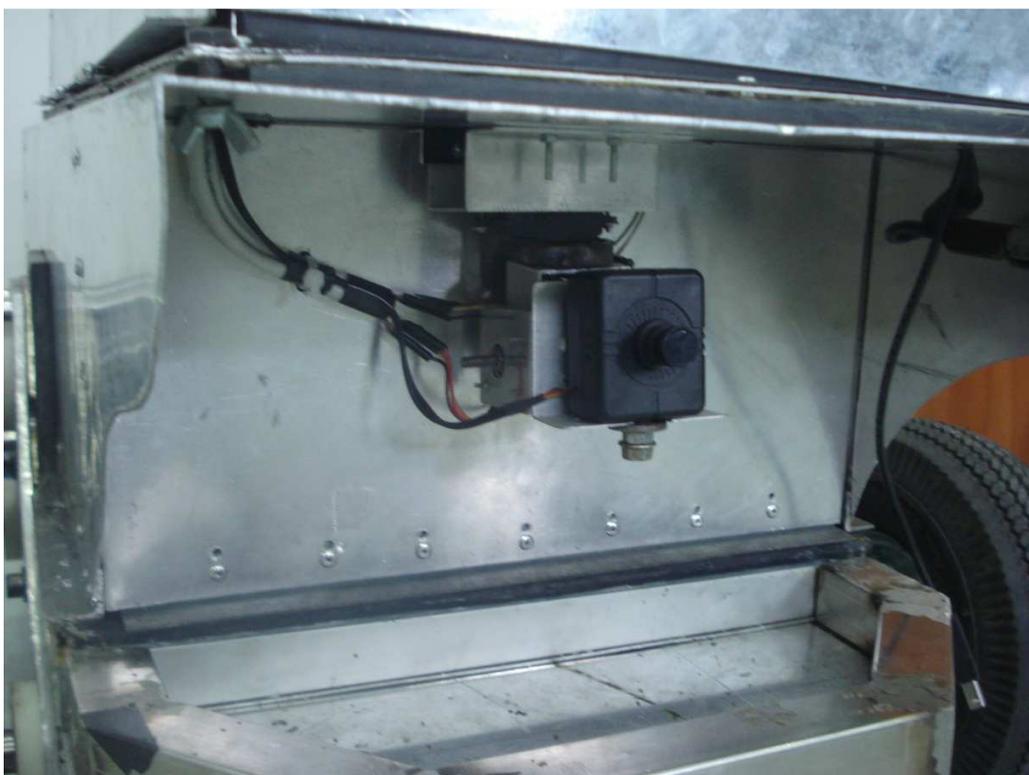


FIGURA 5.2.1-12: Sujeción de la cámara de video

BRUJULA ELECTRONICA

La brújula electrónica también fue sujeta a la tapa del chasis. Esto se hizo con el propósito de mantenerla lo más alejada posible de los demás componentes electrónicos, ya que éstos alteran el campo electromagnético alrededor de la brújula, afectando su funcionamiento. Este dispositivo se colocó bajo la visera de la tapa, lo que le brinda protección.

SUJECION DE LA BRUJULA ELECTRONICA

La brújula se fijó a la tapa utilizando pernos. Se muestra en la figura 5.1.2-13:



FIGURA 5.1.2-13: Sujeción de la brújula electrónica

5.2.2 Compartimiento de componentes electrónicos:

En esta sección se describe el compartimiento de componentes electrónicos, el cual forma parte del módulo central. Esta sección del módulo principal está formada por los componentes electrónicos y una base a la cual están sujetos. Este compartimiento se fija a la parte superior de la tapa del chasis.

Se creó este compartimiento para mantener a los componentes electrónicos y sensores separados de los componentes de potencia, lo cual es importante por dos motivos:

-Permite manipular a los componentes electrónicos y sensores, que son más delicados, por separado respecto a los componentes electrónicos de potencia, que son más robustos

-Separa a componentes electrónicos y sensores de los componentes de potencia, ya que algunos sensores pueden verse afectados por campos magnéticos resultantes de los componentes de potencia

COMPONENTES ELECTRONICOS Y SENSORES

El proceso de selección de los componentes electrónicos y sensores se detalla en la sección 4.3, "Componentes electrónicos y sensores". Aquí se presentan únicamente las dimensiones y pesos de dichos componentes, para su ubicación en el módulo central.

Los componentes seleccionados se muestran en la tabla 5.2.2-1:

<u>Componentes</u>	<u>Número de componentes</u>	<u>Dimensiones (largo x ancho x altura)</u>	<u>Peso</u>
-receptor de radiocontrol:	1	41.6 x 27.5 x 9.2mm	9.8g
-batería para receptor de radiocontrol:	1	56 x 50 x 14mm	153g
-emisor de señal para cámara de video inalámbrica:	1	63.5 x 76.2 x 25.4mm	113g
-batería para cámara de video inalámbrica:	1	97 x 72 x 48mm	450g
-computadora portátil:	1	335 x 250 x 42mm	2300g
-switch RC/RS232:	1	156 x 79 x 29mm	125g
-dispositivo GPS:	1	93.5 x 46 x 10.8mm	49.5g

TABLA 5.2.2-1: Componentes electrónicos y sensores

La cámara de video inalámbrica, el sensor de ultrasonido y la brújula electrónica se mencionan en la sección 4.3, "Componentes electrónicos y sensores", pero no constan en la tabla 5.2.2-1, ya que no se ubican en el compartimiento de componentes electrónicos.

DISEÑO DE LA BASE PARA COMPONENTES ELECTRONICOS Y SENSORES

La base para los componentes electrónicos y sensores está formada por una placa de aluminio, con perfiles del mismo material sujetos a los extremos de la placa. Los perfiles sirven para darle rigidez a la placa y para proteger los componentes montados sobre ésta.

El diseño de la base para los componentes electrónicos y sensores se muestra en la figura 5.2.2-1:

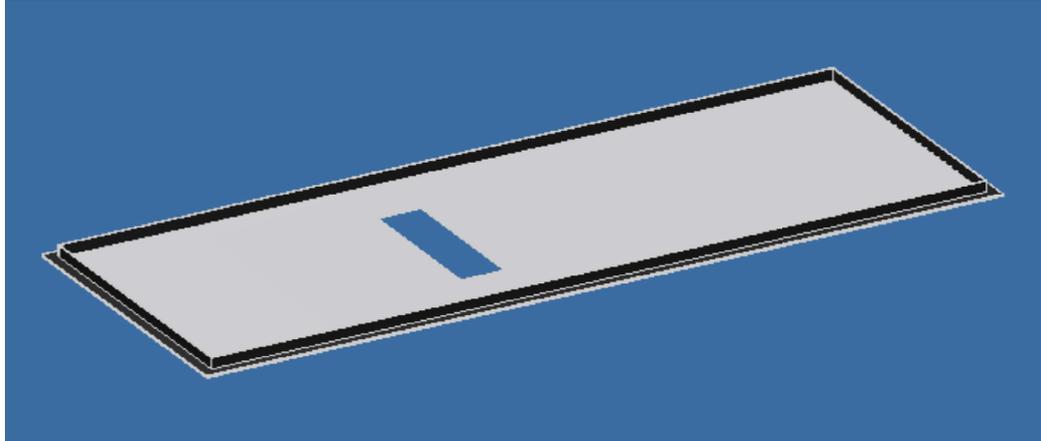


FIGURA 5.2.2-1: Base de componentes electrónicos y sensores

La base para los componentes electrónicos y sensores tiene un orificio en la parte central, al igual que la tapa del chasis, el cual sirve para dar paso al controlador, como se explicó en la sección anterior.

UBICACIÓN DE COMPONENTES ELECTRONICOS Y SENSORES

La ubicación y orientación de los distintos componentes se basa en la tabla 5.2.2-1, donde se describen las dimensiones de cada componente. La disposición de estos componentes en la base mencionada se muestra en la figura 5.2.2-2:

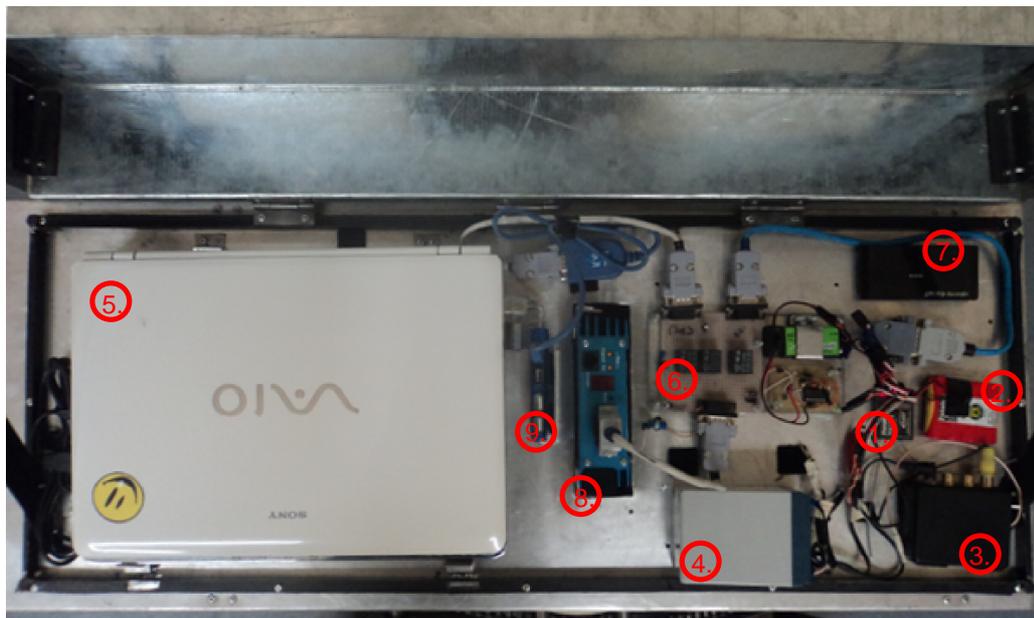


FIGURA 5.2.2-2: Disposición de componentes electrónicos y sensores en la base – vista superior

Los principales componentes electrónicos mostrados en la figura 5.2.2-2 se listan a continuación (según la numeración mostrada en dicha figura), en la tabla 5.2.2-2:

<u>Componentes</u>	<u>Número de componente según la figura 5.2.2-2</u>
-receptor de radiocontrol:	1
-batería para receptor de radiocontrol:	2
-emisor de señal para cámara de video inalámbrica:	3
-batería para cámara de video inalámbrica:	4
-computadora portátil:	5
-switch RC/RS232:	6
-dispositivo GPS:	7
-controlador de motores:	8
-hub USB:	9

TABLA 5.2.2-2: Principales componentes ubicados en la base de componentes electrónicos y sensores

SUJECION DE COMPONENTES

A continuación se describe la manera en la que los diferentes componentes fueron sujetos en la disposición mostrada en la figura 5.2.2-2.

El receptor de radio control y el emisor de la cámara de video, tanto como las baterías respectivas para cada uno de estos equipos, y el dispositivo GPS, fueron sujetadas a la placa utilizando velcro. Este sistema de sujeción permite un ajuste firme a la vez que se pueden remover y volver a colocar los componentes de manera fácil si es necesario. Otra ventaja de utilizar velcro es que las vibraciones del vehículo no se transmiten en su totalidad a estos componentes, ya que no están en contacto directo con la base.

El switch de cambio de modalidad RC/RS232 se fijó a la placa por medio de pernos.

Para la sujeción de la computadora portátil se diseñó un sistema de “ganchos” que consisten en una placa delgada de tol doblada de una forma específica para que sujete este componente. Dichos ganchos se fijaron, por medio de remaches, a la placa de los componentes electrónicos. También se colocó velcro para mayor seguridad. La ventaja de este sistema es que sujeta firmemente a la computadora, al mismo tiempo que ésta puede ser separada de la placa con facilidad, en caso de requerirse.

TAPA DEL COMPARTIMIENTO DE COMPONENTES ELECTRONICOS

Esta tapa se fabricó de una lámina de acero galvanizado de 1.2mm de espesor. La lámina fue doblada para formar un rectángulo con 4 paredes, a las que se fijaron perfiles de acero con remaches, para mantenerlas en posición. Se muestra el diseño de esta tapa en la figura 5.2.2-3:

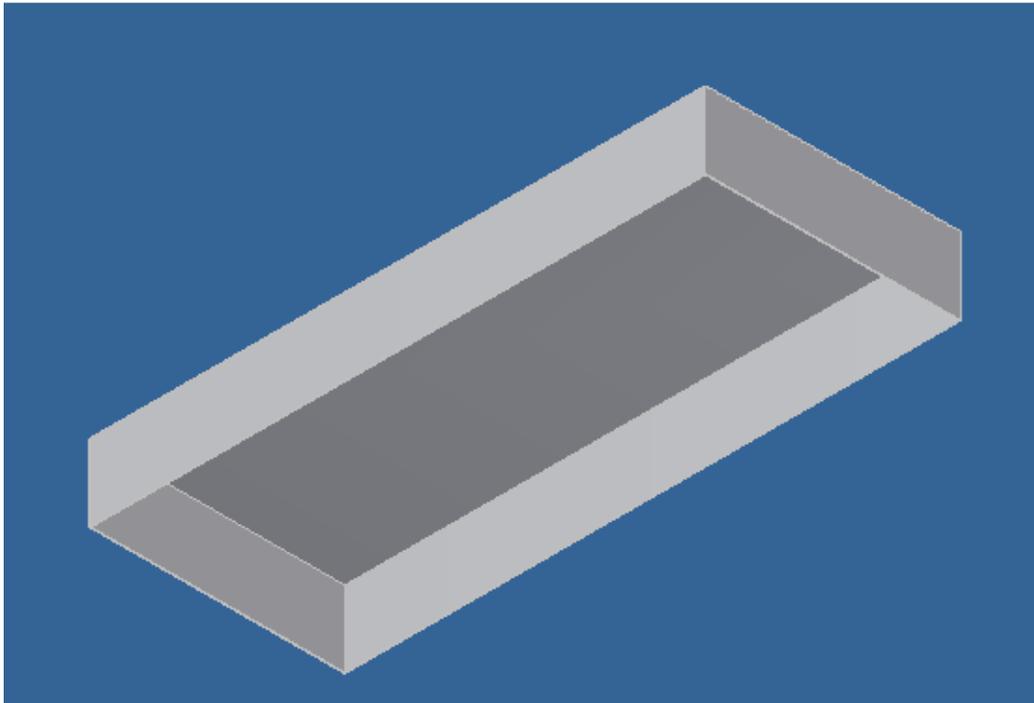


FIGURA 5.2.2-3: Tapa de compartimiento de componentes electrónicos

SUJECIÓN DE LA TAPA DEL COMPARTIMIENTO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

La tapa se sujetó a la base con bisagras, para permitir levantar la tapa de una manera cómoda. Se sujetaron también correas de tela entre la base y la tapa para que ésta se mantenga abierta.

SUJECION A LA TAPA DEL CHASIS

El compartimiento de componentes electrónicos se une a la tapa del chasis por medio de pernos. Esto se muestra en la figura 5.2.2-4:

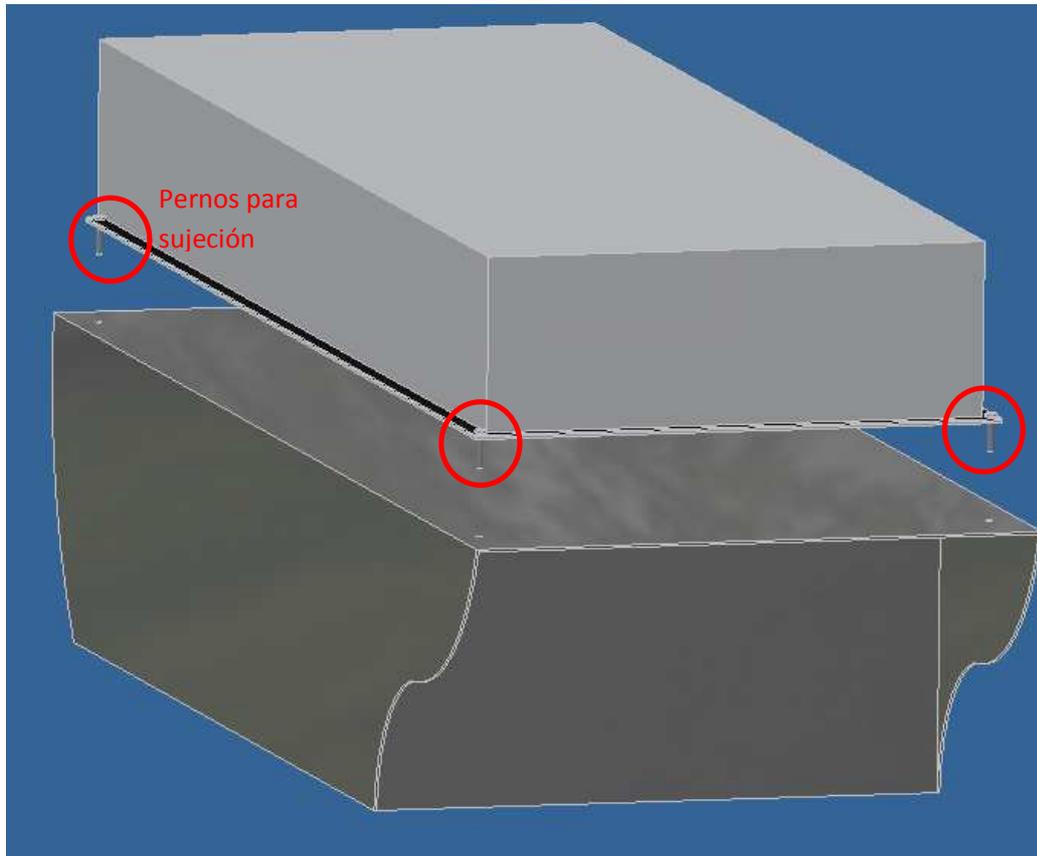


FIGURA 5.2.2-4: Unión del compartimiento de componentes electrónicos a la tapa del chasis

5.2.3 Parrilla delantera

En esta sección se describe la parrilla delantera, la cual tiene dos funciones:

- Posicionar al sensor de ultrasonido en la parte frontal del vehículo para la detección de obstáculos
- Servir de guardachoques al vehículo.

DISEÑO DE LA PARRILLA DELANTERA

La parrilla está conformada por 5 tubos de acero inoxidable, soldados en diferentes ángulos, con una placa de aluminio de 5mm de espesor en la parte inferior.

El diseño de la parrilla se muestra en la figura 5.2.3-1:

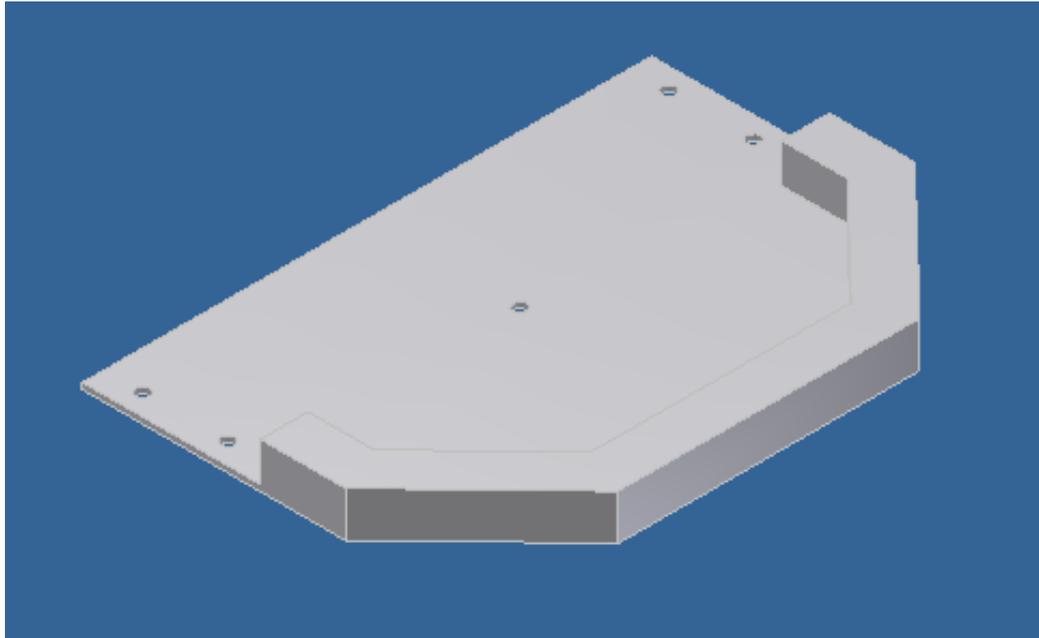


FIGURA 5.2.3-1: Parrilla delantera

SENSOR DE ULTRASONIDO

El sensor de ultrasonido descrito en la sección 4.3, “Componentes electrónicos y sensores”, debió ubicarse en la parte frontal del vehículo, lo que creó la necesidad la parrilla.

UBICACION DEL SENSOR

El sensor de ultrasonido está ubicado en la parte central de la parrilla.

SUJECION DEL SENSOR

El sensor de ultrasonido y su base (que incluye el motor y el bloque NXT, mencionados en la sección 4.3.5, “Sensor de ultrasonido”) se sujetan a la parrilla utilizando pernos. Esto se muestra en la figura 5.2.3-2:



FIGURA 5.2.3-2: Sensor de ultrasonido y base con motor

SUJECION DE LA PARRILLA

La parrilla va sujeta por medio de pernos que atraviesan la placa de aluminio de ésta y se unen a la parte delantera del chasis.

5.2.4 Diseño final de módulo central

A continuación se muestra el diseño final del módulo central, como conjunto de las tres subsecciones de las que éste se compone: chasis, compartimiento de componentes electrónicos y parrilla delantera. Esto se muestra en la figura 5.2.4-1:

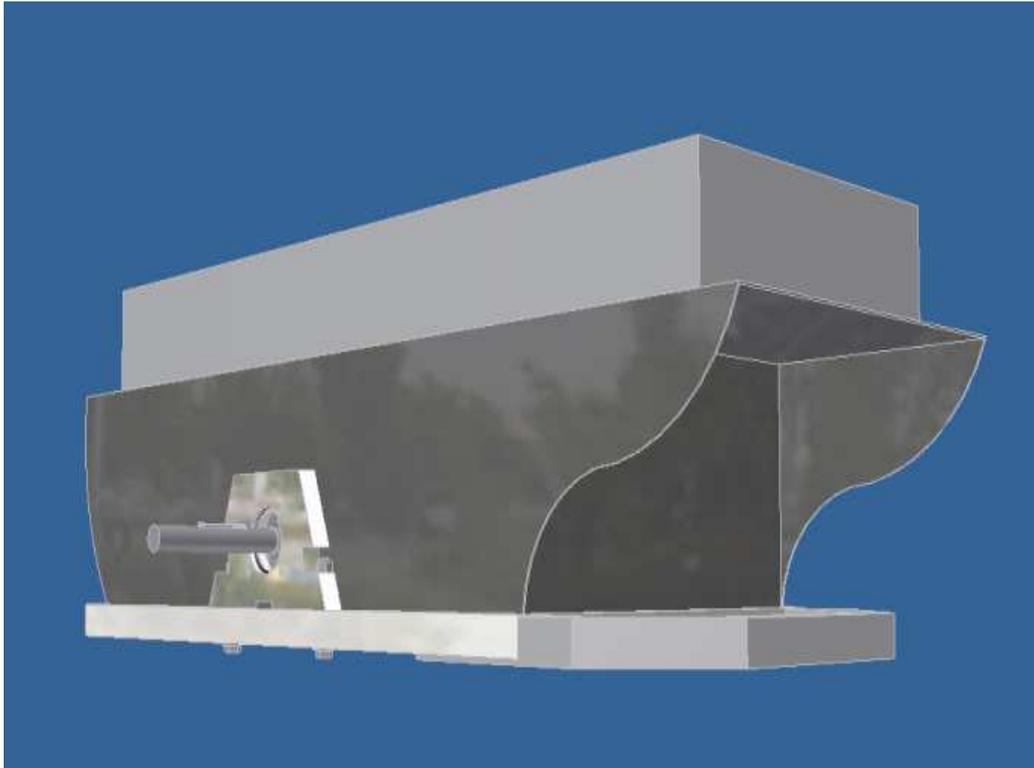


FIGURA 5.2.4-1: Diseño final del módulo central

5.3 Módulo de Transmisión

En esta sección se describen los módulos transmisión. El objetivo al crear módulos de transmisión es el de tener la mayor parte de los elementos relacionados a la transmisión de movimiento en bloques independientes, y que éstos puedan ser reemplazado por otro tipo de transmisión o de ruedas en caso de ser necesario. Se crearon dos bloques de transmisión idénticos, donde cada uno se fija a un lado del módulo central.

Como se explicó anteriormente, parte de la transmisión de movimiento se realiza en el módulo central (uso de bandas dentadas y poleas entre los motores y los ejes interiores). Los demás elementos de transmisión, contenidos en el módulo del mismo nombre, se analizan en esta sección.

COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TRANSMISION

El sistema de transmisión permite que el movimiento angular de los motores, ubicados en el chasis, sea transmitido hasta las ruedas, en contacto con el suelo, lo que hace que el vehículo se desplace y gire.

En esta sección se analizan los diferentes componentes principales del sistema de transmisión contenidos en este módulo, tanto como el sistema en conjunto. En las figuras 5.3-1 y 5.3-2 se muestran una figura de uno de los módulos de transmisión y un despiece de este módulo, respectivamente:



FIGURA 5.3-1: Módulo de transmisión

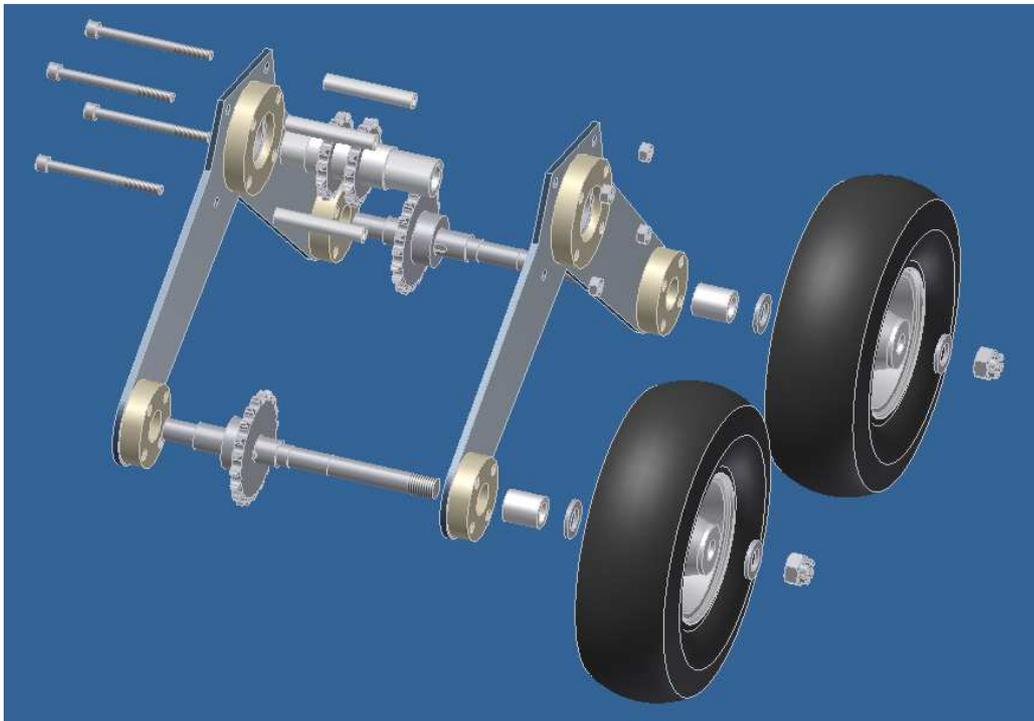


FIGURA 5.3-2: Módulo de transmisión – Despiece

Los componentes principales del módulo de transmisión, mostrados en las figuras 5.3-1 y 5.3-2, son los siguientes:

- Ejes exteriores
- Ejes de las ruedas
- Catalinas y Cadenas
- Soporte de ejes de la ruedas
- Ruedas
- Rodamientos

EJES EXTERIORES

Como se mencionó anteriormente, es a través de estos ejes que se acoplan los módulos de transmisión al módulo central. Los ejes exteriores entran en los interiores y el movimiento se transmite por medio de chavetas

Los ejes exteriores transmiten el movimiento, por medio de catalinas fijas a éstos y cadenas, desde los ejes interiores hasta los ejes de las ruedas. Los ejes exteriores están soportados y giran respecto a rodamientos que van montados en las piezas denominadas soporte de ejes de la ruedas.

Los ejes exteriores se muestran en la figura 5.3-3:



FIGURA 5.3-3: Ejes exteriores

En la figura 5.3-3 se observan chaveteras en el interior y en el exterior del eje. Las chavetas interiores sirven para transmitir el movimiento desde los ejes interiores a los exteriores, mientras que las chavetas exteriores transmiten el movimiento a las catalinas que se acoplan a este eje.

EJES DE LAS RUEDAS

Estos ejes transmiten el movimiento del eje central (conjunto eje interior - exterior), hasta las ruedas. El vehículo posee 4 de ejes de ruedas, dos a cada lado. Estos ejes están soportados por rodamientos que se alojan en el soporte de ejes de las ruedas. Estos ejes se muestran en la figura 5.3-4:

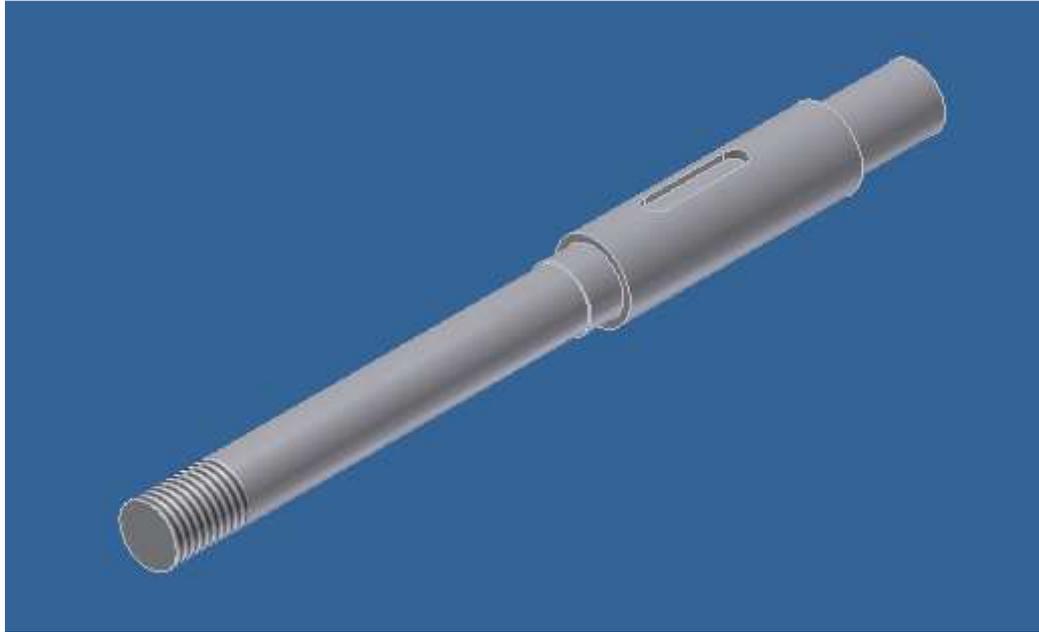


FIGURA 5.3-4: Ejes de las ruedas

En la figura 5.3-4 se observa que el eje posee una chavetera: se utilizan chavetas para transmitir el movimiento desde catalinas acopladas a este eje.

CATALINAS Y CADENAS

La transmisión de movimiento desde los ejes exteriores hasta los ejes de las ruedas se realiza por medio de catalinas y cadenas.

El vehículo posee 4 pares de catalinas, cada par con una respectiva cadena. Cada eje exterior posee dos catalinas, de 15 dientes cada una, y transmite movimiento a dos ejes de las ruedas, con catalinas de 20 dientes. De esto que la relación de transmisión entre cada par de catalinas es de 3 a 4, donde la velocidad disminuye en esta proporción, al mismo tiempo que aumenta el torque.

La transmisión de movimiento entre el eje principal y los ejes de las ruedas se realiza por medio de catalinas y cadenas debido a la distancia que existe entre estos ejes. La transmisión de movimiento en este punto utilizando engranajes hubiera significado un aumento considerable e innecesario en el peso, sin representar ninguna ventaja considerable con respecto al sistema de catalinas y cadenas.

Un sistema de bandas dentadas, como el utilizado entre los ejes de los motores y los ejes principales, implica tener que tensar las bandas. Un sistema de tensores en este punto hubiera resultado bastante complejo y desfavorable.

La desventaja del sistema de catalinas y cadenas respecto al de bandas dentadas es que existe juego mecánico con la utilización de catalinas. Sin embargo, el juego mecánico introducido no es crítico, dado que la orientación y posición de la plataforma se corrige de manera constante en la modalidad autónoma (este proceso se explica detalladamente en la sección 7.1, "Lógica de modo autónomo").

La transmisión de movimiento desde los ejes exteriores hasta los ejes de las ruedas, utilizando catalinas y cadenas se muestra en la figura 5.3-5:

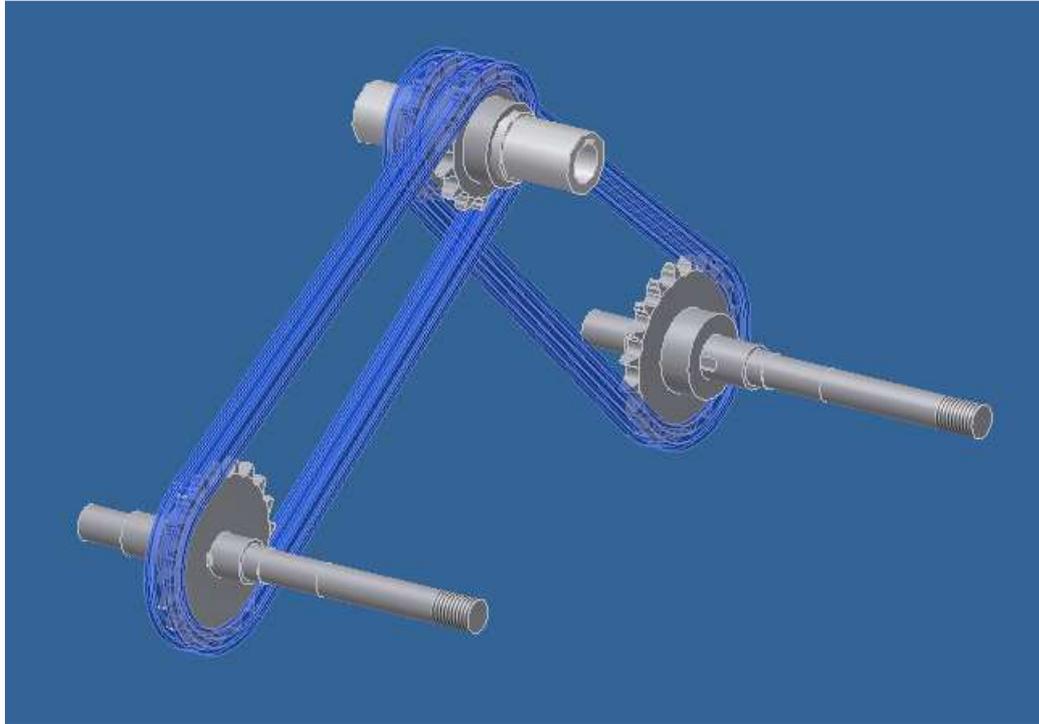


FIGURA 5.3-5: Sistema de catalinas y cadenas

SOPORTE DE EJES DE LAS RUEDAS

Estas piezas contienen la mayor parte del sistema de transmisión, además de soportar las llantas, sobre las que el peso de todo el bastidor se asienta. Soportan también los rodamientos que sostienen los ejes exteriores y ejes de las ruedas.

El diseño de esta pieza responde a la necesidad de un vehículo apto para terrenos irregulares, con el chasis separado a una distancia suficiente del suelo, para que éste no sea obstruido por obstáculos pequeños (en el capítulo 3.1.1, “Robustez y exploración en terrenos irregulares”, se estableció una altura del chasis mayor a 15 cm).

La ganancia en distancia del chasis con respecto al piso que el diseño de esta pieza aporta, es la distancia que existe entre los centros del eje central y los ejes de las ruedas. En el diseño realizado esta distancia es de 15 cm aproximadamente.

Estas piezas están hechas de aluminio y su forma consiste de curvas suaves para eliminar concentración de esfuerzos. Se muestran en la figura 5.3-6:

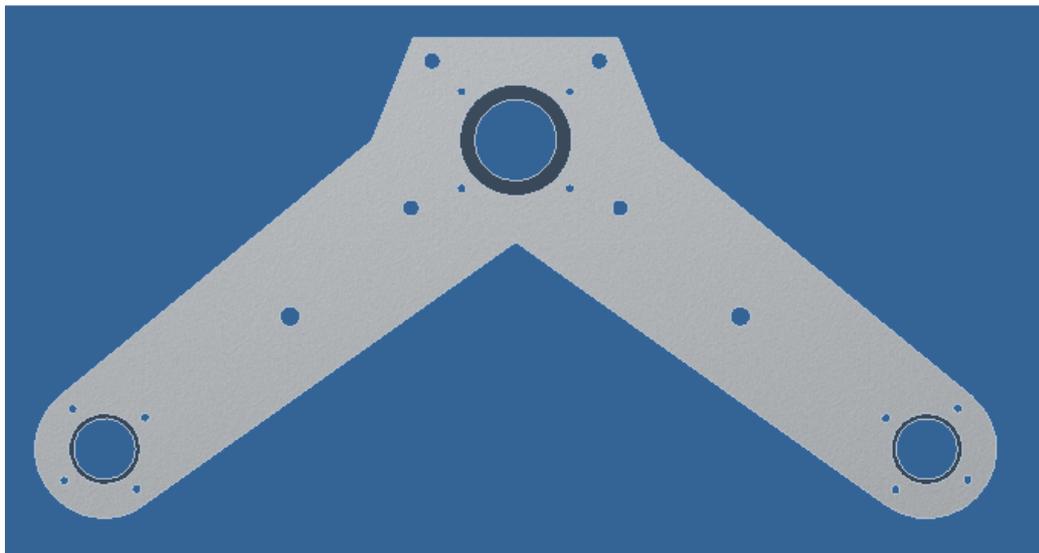


FIGURA 5.3-6: Soporte de ejes de las ruedas

RUEDAS

Dado que las ruedas son componentes que deben ser adquiridos, más no manufacturados, el diseño de la plataforma debió adaptarse a las ruedas disponibles comercialmente.

Las ruedas utilizadas en el vehículo contienen aire en su interior (no son de tipo macizo). Como se indicó en la sección 3.1.1, "Robustez y exploración en

terrenos irregulares”, uno de los requisitos de diseño es que la plataforma posea ruedas capaces de circular por terrenos irregulares.

Las ruedas utilizadas son ruedas frecuentemente usadas en carretillas, pero éstas se adaptaron bien al diseño realizado. El diámetro de las ruedas es de 25cm, suficiente para no quedar atascadas fácilmente en terrenos irregulares. Estas tienen también un labrado pronunciado.

El sistema por el que las ruedas se fijan consiste en un roscado en el eje de las ruedas, que permite que una tuerca presione a la rueda contra el eje para que no gire respecto a éste. Se utiliza una tuerca especial, de tipo castillo, para asegurar que ésta no se afloje con el funcionamiento de la plataforma. Con este sistema se transmite el movimiento únicamente por fricción entre la rueda y el eje, más no con el uso de chavetas.

Una de las ruedas montada sobre el eje se muestra en la figura 5.3-7. Un detalle del sistema de sujeción de la rueda en la figura 5.3-8:

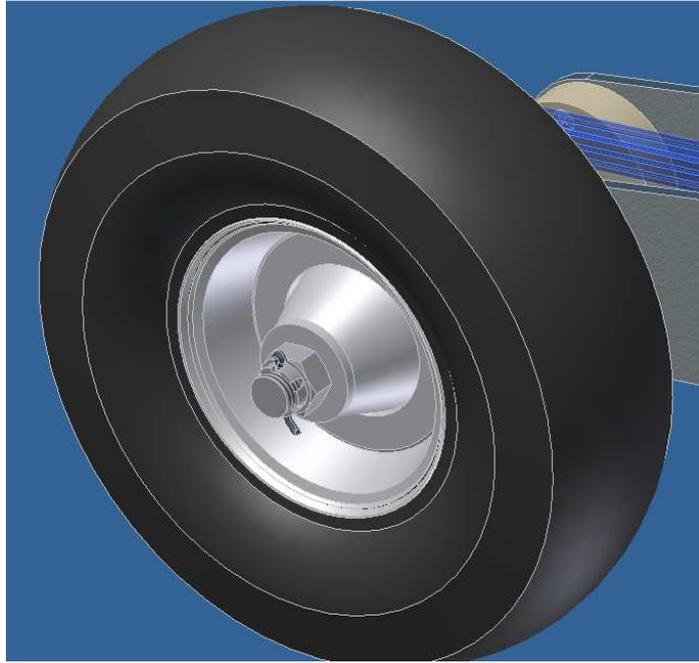


FIGURA 5.3-7: Rueda montada en uno de los ejes



FIGURA 5.3-8: Sistema de fijación de las ruedas a los ejes

RODAMIENTOS

Se utilizan dos tipos de rodamientos en este módulo, ambos de la casa comercial SKF. Los rodamientos son de tipo rígido de una hilera de bolas, aptos para soportar cargas elevadas en el sentido radial. Estos rodamientos tienen un sello protector contra polvo y humedad. Los rodamientos utilizados para el eje exterior son el modelo 16006. Los rodamientos de los ejes de las ruedas son el 16003. Las características de éstos se muestran en la tabla 5.3-1:

Modelo	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ancho(mm)	Capacidad de carga dinámica (kN)	Capacidad de carga estática (kN)	Velocidad límite (rpm)
16006	30	55	9	11.9	7.35	17000
16003	17	35	8	6.37	3.25	28000

TABLA 5.3-1: Rodamientos del módulo de transmisión

COMPONENTES SECUNDARIOS DEL SISTEMA DE TRANSMISION

Se denominó componentes secundarios a todos los componentes involucrados en el sistema de transmisión que no cumplen un papel directamente relacionado con la transmisión de movimiento. Estos componentes sirven principalmente para sujetar o mantener los componentes principales en posición. Se listan a continuación:

- Pernos
- Anillos de retención internos para rodamientos
- Pernos prisioneros
- Tuercas de castillo y pasadores

-Bujes para rodamientos

Los primeros 4 elementos de la lista son componentes comunes y no necesitan descripción detallada. El quinto elemento son los bujes sujetadores de rodamientos, los que se fabricaron de duralón. Estas piezas se diseñaron para mantener los rodamientos que soportan los ejes exteriores y ejes de las ruedas. Estos rodamientos son aprisionados contra el soporte de ejes de las ruedas, ajustando los bujes con pernos. Estos componentes se muestran en la figura 5.3-9:

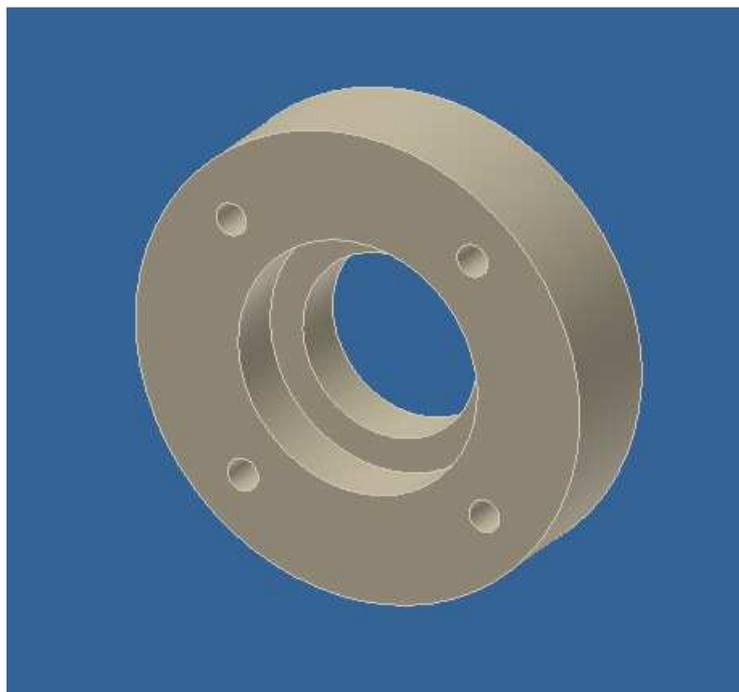


FIGURA 5.3-9: Bujes para rodamientos

La figura 5.3-10 muestra la manera en la que se instalan los bujes para la sujeción de los rodamientos:

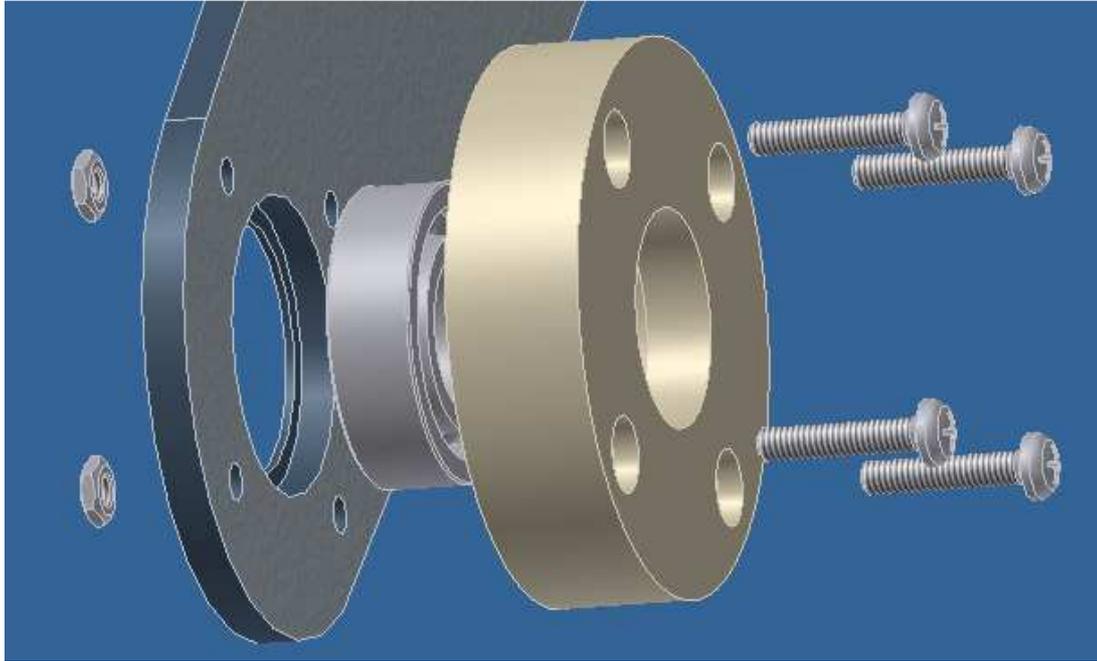


FIGURA 5.3-10: Sujeción de rodamientos con bujes

VISTA FINAL DEL MODULO TRANSMISION

El módulo de transmisión, con todos los componentes mencionados, se muestra en la figura 5.3-11:



FIGURA 5.3-11: Módulo de transmisión

SUJECION AL MODULO CENTRAL

Al instalar los módulos de transmisión, los ejes exteriores de estos módulos se acoplan a los ejes interiores del módulo principal. El movimiento de los motores se transmite de un módulo al otro por medio de estos ejes gracias al uso de chavetas.

La manera en la que los módulos de transmisión se acoplan al módulo central se muestra en las figuras 5.3-12 y 5.3-13:

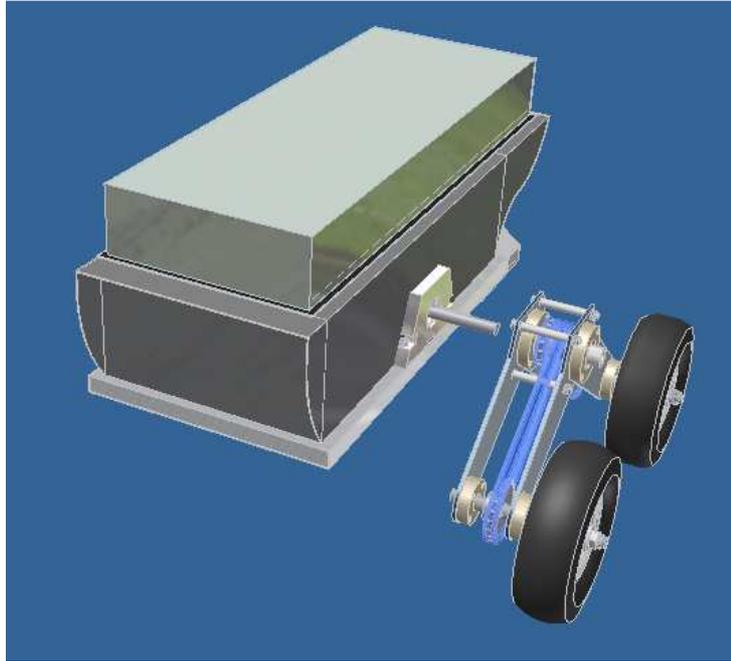


FIGURA 5.3-12: Acople de módulos de transmisión a módulo central

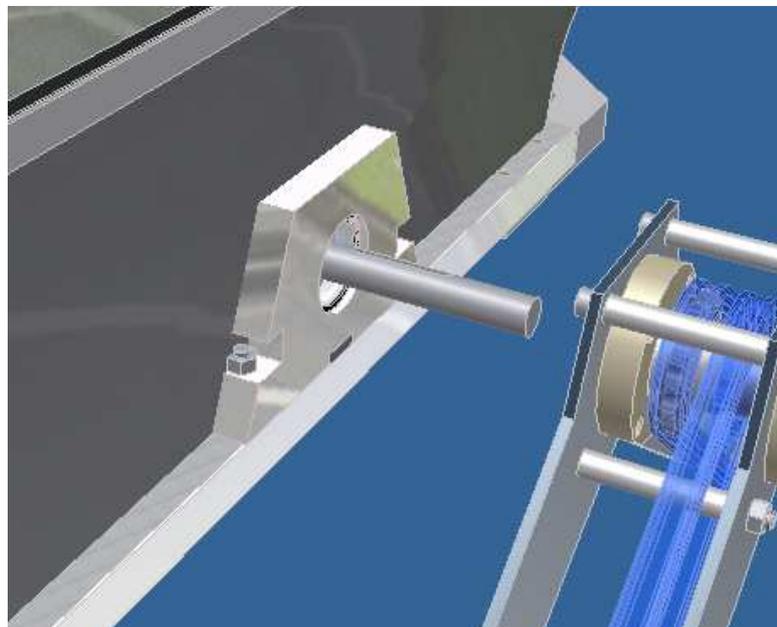


FIGURA 5.3-13: Acople de módulos de transmisión a módulo central - Detalle

Los módulos de transmisión se fijan al vehículo por medio de dos varillas de acero, roscadas en los extremos. Estas piezas contactan los soportes de ejes de las ruedas y se ajustan con pernos, manteniendo a los módulos de transmisión presionados contra el modulo principal. Una imagen de este sistema, utilizando las varillas mencionadas, se muestra en la figura 5.3-14:

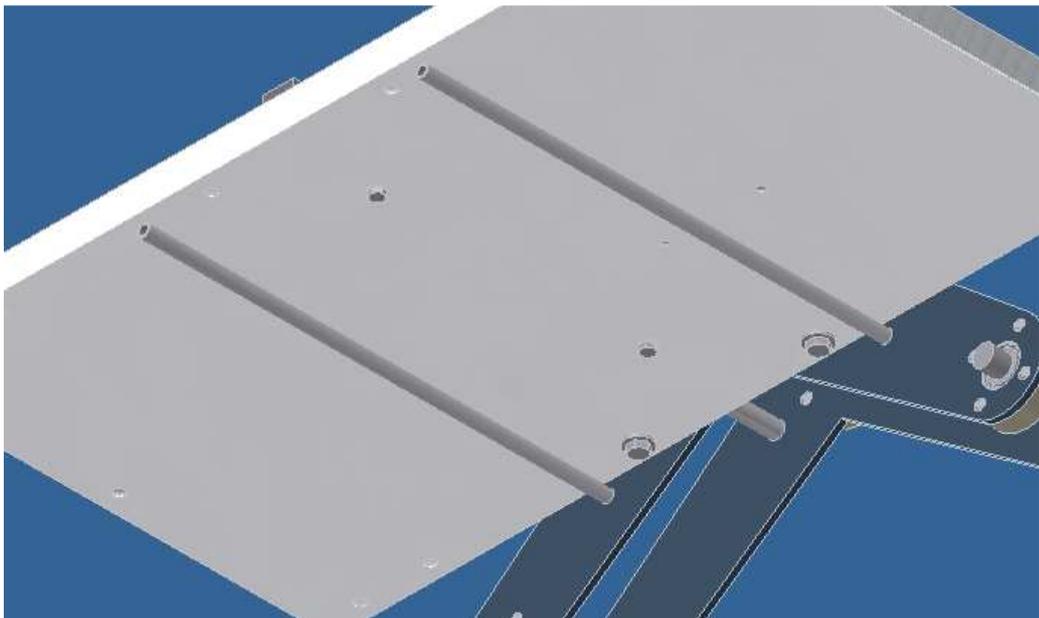


FIGURA 5.3-14: Varillas roscadas en módulos de transmisión

5.4 Listado de componentes y codificación

En esta sección se presenta un listado de todos los componentes necesarios para la construcción del prototipo de plataforma robótica. Estos componentes son el resultado del diseño realizado en las secciones 5.2 y 5.3, donde se describen los módulos que conforman la plataforma.

METODOLOGIA DE CODIFICACION

Dado que se cuenta con un gran número de componentes y piezas, surgió la necesidad de implementar un sistema de codificación para una correcta organización de dichos componentes. A cada componente o pieza se le asigna un código según el tipo de componente que identifique. La codificación de cada pieza está comprendida por dos hasta cuatro referencias, cada una separada de la anterior por un guión. Este sistema se explica a continuación:

-Las primeras dos letras del código, escritas en mayúscula, indican a que módulo pertenece el componente en cuestión.

Los módulos que conforman el vehículo se representan de la siguiente manera:

Módulo central: CE

Módulo de transmisión: TR

-Las letras siguientes, separadas por un guión de las anteriores y escritas en mayúsculas y minúsculas, indican el componente o a que componente principal está relacionada la pieza. Estas letras se derivan de las primeras consonantes del nombre

del componente en cuestión. Si el nombre del componente empieza por una vocal, ésta forma parte del código. Por ejemplo, se denomina a los ejes de las ruedas TR-EjRd.

A manera de ejemplo, los motores se consideran componentes principales, y tienen el código CE-Mtr, debido a que son parte del módulo central. Las baterías que alimentan a los motores, también consideradas componentes principales, se denominan CE-Btr-Mtr.

Los componentes secundarios se indican con dos puntos que separan la descripción del componente principal al que están asociados y la descripción del componente secundario. Los pernos utilizados para mantener los motores en posición, por ejemplo, son componentes secundarios relacionados a los motores. Su codificación es CE-Mtr:prn-08, para el caso de los pernos de 8mm de diámetro. Las dos primeras partes del código indican el módulo al que pertenece y el componente principal al que están asociados. El tercer término indica que es un perno (prn) y el cuarto indica una referencia adicional, de ser necesario, como el diámetro del perno, en este caso (08).

Esta codificación resultó bastante útil en el diseño, construcción y ensamblaje de la plataforma, ya que de esta forma cada componente tiene un nombre concreto y es fácil ser específicos al momento de referirse a éstos. La implementación de una codificación de este tipo permite también ser ordenados al momento de tener una gran cantidad de componentes. Por estos motivos se consideró adecuado mencionar el sistema y su nomenclatura aquí.

La codificación asignada a cada componente se indica también en los planos de cada parte. Dichos planos se adjuntan en el Anexo B.

LISTADO DE COMPONENTES

Basado en la metodología explicada, se listan a continuación los componentes del vehículo. La quinta columna de la tabla indica si el componente en cuestión debió ser manufacturado o si éste fue adquirido de un proveedor. Los componentes principales se muestran en la tabla 5.4-1:

<u>MODULO</u>	<u>COMPONENTE</u>	<u>CODIGO</u>	<u>NUMERO DE COMPONENTES</u>	<u>ADQUIRIR / MANUFACTURAR</u>
CE	chasis	CE-Chs	1	Manufacturar
CE	motor	CE-Mtr	2	Adquirir
CE	bloque de aluminio para sujecion motores	CE-Blq	2	Manufacturar
CE	platina para sujecion de motores	CE-Plt	2	Manufacturar
CE	sistema de tensores de motores	CE-Tns	1	Manufacturar
CE	batería de motores	CE-Btr-Mtr	2	adquirir
CE	perfil para sujeción de baterías	CE-Prf	4	Adquirir
CE	cable AWG 8 para baterías motores	CE-Cbl-Mtr	1.5 metros	Adquirir
CE	breaker de 50 Amperios	CE-Brk	1	Adquirir
CE	controlador de motores	CE-Cnt	1	Adquirir
CE	sistema de sujeción controlador	CE-Sjc	1	Manufacturar
CE	polea	CE-PI	4	Adquirir
CE	banda dentadas	CE-Bnd	2	Adquirir
CE	eje interior	CH-EjInt	2	Adquirir
CE	soporte de eje interior	CE-Spr-EjInt	2	Manufacturar
CE	rodamiento d20mm	TR-Rdm-20	2	Adquirir
CE	tapa del chasis	CE-Tp	1	Manufacturar
CE	cámara de video inalámbrica	CE-Cmr	1	Adquirir
CE	soporte de cámara	CE-Spr-Cmr	1	Manufacturar
CE	brújula electrónica	CE-Brj	1	Adquirir
CE	adaptador I2C-USB para brújula	CE-Adp-Brj	1	Adquirir
CE	cable USB	CE-CblUSB	1	Adquirir

TABLA 5.4-1: Listado de componentes principales – PARTE 1

MODULO	COMPONENTE	CODIGO	NUMERO DE COMPONENTES	ADQUIRIR / MANUFACTURAR
CE	base de componentes electrónicos	CE-Bs	1	Manufacturar
CE	tapa de base de componentes electrónicos	CE-Bs-Tp	1	Manufacturar
CE	GPS	CE-GPS	1	Adquirir
CE	receptor bluetooth para GPS	CE-Rcp-GPS	1	Adquirir
CE	receptor del sistema de RC	CE-Rcp-RC	1	Adquirir
CE	bateria receptor RC	CE-Btr-Rcp-Rc	1	Adquirir
CE	control remoto	CE-Cnt-Rc	1	Adquirir
CE	transmisor de cámara inalámbrica	CE-Trn-Cmr	1	Adquirir
CE	receptor camara inalámbrica	CE-Rcp-Cmr	1	Adquirir
CE	bateria transmisor de cámara inalámbrica	CE-Btr-Trn-Cmr	1	Adquirir
CE	switch RC / SERIAL	CE-Swt	1	
CE	computadora portátil	CE-Cmp	1	Adquirir
CE	hub USB	CE-HbUSB	1	Adquirir
CE	adaptador RC-SERIAL	CE-Adp-RC/SRL	1	Adquirir
CE	adaptador SERIAL-USB	CE-Adp-SRL/USB	1	Adquirir
CE	cable UTP	CE-CblUTP	3	Manufacturar
CE	base de parrilla	CE-Bs-Prr	1	Manufacturar
CE	Estructura de tubos de parrilla	CE-Estr-Prr	1	Manufacturar
CE	sensor de ultrasonido	CE-Sns	1	Adquirir
TR	eje exterior	TR-EjExt	2	Manufacturar
TR	catalina 15 dientes	TR-Ctl-15	4	Adquirir
TR	buje sujetador de rodamientos d30mm	TR-Bj-Rdm-30	2	Manufacturar
TR	rodamiento d30mm	TR-Rdm-30	2	Adquirir
TR	soporte de ejes de ruedas	TR-Spr-EjRd	4	Manufacturar
TR	separador de acero	TR-SprAc	8	Manufacturar
TR	Cadena	TR-Cdn	4	Adquirir
TR	catalina 20 dientes	TR-Ctl-20	4	Adquirir
TR	eje de ruedas	TR-EjRd	4	Manufacturar
TR	buje sujetador de rodamientos d17mm	TR-Bj-Rdm-17	4	Manufacturar
TR	rodamiento d17mm	TR-Rdm17	4	Adquirir
TR	separador de ruedas	TR-SprRd	4	Manufacturar
TR	rueda	TR- Rd	4	Adquirir
TR	separador de módulos	TR-Spr-Mdl	2	Manufacturar

TABLA 5.4-1: Listado de componentes principales – PARTE 2

En la tabla 5.4-1 se listan los componentes principales de la plataforma. A continuación se listan los denominados componentes secundarios. La mayoría de éstos están relacionados a la sujeción de componentes principales:

MODULO	COMPONENTE	CODIGO	MEDIDA / ESPECIFICACION	NUMERO DE COMPONENTES
	PERNOS	-		
CE	perno motor (horizontales)	CE-Mtr:prn-08	m8	4
CE	perno motor (verticales)	CE-Mtr:prn-08	m8	4
CE	perno (platinas de sujeción motor)	CE-Mtr:prn-04	m6	4
CE	perno controlador	CE-Cntr:prn-06	m6	2
CE	perno poleas	CE-Pl:prn-04	m4	4
CE	perno soporte de eje interior	CE-Spr-EjInt:prn-08	m8	4
CE	perno tapa bastidor	CE-Tp:prn-08	m8	4
CE	perno soporte cámara	CE-Spr-Cmr:prn-03	m3	4
CE	perno brújula	CE-Brj:prn-03	m3	2
CE	perno de base de componentes electrónicos	CE-Bs:prn-04	m4	4
CE	perno switch RC - SERIAL	CE-Sw:prn-03	m3	4
CE	perno parrilla	CE-Prr:prn-08	m8	4
TR	perno hexagonal para separadores de acero	TR-Spr:prn-06	m6	4
TR	perno para buje sujetador de rodamientos d20mm	TR-Bj-Rdm-20:prn-03	m3	16
TR	perno para buje sujetador de rodamientos d35mm	TR-Bj-Rdm35:prn-03	m3	8
	ARANDELAS	-		
CE	arandela (pernos verticales motor)	CE-Mtr:arn-08	d8mm	4
TR	arandela (ejes de las ruedas)	TR-EjRd:arn-16	d16mm	8
	REMACHES			
VARIOS	Remaches	-	m3	-

TABLA 5.4-2: Listado de componentes secundarios – PARTE 1

MODULO	COMPONENTE	CODIGO	MEDIDA / ESPECIFICACION	NUMERO DE COMPONENTES
	OTROS	-		
CE	platina de sujeción del motor	CE-Mtr:plt	-	2
CE	amarra (baterías)	CE-Mtr-Btr:amr	-	8
CE	amarra (breaker)	CE-Brk:amr	-	2
CE	velcro (GPS)	CE:vlcr	-	-
CE	velcro (receptor RC)	CE:vlcr	-	-
CE	velcro (batería receptor RC)	CE:vlcr	-	-
CE	velcro (transmisor de cámara inalámbrica)	CE:vlcr	-	-
CE	velcro (batería de transmisor de cámara inalámbrica)	CE:vlcr	-	-
CE	velcro (hub USB)	CE:vlcr	-	-
CE	sistema de sujeción para computadora portátil	CE-Cmp:sj	-	-
TR	prisioneros (ejes de las ruedas - catalinas)	TR-EjRd:prsn	m3	4
TR	prisioneros (ejes exteriores - catalinas)	TR-EjExt:prsn	m6	4
TR	tuercas de castillo	TR-EjRd:trc	-	4
TR	pasadores de tuercas de castillo	TR-EjRd:psd	-	4

TABLA 5.4-2: Listado de componentes secundarios – PARTE 2

5.5 Análisis de Carga y Estrés

Se realizó un estudio de carga y estrés en los siguientes componentes de la estructura mecánica:

- Ejes
- Bastidor
- Banda
- Cadena
- Catalina
- Rodamientos

Para este análisis fue necesario realizar un estudio de las cargas estáticas y dinámicas presentes en los componentes descritos arriba.

Debido a las irregularidades del terreno en las que debe desplazarse el móvil, es necesario realizar un cálculo de las cargas dinámicas, que en este caso son de impacto.

5.5.1 Carga de Impacto

La carga dinámica más importante a tomar en cuenta es la causada por una caída vertical del móvil. En el caso de que la caída sea de 10 cm, y la velocidad inicial es 0, la velocidad justo antes del choque será de:

$$v = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.1m)} = 1.4 \text{ m/s}$$

Si se iguala la energía cinemática en este punto, y la energía potencial en el punto de máxima deformación de las ruedas, se obtiene:

$$\frac{mv^2}{2} + mgx = \frac{kx^2}{2}$$

Si aproximamos el valor de la constante de cada rueda con 6 kgf/mm, tenemos que el sistema de ruedas en total tiene una constante de (6 kgf/mm)*4, es decir, 24 kgf/mm. De este modo, si realizamos el análisis para todo el robot, se tiene:

$$\frac{80kg\left(\frac{1.4m}{s}\right)^2}{2} + 80kg(9.81m/s^2)x = \frac{(235440)x^2}{2}$$

De donde, la deformación máxima x es 0.0293 m, es decir 29.3 mm. Por lo tanto, la fuerza máxima sobre cada rueda es:

$$F = 6 \frac{kgf}{mm} (29.3 \text{ mm}) = 175.8 \text{ kgf} = 1724.6 \text{ N}$$

5.5.2 Análisis de desempeño

El principal requerimiento de desempeño es tener un factor de seguridad en cada componente de por lo menos 2.

EJE INTERIOR

Este componente es el encargado de transmitir el torque desde la polea sincrónica hacia eje exterior. El torque que debe transmitir tiene un máximo de 45

Nm. Se escogió este valor porque es el máximo que puede producir cada motor sin que se active el breaker. El eje interior, junto con los pupos del soporte del eje interior, soportan una carga radial causada por el peso del bastidor y las cargas dinámicas. Para la simulación en Autodesk Inventor Professional, se asumió que el eje interior soporta la totalidad de ésta carga axial. Esta carga radial es calculada a continuación:

$$F = \frac{\text{Peso bastidor}}{2} + \text{carga dinámica recibida por 2 ruedas}$$

$$F = \frac{49kg}{2} \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) + 2 * (1724.6) \approx 3690 N$$

En la figura 5.5.2-1 se muestra la distribución de la carga sobre el eje principal:

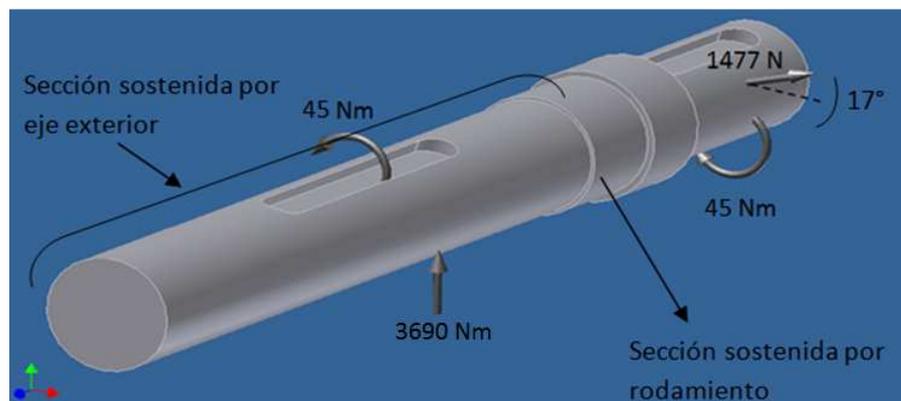


Figura 5.5.2-1. Distribución de carga sobre el eje interior

En base a la carga mostrada, la simulación entregó los resultados de las figuras 5.5.2-2, 5.5.2-3 y 5.5.2-4.

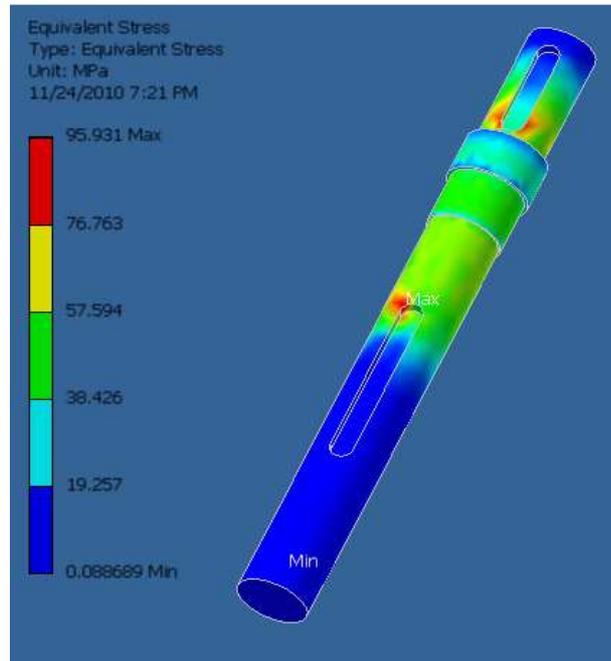


Figura 5.5.2-2. Distribución del estrés equivalente en el eje interior

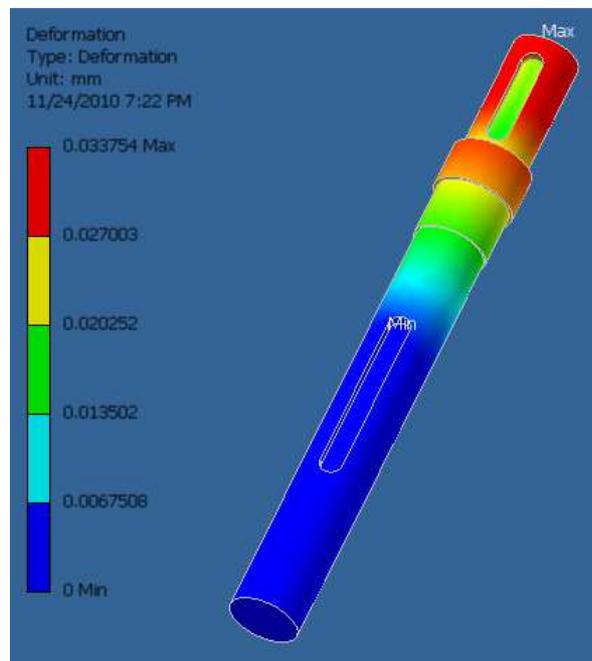


Figura 5.5.2-3. Distribución de las deformaciones en el eje interior

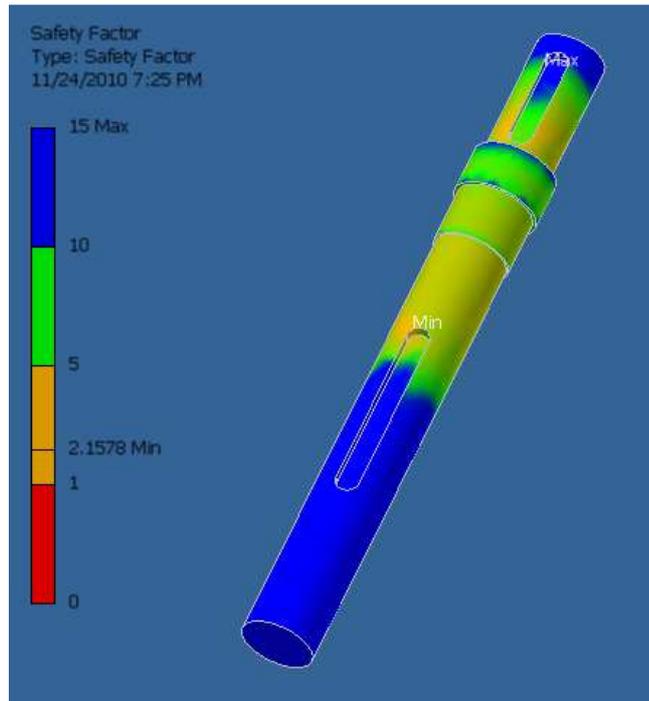


Figura 5.5.2-4. Distribución del factor de seguridad en el eje principal

Como se puede ver, el mínimo factor de seguridad obtenido es de 2.16; el cual es mayor al factor de seguridad mínimo requerido de 2.

EJE EXTERIOR

La principal carga de este componente es el torque que debe transmitir desde el eje interior hacia las dos catalinas; a través de una chaveta interior (para el eje interior) y una chaveta exterior (para las dos catalinas). El torque que debe transmitir tiene un máximo de 45 Nm, ya que es el máximo valor que el motor puede ejercer sin que se active el breaker.

El eje principal debe soportar la carga radial causada por la tensión de las cadenas apoyadas en su superficie exterior. La tensión que ejerce cada cadena tiene un valor de 656.3 N con una inclinación de 39 grados por debajo de la horizontal. En base a este valor, se puede calcular la carga radial total causada por las dos catalinas.

También debe soportar la carga ejercida por el eje interior. Esta carga es igual a la mitad del peso del bastidor, más la fuerza dinámica recibida por 2 ruedas, es decir 3694.5 N.

En la figura 5.5.2-5 se muestra las cargas sobre el eje exterior.

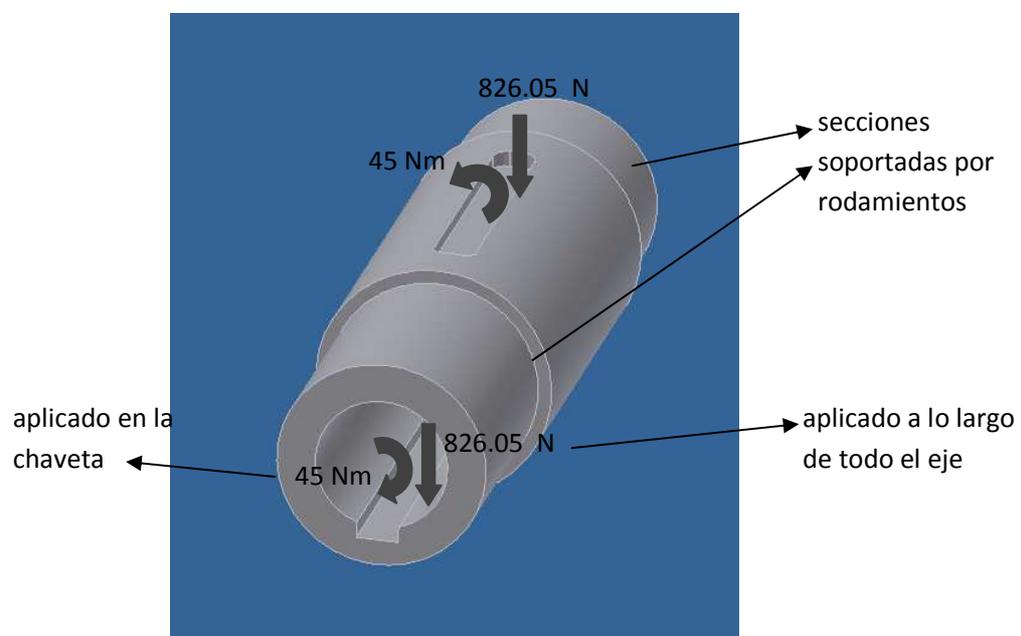


Figura 5.5.2-5. Distribución de carga sobre el eje exterior

En base a la carga mostrada, la simulación entregó los resultados de las figuras 5.5.2-6, 5.5.2-7 y 5.5.2-8.

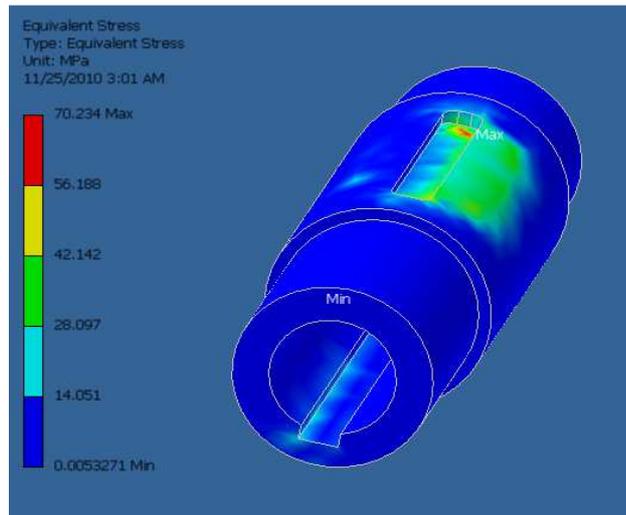


Figura 5.5.2-6. Distribución del estrés equivalente en el eje exterior

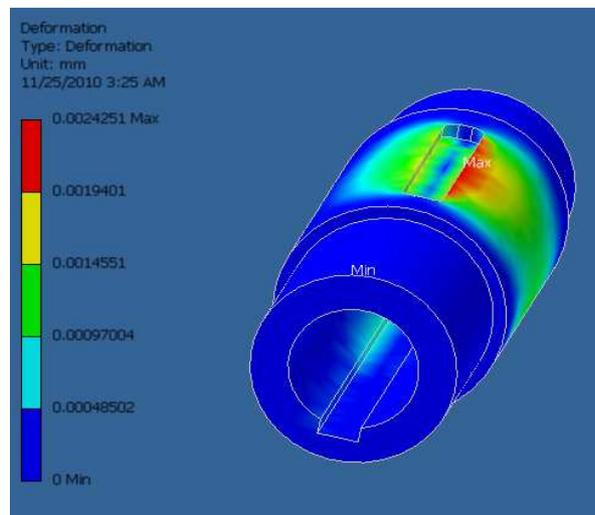


Figura 5.5.2-7. Distribución de la deformación en el eje exterior

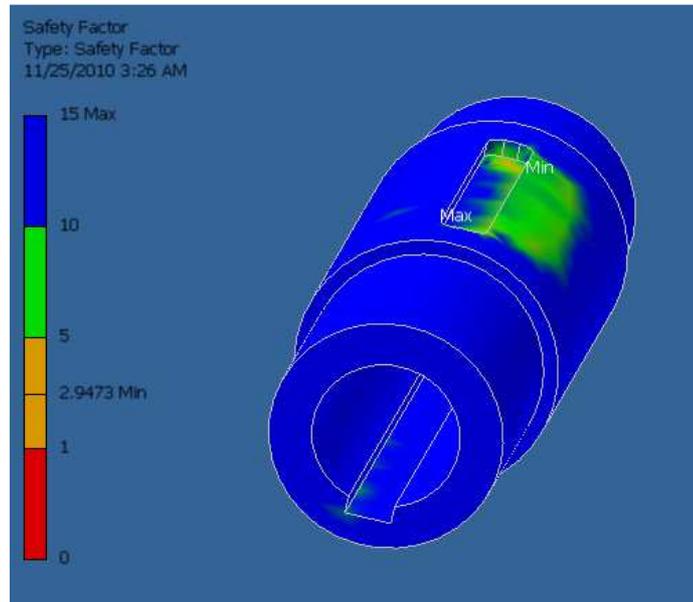


Figura 5.5.2-8. Distribución del factor de seguridad en el eje exterior

Se observa que el mínimo factor de seguridad obtenido es de 2.94; el cual es mayor al factor de seguridad mínimo requerido de 2.

EJE DE RUEDA

Este componente debe transmitir el torque ejercido por la catalina hacia la rueda. Por otro lado, debe soportar las cargas radiales causadas por las ruedas. A continuación se muestra el cálculo del máximo torque que puede ejercer la catalina sobre el eje:

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{max-motor}}{2 * \text{factor reducción entre catalinas}} = \frac{45Nm}{2 * 0.75} = 30Nm$$

En la figura 5.5.2-9 se muestra la distribución de la carga sobre el eje de rueda.

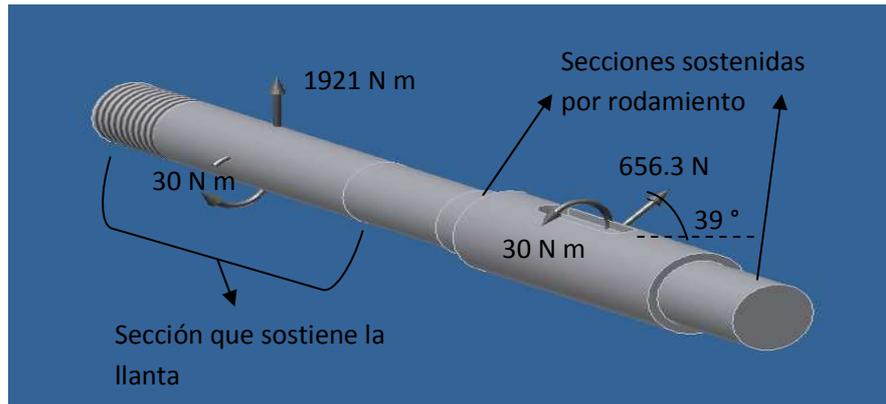


Figura 5.5.2-9. Distribución de carga en el eje de la rueda

En base a la carga mostrada, la simulación entregó los resultados mostrados en las figuras 5.5.2-10, 5.5.2-11 y 5.5.2-12

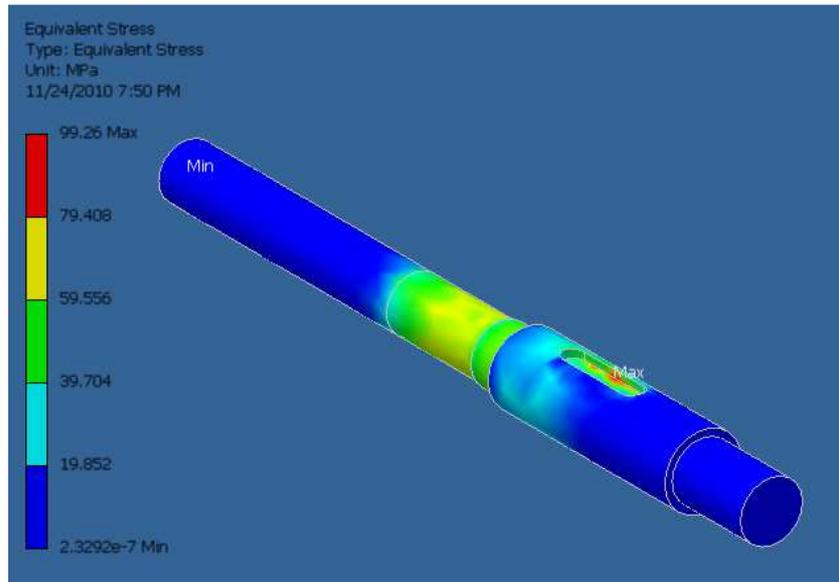


Figura 5.5.2-10. Distribución del estrés equivalente en el eje de rueda

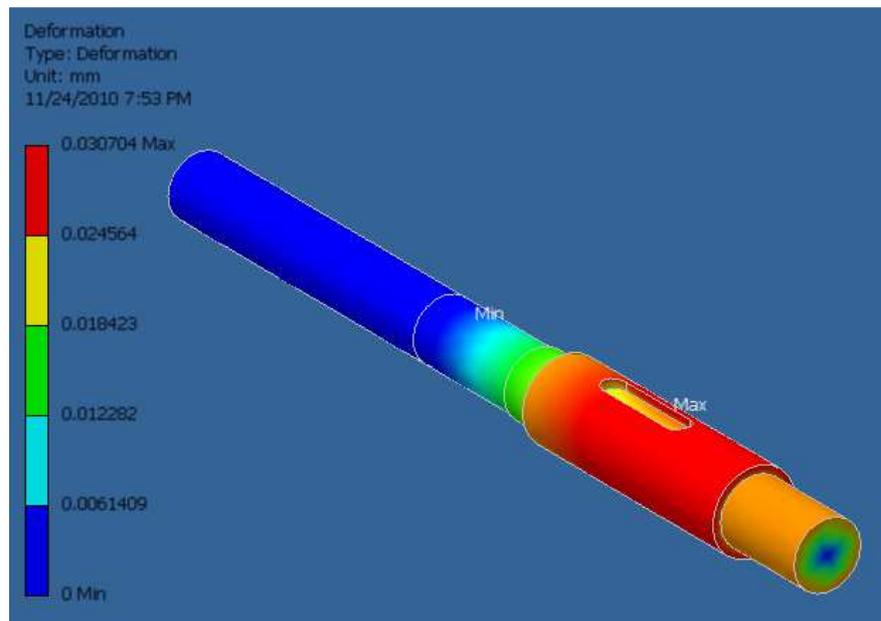


Figura 5.5.2-11. Distribución de la deformación en el eje de rueda

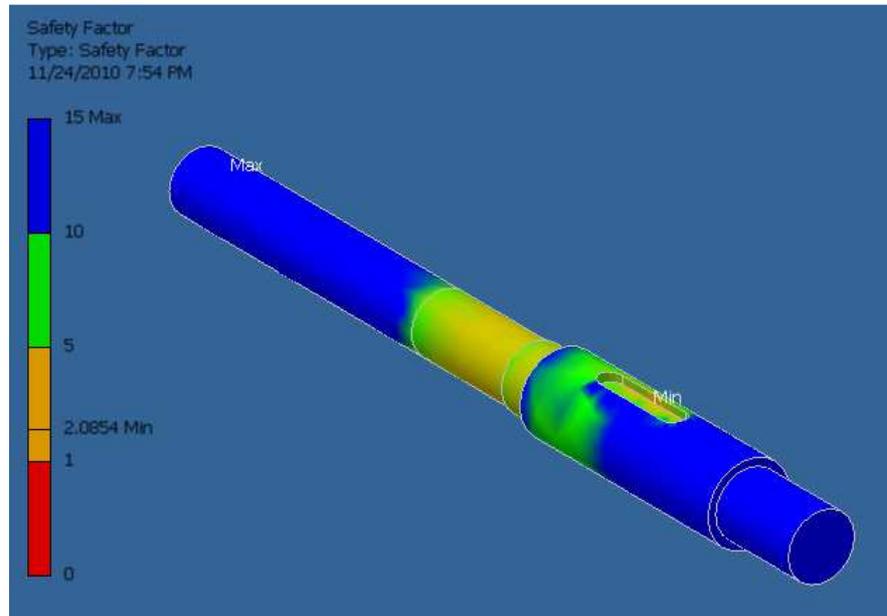


Figura 5.5.2-12. Distribución del factor de seguridad en el eje de rueda

Como se puede ver, el mínimo factor de seguridad obtenido es de 2.08; el cual es mayor al factor de seguridad mínimo requerido de 2.

BANDAS SINCRÓNICAS

Por medio de la función Generador de Componente de bandas sincrónicas de Autodesk Inventor Professional, se realizó un análisis que revisó el desempeño del diseño escogido, en base a las características de las bandas, y la carga impuesta.

En base a información del proveedor, PowerGrip, se conoce los siguientes características de desempeño de la banda 165L075:

Característica	Valor
Máxima velocidad de la banda	50 mps
Máxima tensión de ruptura por mm de ancho de banda	175 N

Tabla 5.5.2-1. Características de desempeño de la banda sincrónica 165L075

EL ancho de la banda utilizada es de 19 mm, por tanto, la máxima tensión de ruptura de la banda 165L075 es:

$$F_{max} = 175 \frac{N}{mm} (19 mm) = 3325 N$$

Para el análisis, se utilizaron los siguientes parámetros de la tabla 5.5-2:

Parámetro	Valor
Torque	45 N m
Velocidad	138 rpm
Factor de servicio	1.2
Factor de tensión de instalación	1.2
Eficiencia	0.96

Tabla 5.5.2-2. Parámetros utilizados en simulación bajo carga de la banda sincrónica 165L075

Como se observa en la tabla 5.5-2, se utilizó el torque máximo que el motor puede ejercer sin que salte el breaker. Por otro lado, se utilizó una velocidad de 138 rpm, que es la correspondiente al torque indicado. Se eligió un factor de servicio de 1.2 debido a la posible presencia de polvo; y un factor de tensión de instalación de 1.2 correspondiente a la elongación al término del ajuste de instalación. También se eligió una eficiencia de 0.96.

En base a las características de la banda, y los parámetros de simulación, se obtuvo un análisis exitoso, mostrado en la figura 5.5.2-13.

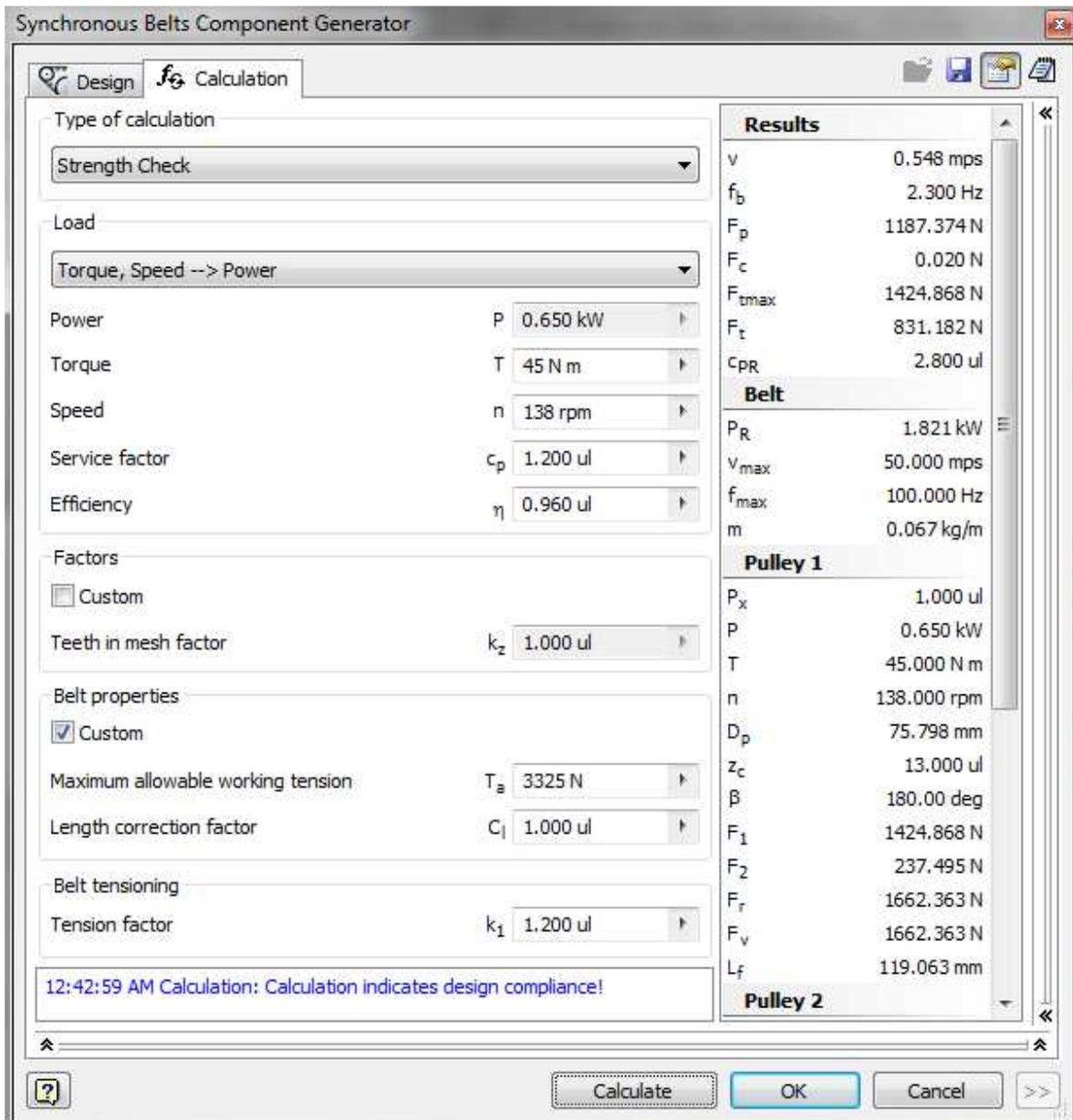


Figura 5.5.2-13. Cuadro de análisis de banda sincrónica (Autodesk Inventor Professional)

En conclusión, las siguientes características de la banda en cuestión satisfacen el desempeño requerido:

Característica	Requerimiento	Valor real
Máxima velocidad de la banda	0.865 mps	50 mps
Máxima tensión	1425 N	3325 N

Tabla 5.5.2-3. Comparación de valores de desempeño requerido con parámetros reales disponibles de la banda sincrónica 165L075

CADENAS

Al igual que el análisis realizado para las bandas sincrónicas, se examinó la carga sobre las cadenas y el desempeño de las mismas, a través de la función de Generador de Componentes de cadenas de Autodesk Inventor Professional.

Se utilizó cadenas Ansi 40, las cuales cuentan con las siguientes características de desempeño:

Característica	Valor
Máxima resistencia a la tracción	13900 N
Máxima presión cortante en los pasadores de la cadena	26.409 MPa
Máxima elongación recomendada	0.03

Tabla 5.5.2-4. Características de desempeño de cadena Ansi-40

Para el análisis de estrés y fatiga, se utilizaron los parámetros de la tabla 5.5-5. El torque máximo que debe soportar la cadena es 22.5 N, ya que el torque máximo de 45 N que puede ejercer el motor se es repartido entre las dos catalinas ubicadas en el eje exterior. Por otro lado, la velocidad angular es la correspondiente a la del eje del motor cuando ejerce 45 N, es decir, 138 rpm. También se utilizó un factor de impacto de 1.5 para tomar en cuenta los ocasionales golpes suaves sobre la cadena; y un factor de servicio de 1.59 para tomar en cuenta la presencia de tierra en el ambiente de trabajo. Se eligió una eficiencia de 0.98.

Parámetro	Valor
Torque	22.5 N
Velocidad	138 rpm
Factor de impacto	1.5 (golpes suaves ocasionales)
Factor de servicio	1.59 (ambiente de trabajo con tierra)
Eficiencia	0.98

Tabla 5.5.2-5. Parámetros utilizados en simulación bajo carga de cadena Ansi-

En base a las características de la cadena escogida, y los parámetros de simulación, se obtuvo un análisis exitoso, como se muestra a continuación:

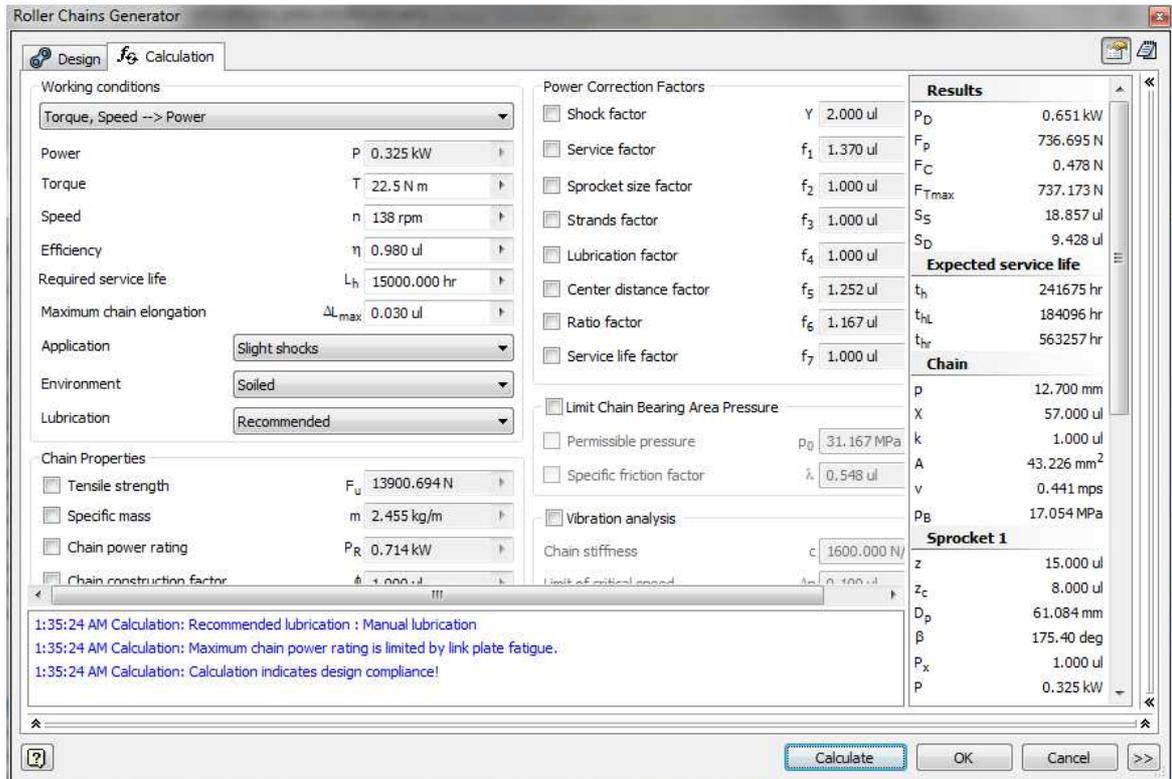


Figura 5.5.2-14. Cuadro de análisis para cadena (Autodesk Inventor Professional)

En conclusión, las siguientes características de la transmisión cadena/catalinas satisfacen el desempeño requerido, según la tabla 5.5-6:

Característica	Valor requerido	Máximo Valor disponible
Potencia del sistema cadena/catalinas	0.65 kW	0.71 kW
Máxima tensión en la cadena	737.2 N	13900.7 N

Tabla 5.5.2-6. Comparación de valores de desempeño requerido con valores de desempeño real

También, se obtuvieron resultados con respecto a las horas de servicio, según el cuadro de análisis de la figura 5.5-6, las horas de servicio obtenidas son:

Componente	Horas de servicio
Cadena en función a la máxima elongación recomendada	241675
Placas laterales de la cadena	184096
Rodillo y pasador	563257

Tabla 5.5.2-7. Horas de servicio de cadena y componentes

Como se observa en la tabla 5.5-7, las horas de servicio obtenidas son lo suficientemente grandes como para concluir que la cadena no es un limitante en las horas de servicio del robot.

RODAMIENTOS

En todos los rodamientos utilizados, la carga es radial. A continuación se presenta el cálculo de las cargas máximas sobre cada rodamiento.

RODAMIENTOS d17mm

Los rodamientos d17mm, sostienen al eje de la rueda, por medio de las fuerzas de reacción R1 y R2.

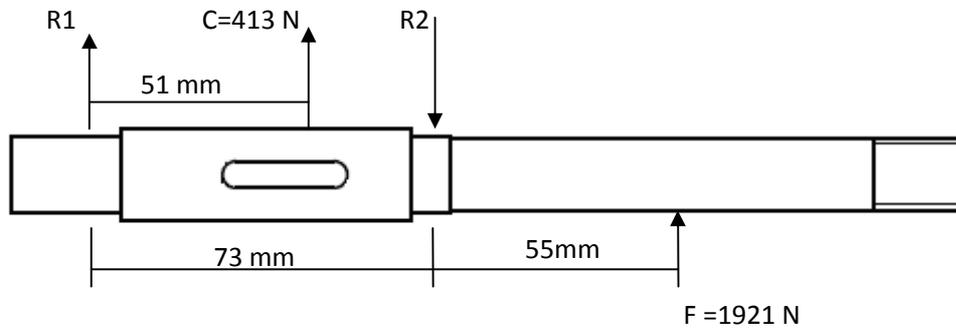


Figura 5.5.2-15. Fuerzas radiales sobre eje de rueda

La mayor reacción de rodamiento es R2, y está dada por:

Si no hay fuerza dinámica, se tiene:

RODAMIENTOS d30mm

En el caso del eje externo, las cadenas, junto con el eje interno, ejercen una fuerza F sobre el mismo. Esta fuerza está dada por:



Esta fuerza F , causa dos reacciones $R1$ y $R2$ desde los rodamientos d30mm, como muestra la figura 5.5.2-16.

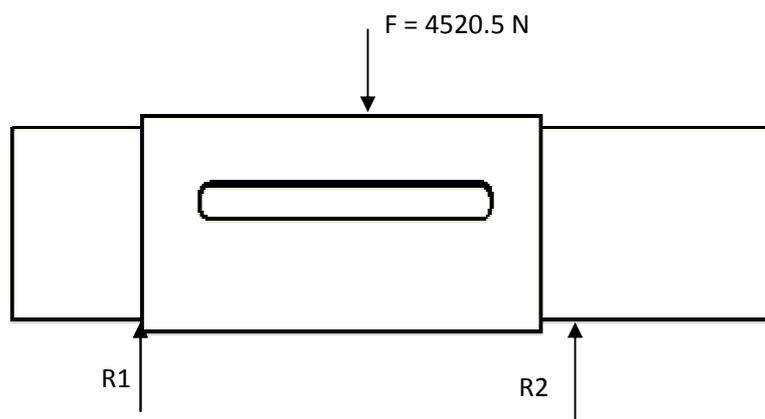


Figura 5.5.2-16. Fuerzas radiales sobre el eje exterior

Si se aproxima $R_1=R_2$, se tiene:

$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2} = 2260.3 \text{ N}$$

RODAMIENTOS d20mm

Finalmente, si se asume que el rodamiento del soporte del eje interior soporta la totalidad de la reacción del suelo sobre las dos ruedas (lo cual es una aproximación debido a la acción de los pupos), se tiene que la carga radial máxima es:

$$R = \frac{\textit{peso}}{2} + 2 * \textit{carga dinámica en cada rueda}$$

$$R = 80kg * \left(\frac{9.81m}{s^2}\right) (0.5) + 2 * 1724.6 = 3842 \text{ N}$$

A continuación se muestra una tabla que resume las cargas máximas sobre los 3 tipos de rodamiento:

Rodamiento	Carga radial máxima
------------	---------------------

d17mm	3879 N
d20 mm	3842 N
d30 mm	2260.3 N

Tabla 5.5.2-8. Tabla de carga axial en los rodamientos

A continuación, en la tabla 5.5.2-9, se muestra las principales características de desempeño de los 3 tipos de rodamientos usados:

Característica	Rodamiento de d17mm	Rodamiento de d20mm	Rodamiento de d30mm
Basic Static Load Rating	3250 N	7800 N	8300 N
Basic Dynamic Load Rating	6370 N	16800 N	13800 N

Tabla 5.5.2-9. Características de desempeño de los rodamientos

Se realizó la simulación de desempeño de todos los rodamientos bajo la acción de su respectiva carga radial máxima.

En las figuras 5.5.2-17, 5.5.2-18 y 5.5.2-19 se muestra los cuadros de análisis de la función Generador de Componentes de Autodesk Inventor Professional con los resultados de las simulaciones:

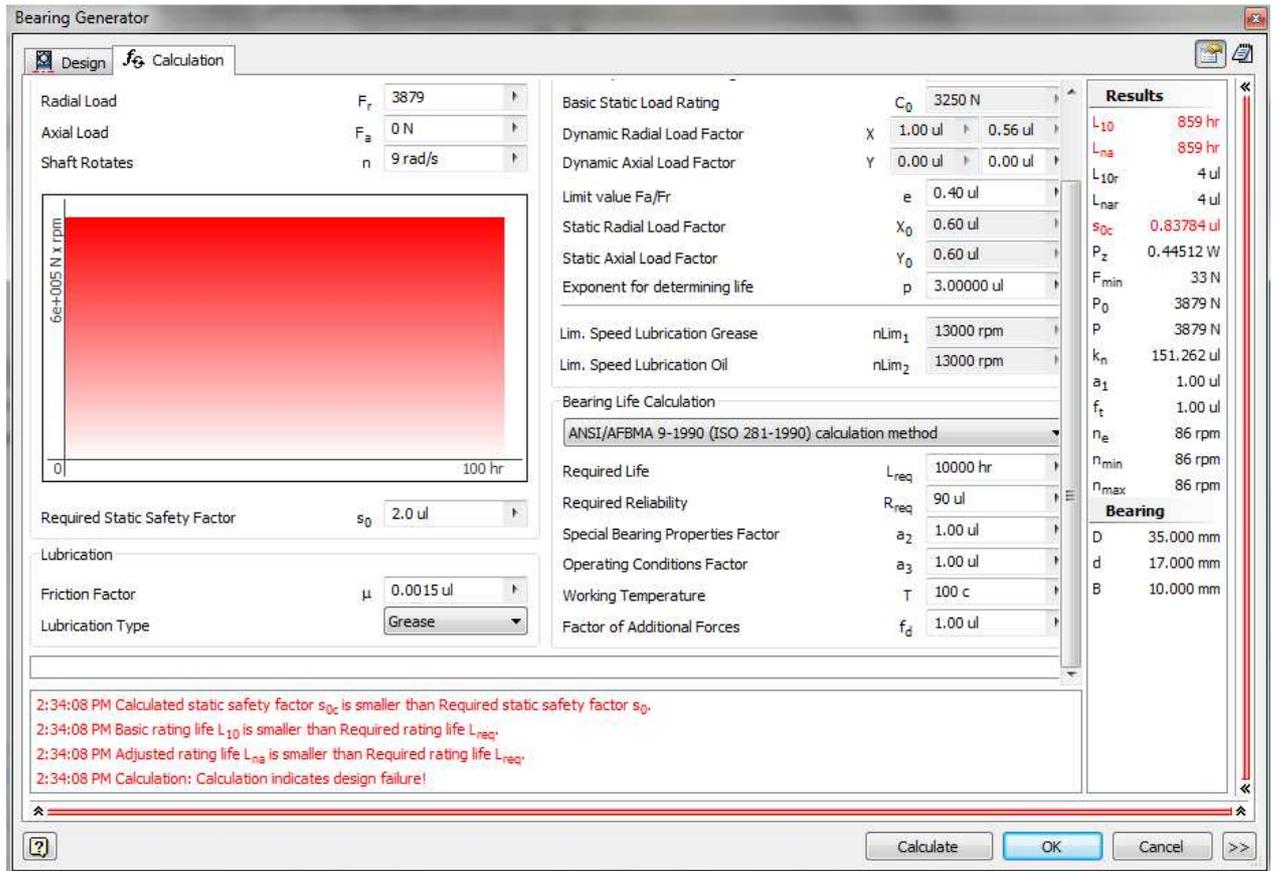


Figura 5.5.2-17. Cuadro de análisis para rodamiento d17 mm (Autodesk Inventor Professional)

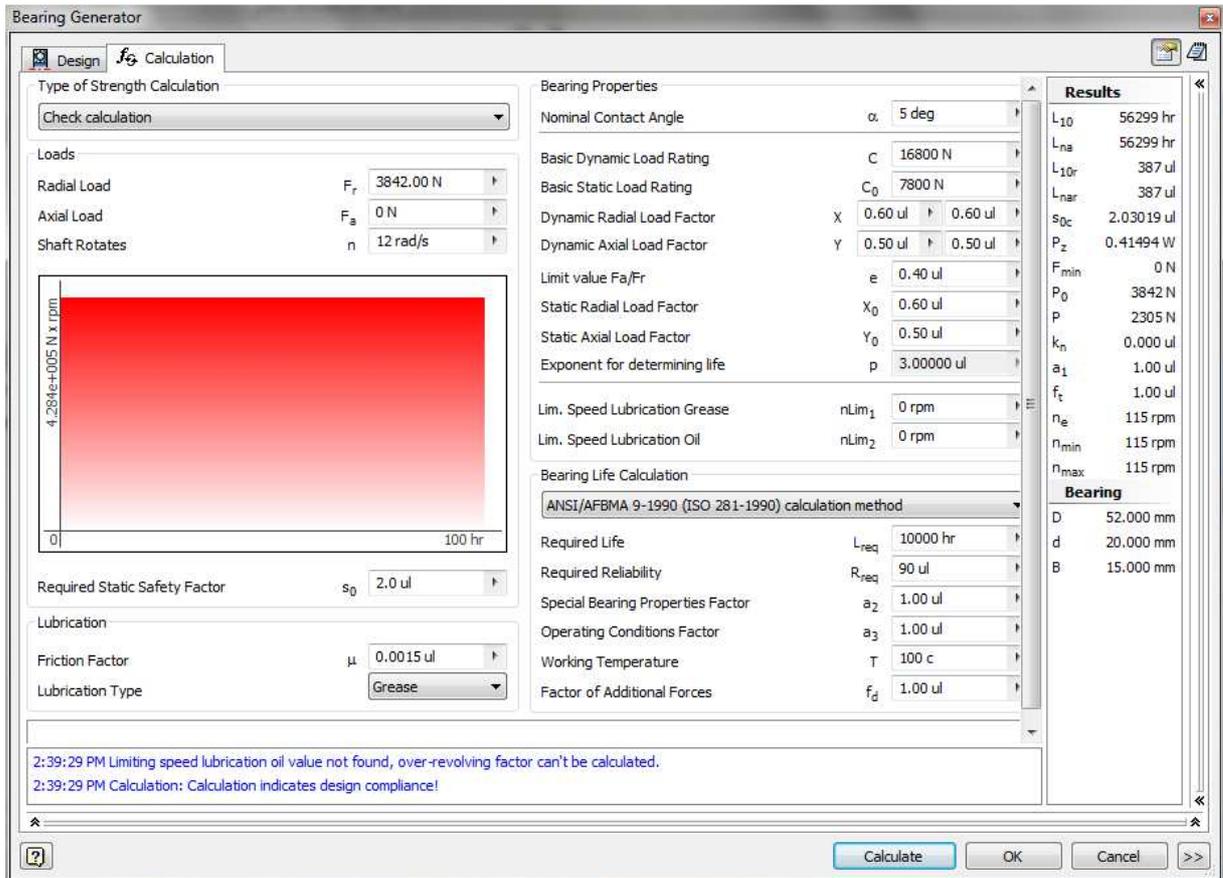


Figura 5.5.2-18. Cuadro de análisis para rodamiento d20 mm (Autodesk Inventor Professional)

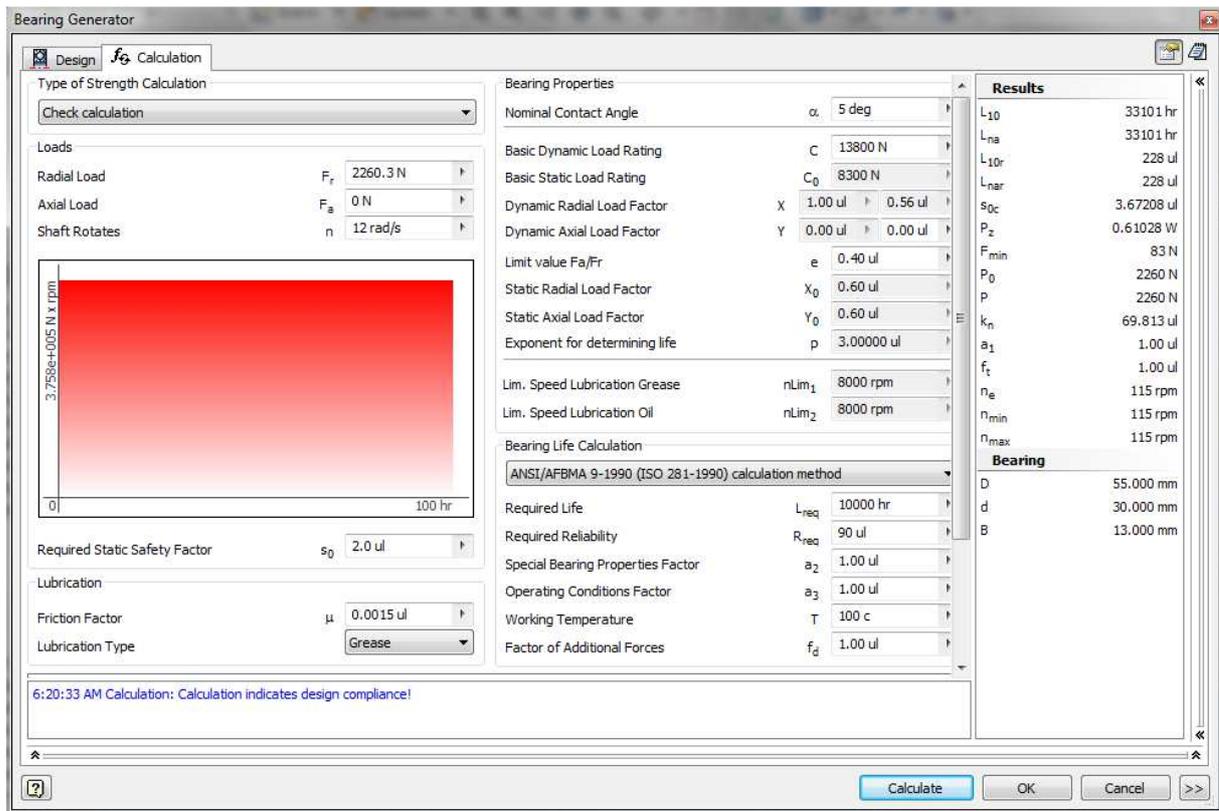


Figura 5.5.2-19. Cuadro de análisis para rodamiento d30 mm (Autodesk Inventor Professional)

Los rodamientos de 30mm y 20mm de diámetro interior fueron sometidos a un análisis de estrés asumiendo que la carga de impacto se aplica durante todo el tiempo de operación, lo que representa una carga mucho mayor a la real. Estos rodamientos cumplieron los requisitos de diseño con un factor de seguridad de 2.

El rodamiento de 17 mm de diámetro interior no paso el análisis de elementos finitos con esta carga, por lo que se sometió a este componente a un análisis con

una carga equivalente, tomando en cuenta la carga en operación normal y la carga de impacto.

El análisis con carga equivalente se basa en los procedimientos descritos en “Mechanical Engineering Design” (Shigley), donde una carga equivalente se calcula a partir de las cargas individuales en relación al tiempo durante el cual cada carga actúa.

La carga de impacto se basa en la fuerza a la que el vehículo es sometido al caer de una altura de 0.1 metros. Se asume un tiempo de impacto de 0.1 segundos. Para obtener la relación de los tiempos durante los que cada carga actúa, se asume una carga de impacto de esta duración cada minuto de operación de la plataforma.

El procedimiento por el cual se calcula la carga equivalente se basa en la tabla 5.5.2-10.

	(1) Fracción de tiempo	(2) Velocidad (rev/min)	(3) Producto de columnas 1 y 2	(4) Fracción de giros: (3)/Σ(3)	(5) carga radial (N)
carga en funcionamiento normal	0.998	85.900	85.757	0.998	688.000
carga de impacto	0.002	85.900	0.143	0.002	3879.000

Tabla 5.5.2-10. Cálculo de carga equivalente

Las columnas 1 y 2 se multiplican para obtener la 3. Cada entrada de la columna 3 se divide para la sumatoria de los elementos de la misma columna para obtener la columna 4. La columna 5 se basa en las cargas calculadas anteriormente.

La carga equivalente se calcula de la siguiente forma:

$$F_{eq} = \left[\sum f_i F_{ei}^a \right]^{\frac{1}{a}}$$

Donde f_i está dada por la cuarta columna de la tabla 5.5.2-10. El factor de aplicación “a” se toma como 3. Esto resulta en la siguiente ecuación:

$$F_{eq} = [0.998 * 688^3 + 0.002 * 3879^3]^{1/3} = 761N$$

Si se utiliza este valor de carga radial para la simulación, se obtiene un resultado exitoso, como se muestra en la figura 5.5.2-20.

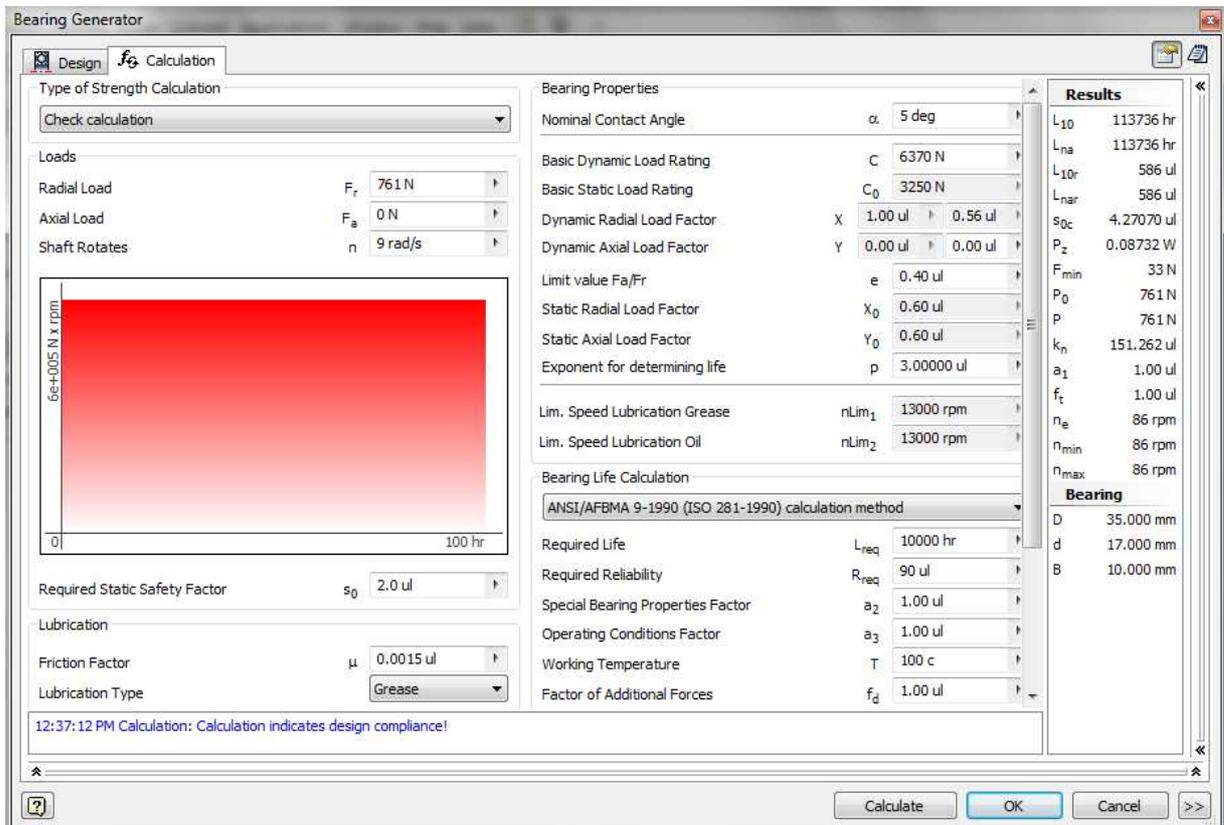


Figura 5.5.2-20. Cuadro de análisis para rodamiento d17 mm (Autodesk Inventor Professional)

BASTIDOR

El bastidor debe ser capaz de soportar la carga dinámica transmitida por las 4 ruedas (1724.6 N cada rueda), y el peso de los componentes que sostiene (38 kgf). En consecuencia, la carga total aplicada sobre el bastidor es de 7272.8 N. En la figura 5.5.2-21, se muestra la carga aplicada sobre el bastidor. Se limitó la deformación a los lados del bastidor.

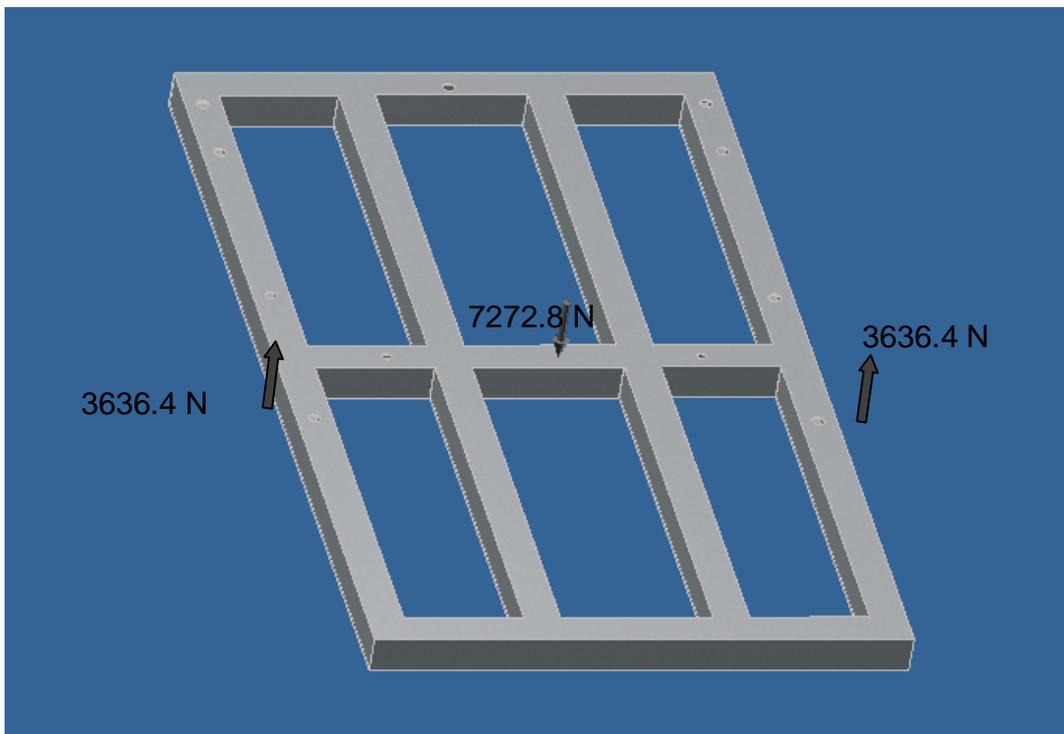


Figura 5.5.2-21. Carga sobre el bastidor

A continuación se muestra los resultados del análisis de carga obtenido con Autodesk Inventor Professional.

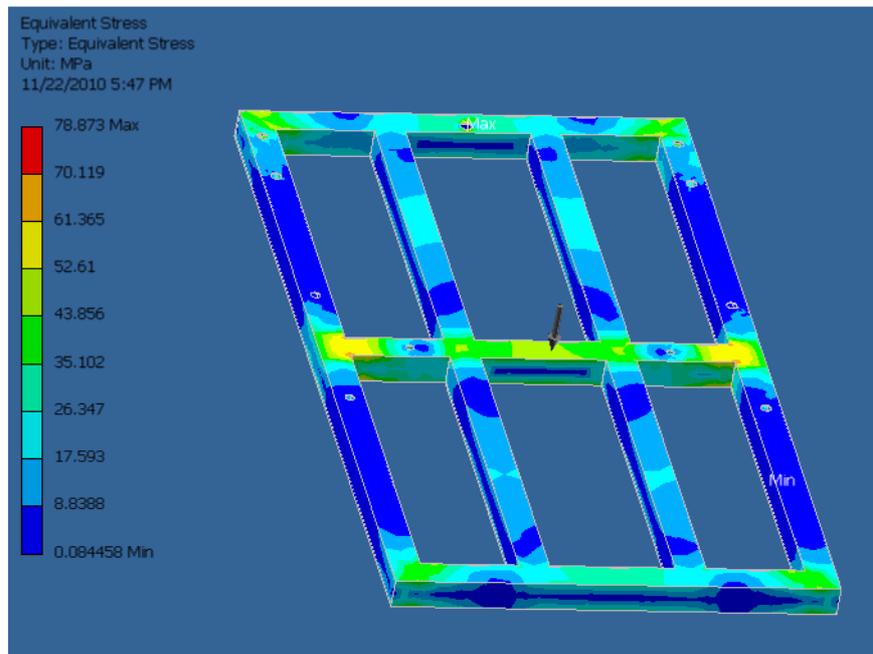


Figura 5.5.2-22. Distribución del estrés equivalente en el bastidor

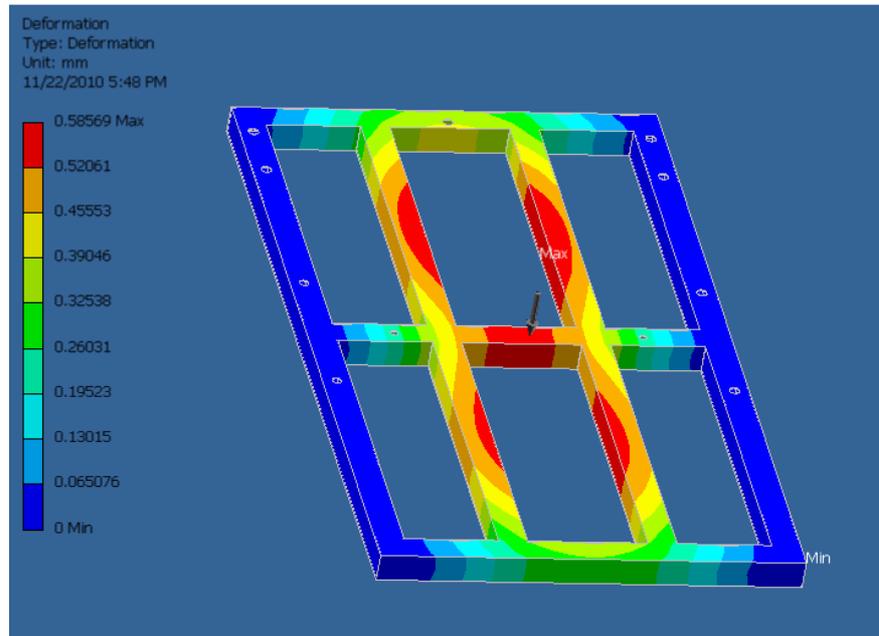


Figura 5.5.2-23. Distribución de la deformación en el bastidor

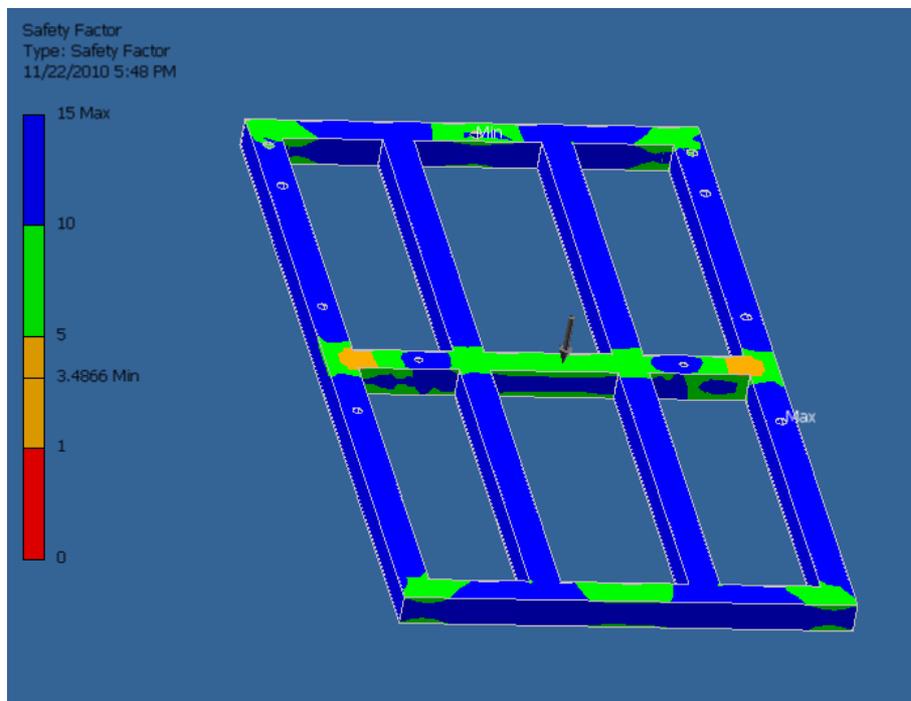


Figura 5.5.2-24. Distribución del factor de seguridad en el bastidor

Como se puede ver, el mínimo factor de seguridad obtenido es de 3.49; el cual es mayor al factor de seguridad mínimo requerido de 2.

5.6 Construcción y Ensamblaje

En la tabla 5.4-1, “Listado de componentes y codificación”, en la sección 5.4, se hace referencia a si los componentes en cuestión fueron adquiridos de un distribuidor o si éstos debieron ser manufacturados. Detalles respecto a los procesos de manufactura o adquisición de componentes no son de mayor relevancia para el texto de este proyecto. Se procede a mostrar únicamente el proceso de ensamblaje y el modelo construido

Para facilitar la comprensión del proceso de ensamblaje de la plataforma, se muestran a continuación despieces de los módulos por separado. Después se muestra como los módulos de transmisión se unen al central.

Estas imágenes provienen del software Autodesk Inventor, con el que el diseño fue creado. En esta sección se muestran también fotografías de la plataforma construida.

DESPIECE DE MODULO CENTRAL

Las figuras 5.6-1, 5.6-2 y 5.6-3 muestran despieces del módulo central. Estas figuras sirven como guía para el proceso de ensamblaje:

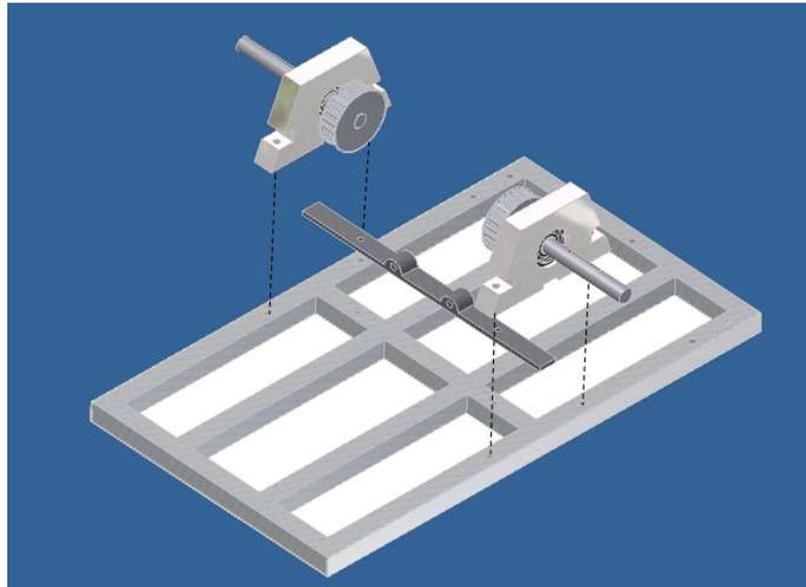


FIGURA 5.6-1: Despiece #1 del módulo central

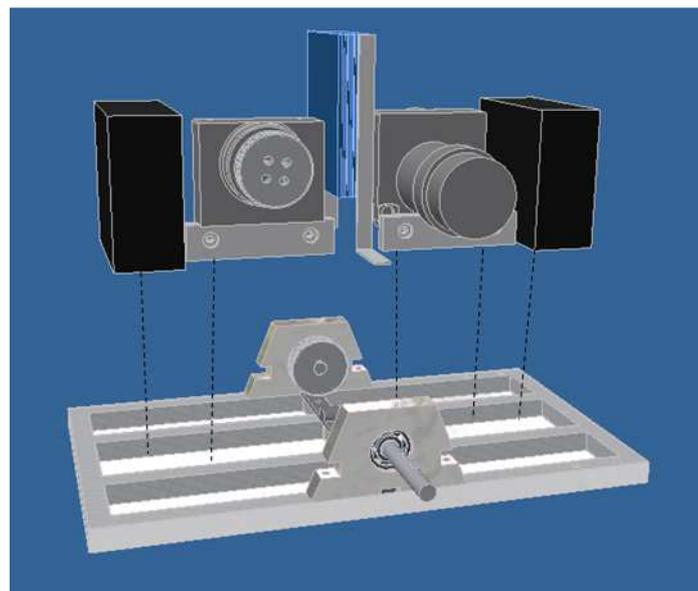


FIGURA 5.6-2: Despiece #2 del módulo central

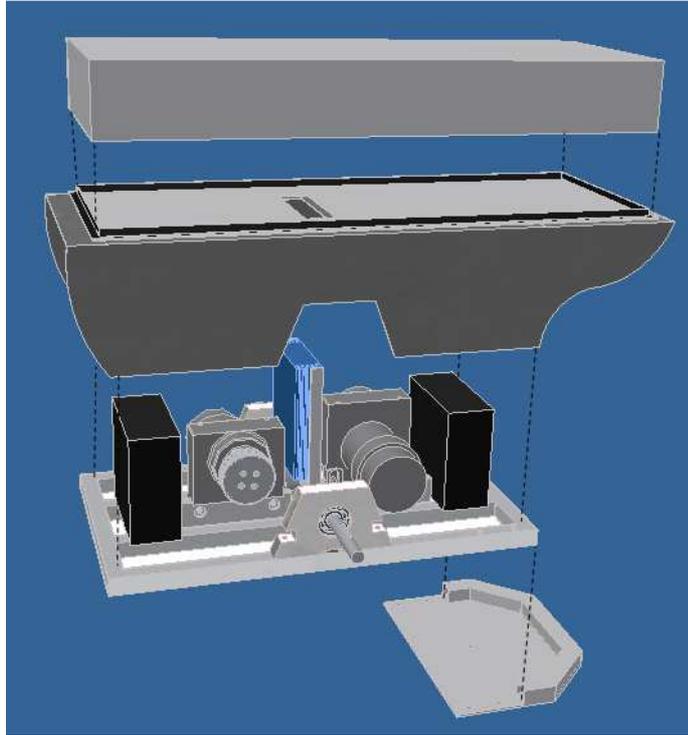


FIGURA 5.6-3: Despiece #3 del módulo central

La figura 5.6-4 muestra el módulo central ensamblado:

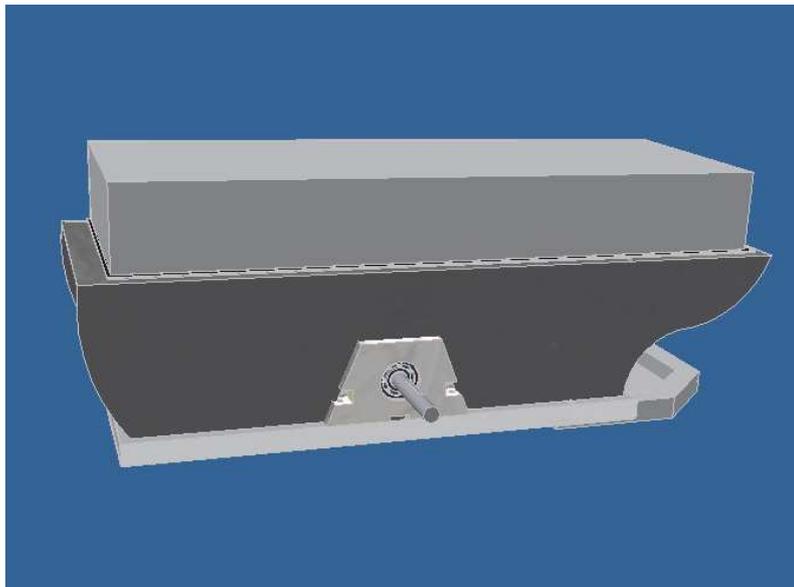


FIGURA 5.6-4: Módulo central ensamblado

DESPIECE DE MODULOS DE TRANSMISION

La figura 5.6-5 muestra un despiece de uno de los módulos de transmisión. Esta figura sirve como guía para el proceso de ensamblaje:

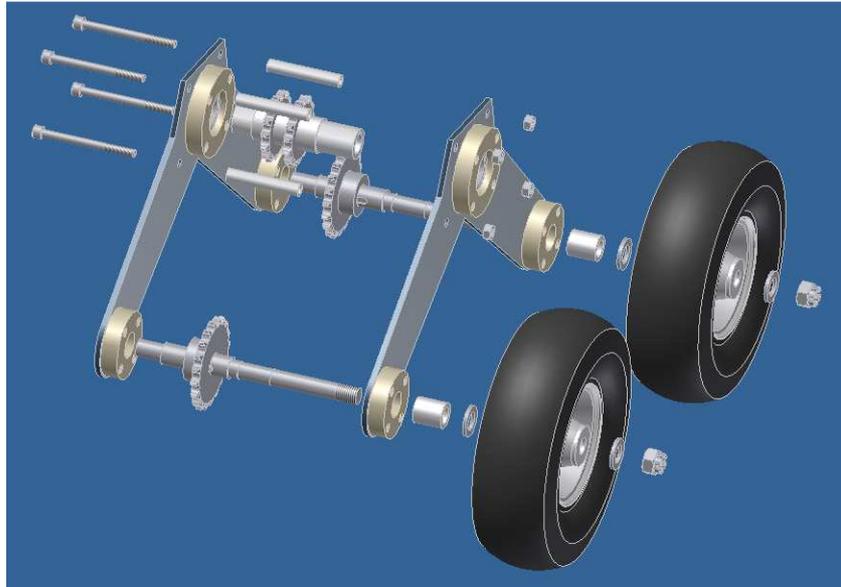


FIGURA 5.6-5: Despiece del módulo de transmisión

La figura 5.6-6 muestra uno de los módulos de transmisión ensamblados:



FIGURA 5.6-6: Módulo de transmisión ensamblado

Los dos módulos de transmisión se ensamblan de la misma forma.

PROTOTIPO CONSTRUIDO

A continuación se muestran imágenes del prototipo construido, en conjunto con imágenes del diseño hecho en computadora. Se muestran los módulos central y módulos de transmisión tanto por separado como en conjunto para conformar el vehículo.

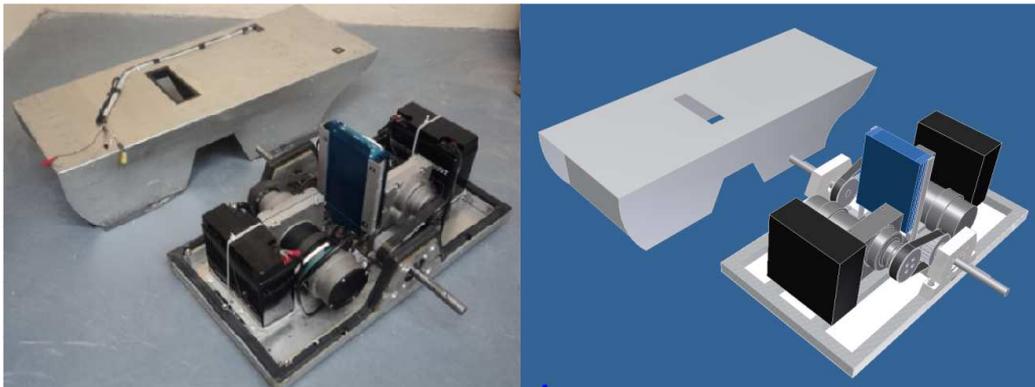


FIGURA 5.6-7: Chasis con componentes eléctricos de potencia – modulo central



FIGURA 5.6-8: Módulo central construido



FIGURA 5.6-9: Módulo de transmisión construido



FIGURA 5.6-10: Ensamblaje de módulo central y módulos de transmisión



FIGURA 5.6-11: Vehículo autónomo ensamblado



FIGURA 5.6-12: Vehículo autónomo ensamblado – vista lateral



FIGURA 5.6-13: Vehículo autónomo ensamblado – tapa de componentes electrónicos cerrada



FIGURA 5.6-14: Vehículo autónomo ensamblado – tapa de componentes electrónicos abierta

CAPITULO 6: DISEÑO DE LA PLATAFORMA – PROGRAMACION

Los componentes electrónicos y sensores necesarios para la modalidad autónoma de la plataforma, tanto como el cableado eléctrico necesario, fueron descritos en detalle en capítulos anteriores. En este capítulo se describe la lógica, los algoritmos necesarios y la programación para el funcionamiento autónomo de la plataforma de exploración.

No se detalla el programa desarrollado en el software LabVIEW versión 7.1. El archivo digital del programa implementado se encuentra en el CD adjunto al escrito de este proyecto.

6.1 Lógica del modo autónomo

Antes de empezar con la programación de la plataforma de exploración se debió definir, de manera conceptual, una secuencia de acciones que se desea que el vehículo realice en la modalidad autónoma. A esto se le llama lógica del modo autónomo.

El vehículo cuenta con una brújula electrónica y un dispositivo GPS, lo que le permite conocer su orientación y ubicación en cualquier punto del planeta. Se define como coordenadas de posición o coordenadas actuales a la latitud y longitud en las que se encuentra el vehículo. Estas coordenadas son actualizadas en tiempo real. Se define como coordenadas objetivo a la latitud y longitud ingresadas por un usuario, donde se quiere que el vehículo se traslade.

En el modo autónomo, la secuencia de acciones deseada es la siguiente:

-El usuario introduce coordenadas objetivo (latitud y longitud) de uno o más puntos

-El procesador obtiene datos del dispositivo GPS y la brújula electrónica. Se toman 20 datos del dispositivo GPS y se hace un promedio cada vez que la plataforma debe orientarse. Esto se hace para compensar por la imprecisión de este dispositivo.

La plataforma robótica compara las coordenadas objetivo del primer punto con las coordenadas de posición. Esto le permite obtener el ángulo que existe entre su orientación actual y las coordenadas objetivo

-El procesador determina hacia qué lado es conveniente girar, izquierda o derecha, para que su orientación concuerde con la de las coordenadas objetivo. Se debe siempre realizar un giro menor o igual a 180°

-Los motores reciben la orden y comienzan a girar el vehículo, hasta que éste se alinea con las coordenadas objetivo

-El vehículo avanza en línea recta hacia adelante, en dirección a las coordenadas objetivo. Si la distancia entre la plataforma y el siguiente punto objetivo es mayor a 20 metros, se da un avance de esta distancia, aproximadamente, hacia adelante. Si la distancia de llegada al punto objetivo es menor a 20 metros, se da un avance de 10 metros aproximadamente.

-Si no se llega al punto objetivo, el ciclo de obtención de un promedio de los datos del GPS y orientación hacia el punto objetivo y avance se repite. Se corrige la orientación constantemente: el vehículo se detiene, recalcula la orientación y avanza de nuevo hacia las coordenadas objetivo

-Se detiene al llegar cerca (a un área de 12 metros a la redonda) del punto de destino

-El vehículo da una vuelta completa sobre su eje vertical, para que la cámara tenga una visión de 360° en el punto objetivo

-Si se da más de un punto objetivo, el vehículo se dirige al siguiente repitiendo la misma secuencia de acciones. Si no se tiene otro punto objetivo, el vehículo regresa al punto inicial

-Al llegar a la posición de partida, el vehículo se orienta en dirección al norte geográfico, dando un giro en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj

Esta secuencia de acciones se describe de manera gráfica a continuación:

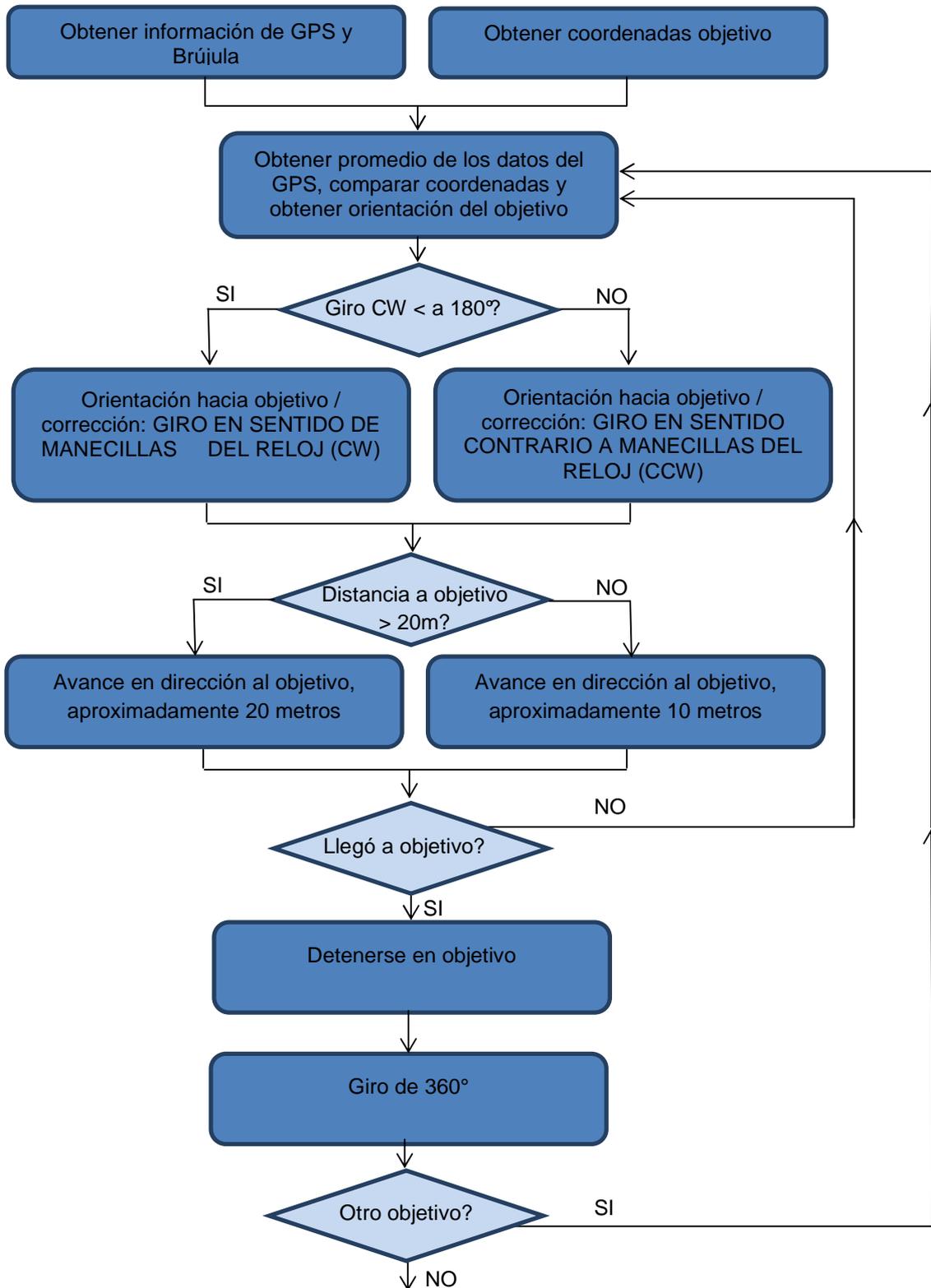


FIGURA 6.1-1: Lógica en funcionamiento autónomo – PARTE 1

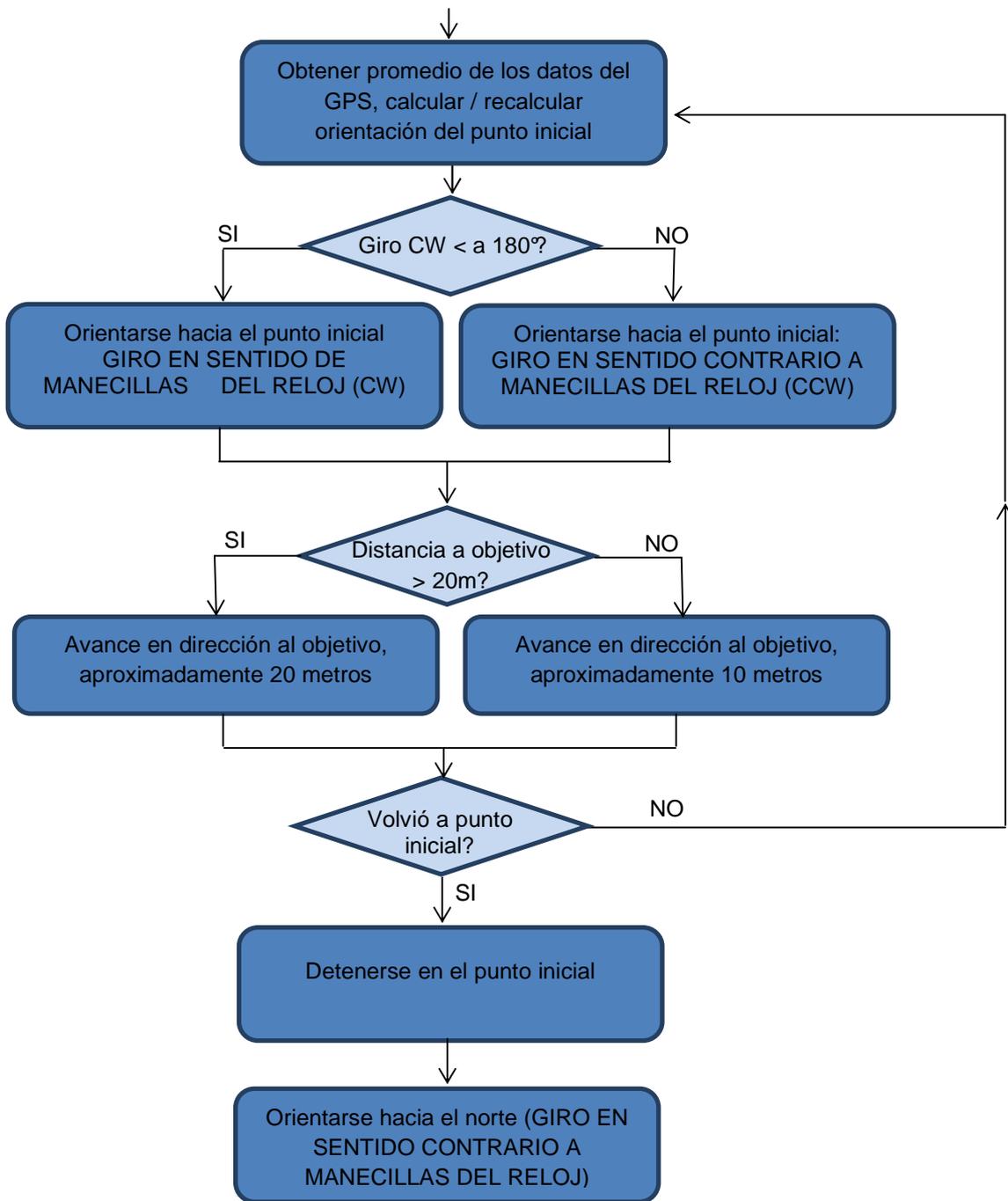


FIGURA 6.1-1: Lógica en funcionamiento autónomo – PARTE 2

CONSIDERACIONES IMPORTANTES:

En la lógica de programación se establece que una vez calculada la orientación del punto objetivo, la plataforma avanza hacia adelante una distancia determinada y debe recalculer su orientación posteriormente. Esto se hace a manera de retroalimentación, con el objetivo de corregir la orientación del vehículo.

Es importante tener en cuenta que tanto el dispositivo GPS como la brújula tienen un margen de error no despreciable. También se cuenta con un tiempo necesario de actualización de datos.

La brújula tiene precisión de 3-4 grados. Añadiendo 1 grado de error en la calibración de este instrumento, se estima un máximo de 5 grados de error. Considerando este caso extremo, se obtiene que una desviación de 5 grados en la orientación, luego de recorrer 10 metros en línea recta, produce un desfase de 1.05 metros aproximadamente entre la coordenada objetivo y la coordenada real de llegada. Un esquema de esto se muestra en la figura 6.1-3:

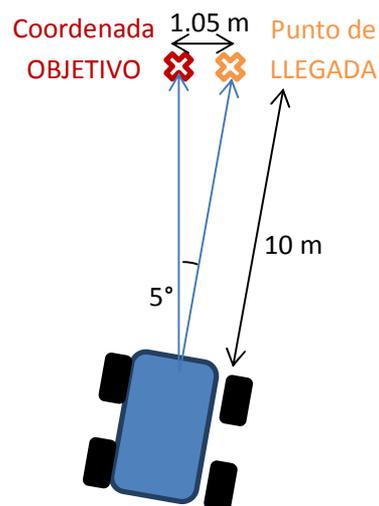


FIGURA 6.1 – 2: Esquema de error por precisión de la brújula

Las especificaciones técnicas del dispositivo GPS indican que la precisión de este dispositivo es de ± 3 metros. Sin embargo, en pruebas realizadas con el dispositivo GPS estático, se observaron lecturas de datos separados por distancias de hasta 25 metros. Esto creó la necesidad de calcular promedios en un mismo punto en la secuencia autónoma, como se describió anteriormente en esta misma sección. Al calcular varios promedios (de 20 datos cada uno) en un mismo punto con el dispositivo GPS, se obtuvieron puntos promedio separados por hasta 6 metros de distancia.

Al considerar ambos casos extremos, un error en la orientación (introducido por la brújula) de 5 grados y un error en la posición (introducido por el dispositivo GPS) de 6 metros se obtiene un máximo de 7.05 metros de desfase entre la posición real del objetivo y la posición de llegada.

En la sección 3.2, "Pruebas de desempeño", se estableció un área de llegada para la plataforma de 6 metros a la redonda del punto objetivo. Debido a la imprecisión del dispositivo GPS se planteó una nueva área de llegada, de 12 metros a la redonda del punto objetivo, para garantizar la llegada del vehículo autónomo a su objetivo.

6.2 Convenciones para la navegación

Antes de describir los algoritmos de toma de decisiones y la programación de la plataforma en detalle (secciones siguientes), se considera importante hacer una revisión de las convenciones relativas al sistema de coordenadas en el que se divide el planeta, ya que éste es importante para la implementación de un sistema de navegación guiado por un dispositivo GPS. Estas convenciones y otras necesarias para la comprensión de este proyecto se explican a continuación.

-El planeta se divide en paralelos y meridianos, los cuales indican latitud y longitud, respectivamente, de cualquier punto en el planeta. La latitud es la distancia angular entre el ecuador (latitud 0) y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano del mismo punto angular. La longitud es la distancia angular entre el meridiano de Greenwich (longitud 0) y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del paralelo del mismo punto angular.

-Una notación común es expresar latitud y longitud medidas en grados (°) y minutos ('). Un punto dado del planeta se expresa con su latitud y longitud. Se debe también especificar en qué hemisferio del planeta se encuentra dicho punto.

-Las pruebas de la plataforma fueron realizadas en Cumbayá, Ecuador, punto ubicado en el hemisferio sudoeste del planeta. En este punto la latitud incrementa en dirección al sur geográfico y la longitud en dirección al oeste. El programa implementado se diseñó para funcionar en este hemisferio del planeta.

-Un ángulo de una milésima de minuto, expresado en términos de latitud y longitud, equivale a una distancia lineal de 3 metros sobre la superficie de la tierra, aproximadamente.

-La adquisición de datos del GPS se hace según el protocolo de comunicación de la NMEA (National Marine Electronics Association). Este es un protocolo comúnmente utilizado en instrumentos de navegación, tales como dispositivos GPS y resultó de mucha utilidad.

El protocolo NMEA dispone de diferentes tipos de transmisión de datos, con los cuales se obtiene diferente información del dispositivo GPS. El tipo de transmisión de datos utilizado en este proyecto es el GPGGA, dado que éste proporciona información respecto a la precisión de los datos recibidos del GPS. Esta información se utilizó para poder discriminar entre datos de mayor o menor calidad.

Mayor información sobre el protocolo NMEA y los diferentes tipos de transmisión de datos en el Anexo C.

6.3 Algoritmos de toma de decisiones

Existen varios instantes en la secuencia de la modalidad autónoma en los que la plataforma debe tomar decisiones, en cuanto a realizar una u otra acción. Una vez decidida la secuencia de acciones que se desea que la plataforma autónoma ejecute, se deben expresar estas operaciones en términos del lenguaje de programación que se usará.

La programación de la plataforma fue hecha en Labview. Este es un lenguaje de programación gráfico, donde los algoritmos y acciones a seguir se expresan en términos de comparaciones numéricas. Se cuenta también con herramientas como temporizadores, lazos de tipo “while”, secuencias planas o división de acciones en estructuras de casos. De ahí surge la necesidad de expresar la lógica planteada en la sección 6.1, “Lógica del modo autónomo”, en estos términos.

En esta sección se describen los algoritmos de toma de decisiones implementados, utilizando comparaciones numéricas. En la siguiente sección se describe como estos algoritmos son implementados en Labview.

ALGORITMOS NECESARIOS

Se deben definir varios algoritmos de toma de decisiones, en términos de comparaciones numéricas. Estos son:

- Comparación de coordenadas actuales con coordenadas objetivo para obtener la orientación de éste
- Decisión de sentido de giro
- Parar secuencia de giro al estar alineado con orientación del objetivo

-Avance en línea recta y detener motores al estar a la distancia establecida del objetivo

COMPARACION DE COORDENADAS ACTUALES CON COORDENADAS OBJETIVO

Es posible determinar la orientación de un punto objetivo comparando las coordenadas de éste con las coordenadas de la plataforma robótica. Esto se hace mediante un cálculo simple utilizando funciones trigonométricas. Sin embargo, es importante determinar primero un plano cartesiano consistente y definir en qué cuadrante de éste se encuentra el objetivo, dado que esta información determina la ecuación necesaria para calcular dicha orientación.

El plano cartesiano utilizado consiste en uno en el que la latitud está representada en el eje de las ordenadas y la longitud está representada en el eje de las abscisas. La orientación de un punto se define con ángulo entre 0 y 359.9°. La orientación de un punto crece en sentido de giro de las manecillas del reloj y un punto ubicado al norte geográfico tiene una orientación de 0°.

Según la convención establecida en la sección 6.2, “Convenciones para la navegación”, las pruebas de navegación se realizaron en el hemisferio sudoeste del planeta, donde la latitud aumenta en dirección al sur geográfico y la longitud en dirección al oeste. Dentro de esta convención, se establecen 4 cuadrantes locales: Cuadrante Noreste, Cuadrante Noroeste, Cuadrante Sudeste, Cuadrante Sudoeste. El punto de origen es el lugar donde se encuentra la plataforma robótica.

Un esquema del sistema de coordenadas descrito se muestra a continuación:

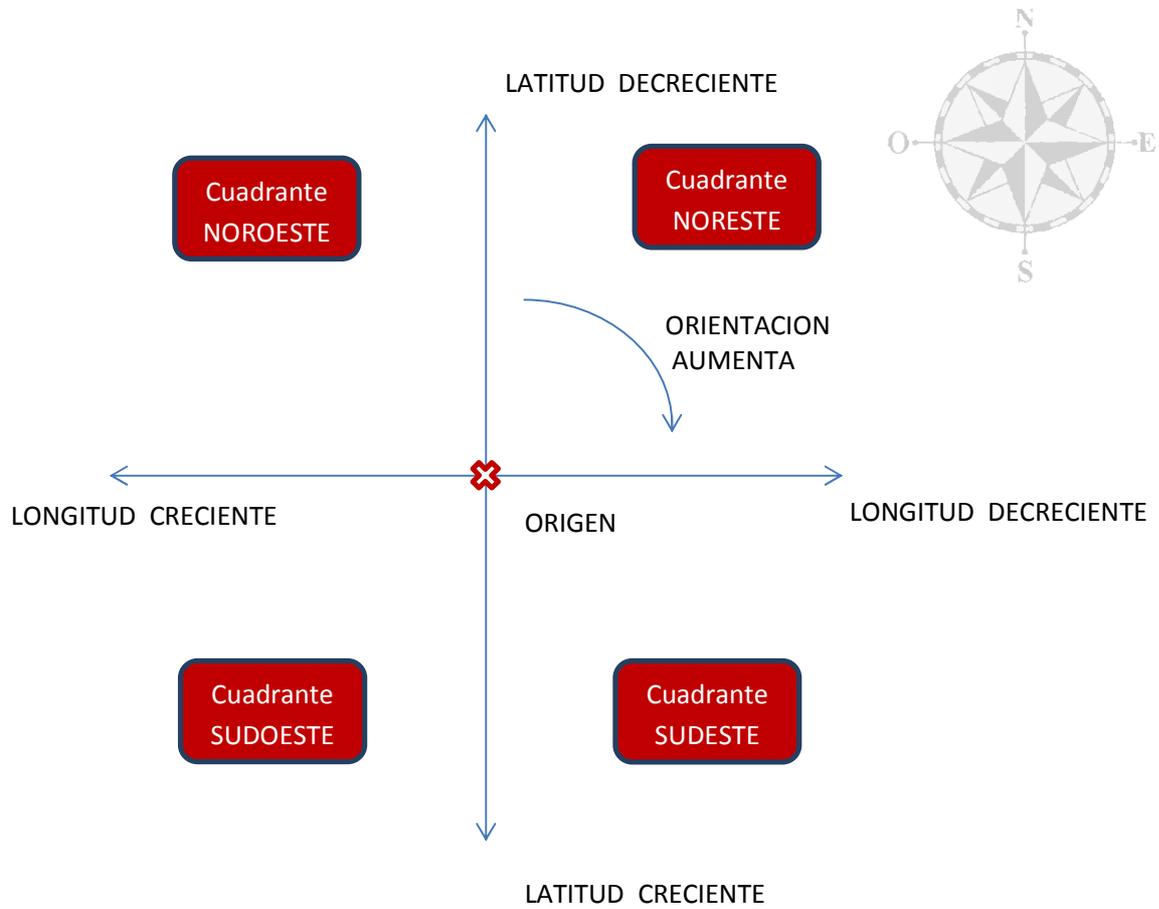


FIGURA 6.3-1: Esquema de plano cartesiano utilizado

La determinación del cuadrante (local) en el que se encuentra el objetivo se determina al comparar las magnitudes de las coordenadas de la plataforma y de las coordenadas objetivo. En la siguiente tabla se muestran los 4 casos posibles, en base a las coordenadas objetivo:

	Longitud Objetivo MAYOR	Longitud Objetivo MENOR
Latitud Objetivo MAYOR	SUDOESTE	SUDESTE
Latitud Objetivo MENOR	NOROESTE	NORESTE

TABLA 6.3-1: Decisión de cuadrante del punto objetivo

Una vez determinado el cuadrante en el que se encuentra el punto objetivo, se calcula su ángulo de orientación, aquí denominado γ (“gamma”). Este está en función del ángulo β (“beta”, mostrado en la siguiente tabla). El cálculo del ángulo γ depende del cuadrante de ubicación del punto objetivo. Esto se muestra a continuación:

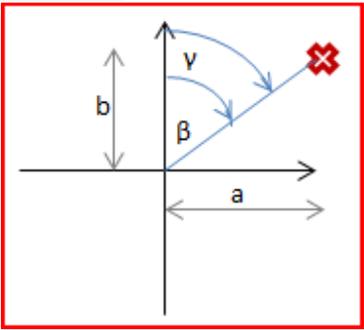
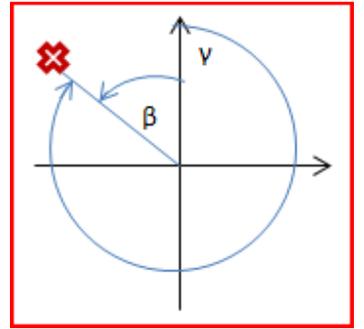
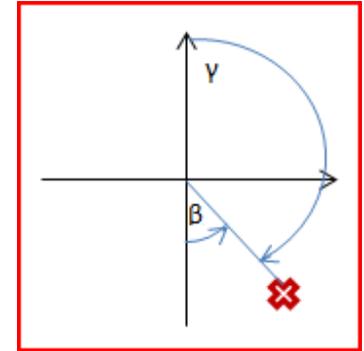
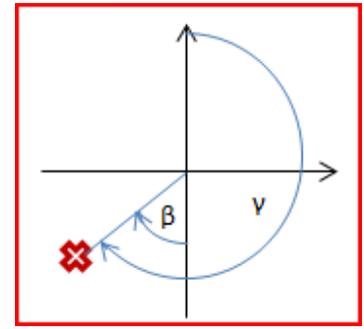
	<u>ESQUEMA</u>	<u>CALCULO DE ANGULO β</u>	<u>CALCULO DE ANGULO γ</u>
OBJETIVO NORESTE		$a = \text{Lat. Actual} - \text{Lat. Objetivo} $ $b = \text{Long. Actual} - \text{Long. Objetivo} $ $\beta = \tan^{-1}(a/b)$	$\gamma = \beta$
OBJETIVO NOROESTE		$a = \text{Lat. Actual} - \text{Lat. Objetivo} $ $b = \text{Long. Actual} - \text{Long. Objetivo} $ $\beta = \tan^{-1}(a/b)$	$\gamma = 360 - \beta$
OBJETIVO SUDESTE		$a = \text{Lat. Actual} - \text{Lat. Objetivo} $ $b = \text{Long. Actual} - \text{Long. Objetivo} $ $\beta = \tan^{-1}(a/b)$	$\gamma = 180 - \beta$
OBJETIVO SUDOESTE		$a = \text{Lat. Actual} - \text{Lat. Objetivo} $ $b = \text{Long. Actual} - \text{Long. Objetivo} $ $\beta = \tan^{-1}(a/b)$	$\gamma = 180 + \beta$

TABLA 6.3-2: Cálculo de orientación del punto objetivo

DECISION DE SENTIDO DE GIRO

Se implementó un algoritmo para que, una vez calculado el ángulo del punto objetivo, la plataforma tome la decisión de girar en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario a éste, según sea conveniente. Para esto se debe comparar la orientación de la plataforma con la orientación del punto objetivo y decidir girar en el sentido para el que el ángulo sea menor o igual a 180° .

Se deben crear algoritmos para 4 casos diferentes, dependiendo del cuadrante en el que se encuentre el punto objetivo. Por motivos de claridad en el análisis, se dividió cada caso en 6 subcasos, dependiendo de la diferencia entre la orientación de la plataforma y la orientación del ángulo del objetivo. Los diferentes subcasos y el sentido en el que debe girar la plataforma para cada uno se describen a continuación. En los esquemas siguientes, una "x" representa el punto objetivo y su orientación está dada por el ángulo γ . La orientación de la plataforma se indica con una flecha y ésta está dada por el ángulo α .

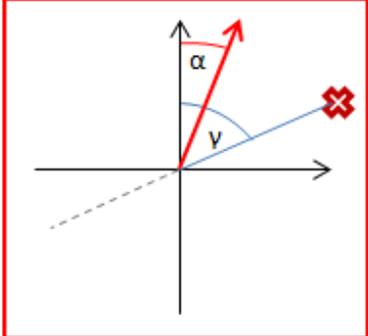
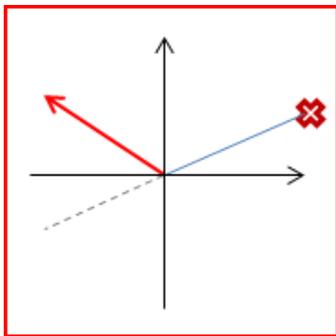
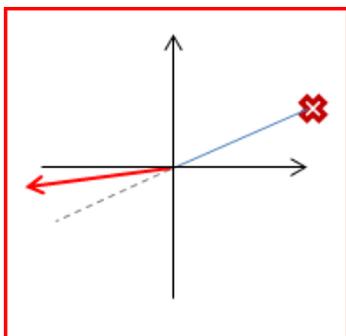
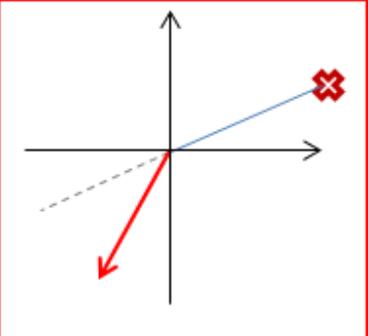
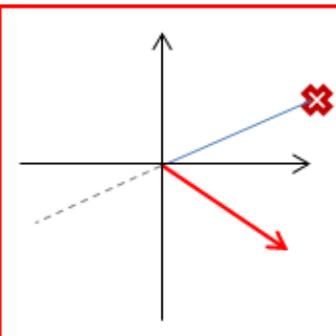
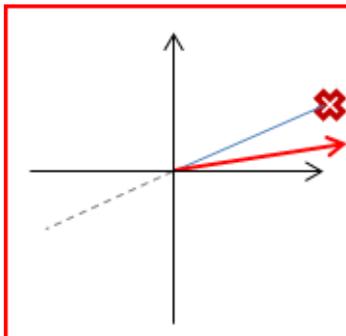
Subcasos para Objetivo en cuadrante Noreste		
<p>SUBCASO 1</p>  <p>$\gamma - \alpha > 0$ GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ</p>	<p>SUBCASO 2</p>  <p>$\gamma - \alpha < -180^\circ$ GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ</p>	<p>SUBCASO 3</p>  <p>$\gamma - \alpha < -180^\circ$ GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ</p>
<p>SUBCASO 4</p>  <p>$-180^\circ < \gamma - \alpha < 0$ GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ</p>	<p>SUBCASO 5</p>  <p>$-180^\circ < \gamma - \alpha < 0$ GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ</p>	<p>SUBCASO 6</p>  <p>$-180^\circ < \gamma - \alpha < 0$ GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ</p>

TABLA 6.3-3: Determinación de sentido de giro – cuadrante Noreste

Cada uno de los 6 subcasos para los 3 cuadrantes restantes se analizan de manera análoga para determinar el sentido de giro para cualquier ángulo del objetivo y de la plataforma. Los resultados para cada caso se resumen a continuación:

CUADRANTE	RANGO DE $\gamma - \alpha$	DECISION DE GIRO
OBJETIVO NORESTE	$\gamma - \alpha > 0^\circ$ $\gamma - \alpha < -180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ
	$-180^\circ < \gamma - \alpha < 0^\circ$	GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ
OBJETIVO NOROESTE	$0^\circ < \gamma - \alpha < 180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ
	$\gamma - \alpha < 0^\circ$ $\gamma - \alpha > 180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ
OBJETIVO SUDESTE	$\gamma - \alpha > 0^\circ$ $\gamma - \alpha < -180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ
	$-180^\circ < \gamma - \alpha < 0^\circ$	GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ
OBJETIVO SUDOESTE	$0^\circ < \gamma - \alpha < 180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO DE MANECILLAS DEL RELOJ
	$\gamma - \alpha < 0^\circ$ $\gamma - \alpha > 180^\circ$	GIRAR EN SENTIDO CONTRARIO A MANECILLAS DEL RELOJ

TABLA 6.3-4: Determinación de sentido de giro – 4 casos

**PARAR SECUENCIA DE GIRO AL ESTAR ALINEADO CON ORIENTACION DEL
OBJETIVO**

Una vez que la plataforma comienza a girar, se debe establecer que ésta debe detenerse al estar alineada con la orientación del punto objetivo. Debido a que la brújula electrónica tiene un tiempo mínimo de reacción (no especificado por el fabricante) y a que la plataforma no se detiene de manera instantánea, se establece un rango dentro del cual la secuencia de giro debe parar.

La instrucción dada es que se deben detener los motores en secuencia de giro cuando la diferencia entre la orientación de la plataforma y el ángulo del objetivo sea menor a 2° .

$$|\gamma - \alpha| < 2^\circ$$

La velocidad establecida para el giro de la plataforma equivale a 0.35 radianes por segundo. Se realizaron 30 pruebas a esta velocidad angular, donde se obtuvo que el error (diferencia entre el ángulo de orientación de la plataforma y el ángulo del objetivo) no fue mayor a 3°. Este desfase se debe a la velocidad de reacción de la brújula y la fracción de tiempo que tarda la plataforma en detenerse, mencionados anteriormente.

AVANCE EN LINEA RECTA Y DETENER MOTORES AL ESTAR A LA DISTANCIA ESTABLECIDA DEL OBJETIVO

Se estableció que la plataforma robótica debe llegar a un área de 12 metros a la redonda del punto objetivo. Dado que esto se debe realizar en base a los datos de latitud y longitud (dispuestos en el plano cartesiano descrito anteriormente) recibidos del dispositivo GPS, se utilizó un cuadrado circunscrito en un círculo de 12 metros de radio como área de llegada. Un esquema se muestra a continuación:

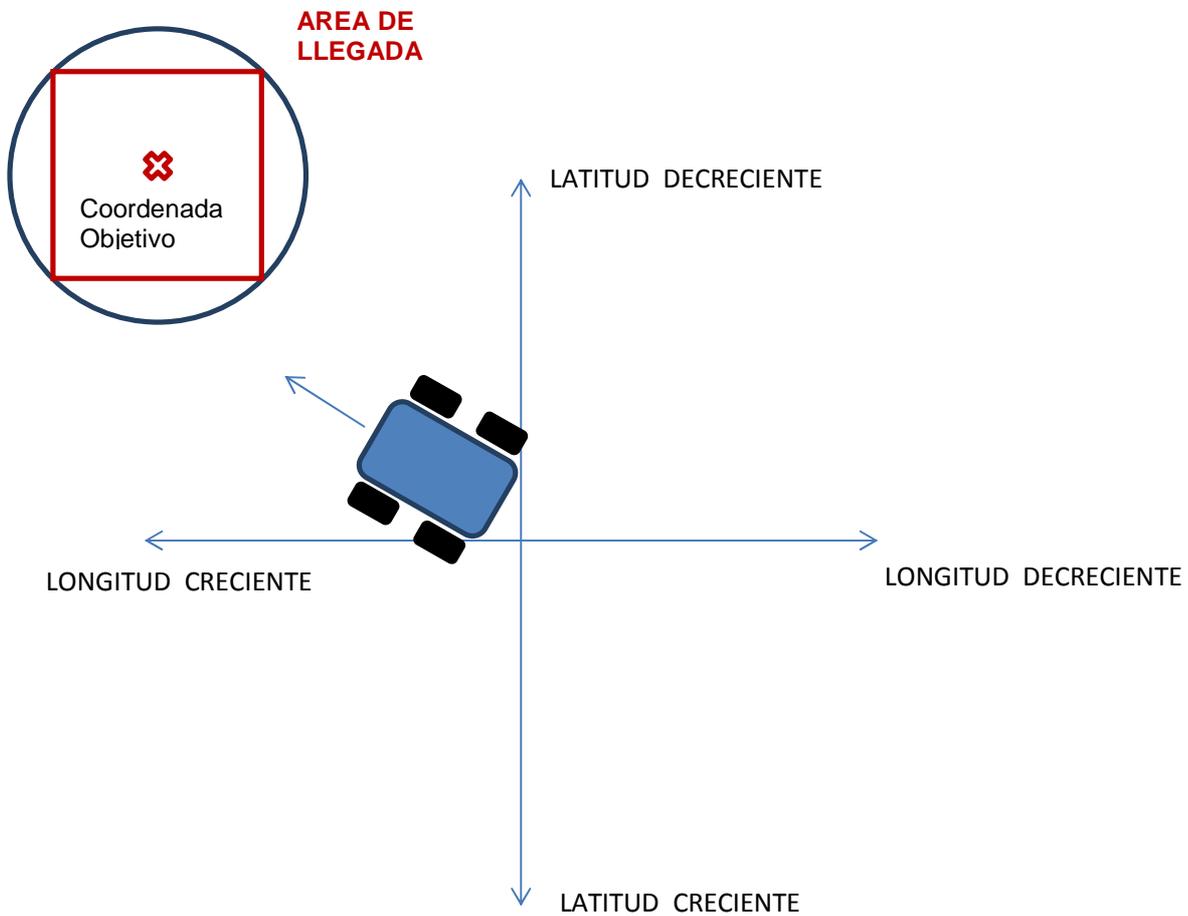


FIGURA 6.3-2: Area de llegada en modalidad autónoma

Cada lado del cuadrado circunscrito mide 16.9 metros. De esta medida se establece que la plataforma debe detenerse cuando la diferencia entre las coordenadas de la plataforma y las coordenadas del punto objetivo sea menor a la mitad de la longitud de los lados del cuadrado, 8.45 metros. Expresando éstas coordenadas en términos de distancia lineal se obtiene:

$$|\text{Latitud actual} - \text{Latitud objetivo}| < 8.45\text{m}$$

$$|\text{Longitud actual} - \text{Longitud objetivo}| < 8.45\text{m}$$

Para poder ser procesada con la información del GPS, se debe expresar esta condición en términos de latitud y longitud en grados y minutos. Como se explicó en la sección 6.2, “Convenciones para la navegación”, una milésima de minuto equivale a una distancia lineal de 3 metros sobre la superficie de la tierra, aproximadamente. Realizando esta conversión se obtiene:

$$|\text{Latitud actual} - \text{Latitud objetivo}| < 0.00282'$$

$$|\text{Longitud actual} - \text{Longitud objetivo}| < 0.00282'$$

En la sección 6.1, “Lógica del modo autónomo”, se calculó que el máximo error posible introducido por la brújula electrónica y el dispositivo GPS es de 7.05 metros en la posición de la plataforma. Dado que este error es menor que la distancia de 8.45 metros establecida en la comparación numérica del programa, se garantiza que la plataforma llegará siempre al punto objetivo.

Estos son todos los algoritmos, expresados en términos de comparaciones numéricas, que se implementan en el modo de funcionamiento autónomo. En caso de tener más de un punto objetivo y al volver al punto inicial únicamente se deben repetir estos algoritmos en un orden lógico.

6.4 Programación en Labview

El programa implementado en Labview consiste en un instrumento virtual principal y 7 sub instrumentos virtuales. Los sub instrumentos virtuales se encuentran incorporados en el principal. Todos los archivos se incluyen en el CD adjunto. En la figura 6.4-1 se muestra el programa implementado de manera esquemática:

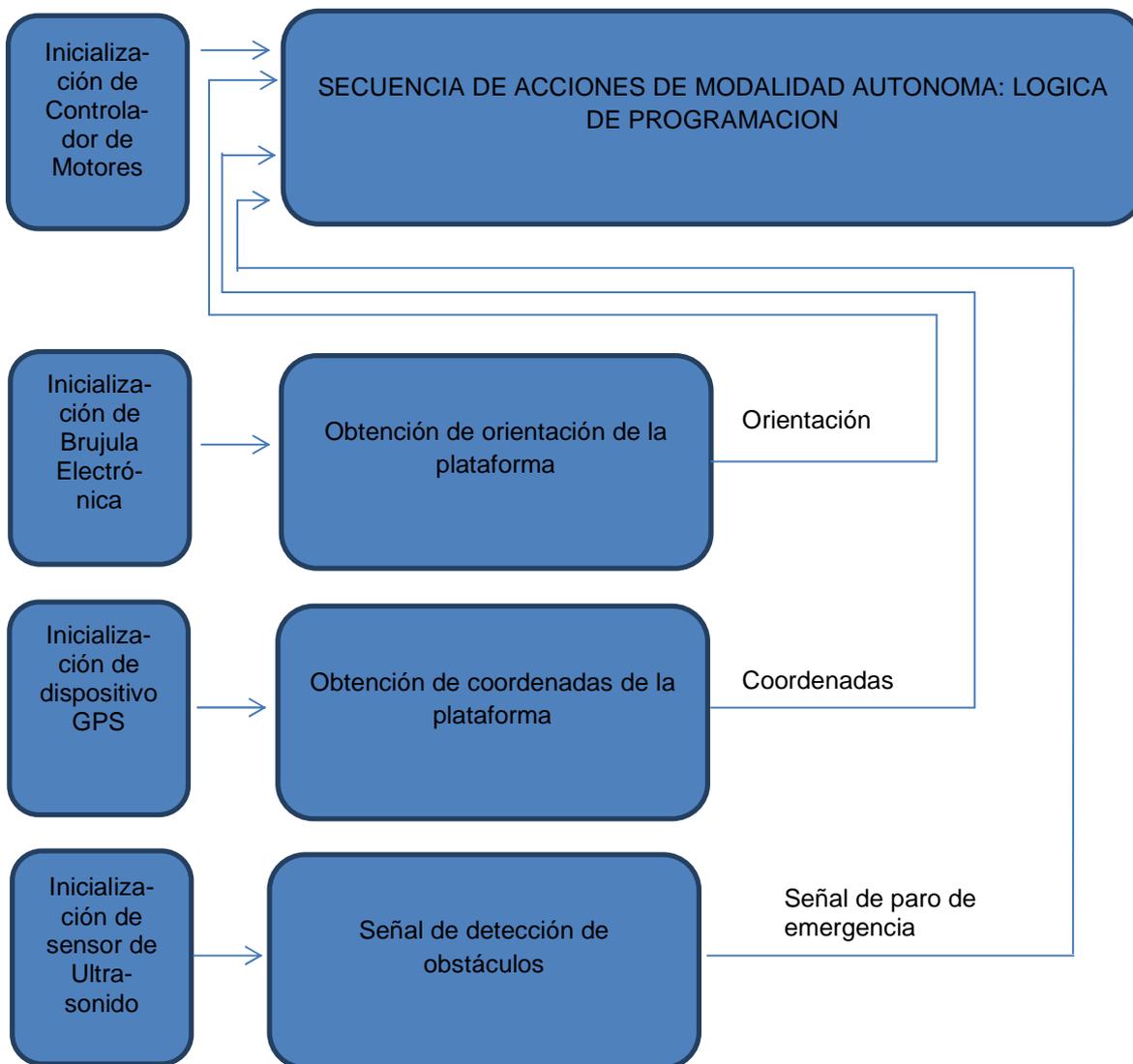


FIGURA 6.4-1: Esquema conceptual del programa de modalidad autónoma

En la figura 6.4-1 se tiene un bloque principal, denominado “Secuencia de acciones de modalidad autónoma: lógica de programación”. Es en este conjunto de instrucciones que se desarrolla la toma de decisiones y acciones para la secuencia autónoma. Los demás bloques mostrados en la figura 6.4-1 cumplen la función de inicializar la brújula, el dispositivo GPS y el sensor de ultrasonido, para ser utilizados en el primer bloque.

CAPITULO 7: RESULTADOS Y ANALISIS

7.1 Resultados

En la sección 3.2, “Pruebas de desempeño”, se establecieron 13 pruebas a las que se sometería al prototipo de plataforma autónoma, para determinar si las expectativas iniciales fueron cumplidas. La tabla 7.1, a continuación, muestra las pruebas establecidas inicialmente, junto con una columna que muestra los resultados obtenidos en cada prueba. A continuación de la tabla se presentan imágenes para las pruebas en las que éstas se consideraron necesarias:

<u>Requisito de diseño</u>	<u>Prueba a realizar</u>	<u>RESULTADO</u>
Diseño Robusto	Subir y bajar escalón en modo RC: Subir y bajar un escalón de al menos 7.5 cm de altura en diez ocasiones consecutivas, sin realizar ningún tipo de ajuste a la plataforma. La velocidad es de 1.1 m/s.	PRUEBA CUMPLIDA: Esta prueba se realizó en un escalón de 7.5 cm de altura. Una imagen de esta prueba se muestra más adelante, en la figura 7.1-1
Diseño Robusto	Tiempo de operación sin mantenimiento: Se debe operar la plataforma por un tiempo de 10 horas sin tener que realizar ningún tipo de ajuste o mantenimiento. La carga de las baterías no se considera como mantenimiento.	PRUEBA CUMPLIDA: Se operó la plataforma por un tiempo mayor a 10 horas sin requerir de ningún tipo de ajuste o mantenimiento más allá de cargar las baterías
Ruedas suficientemente grandes	Subir y bajar escalón en modo RC. (La misma prueba descrita en el primer campo de esta tabla sirve para probar este aspecto)	PRUEBA CUMPLIDA
Chasis suficientemente elevado del suelo	Pasar sobre un obstáculo elevado: se deberá conducir la plataforma de modo que la parte central de ésta pase sobre un obstáculo de 15 cm de altura.	PRUEBA CUMPLIDA: Se condujo la plataforma sobre una caja de 15 cm de altura. Esta no interfirió con el vehículo.

TABLA 7.1-1: Resultados de Pruebas – PARTE 1

<u>Requisito de diseño</u>	<u>Prueba a realizar</u>	<u>RESULTADO</u>
Navegación en pendientes o superficies inclinadas	Subir y bajar una pendiente mayor a 20° en modo RC: Se deberá subir y bajar una pendiente de esta inclinación en diez ocasiones consecutivas. La velocidad es de 1.1 m/s.	PRUEBA CUMPLIDA: Esta prueba se realizó en una superficie de aproximadamente 22° de inclinación. Una imagen de esta prueba se muestra más adelante, en la figura 7.1-2
Tiempo de operación continua en modo RC	45 minutos de operación continua en modo RC: La plataforma debe ser capaz de operar, con todos sus componentes electrónicos y sensores, durante este tiempo en la modalidad de radiocontrol.	PRUEBA CUMPLIDA: Se realizaron 3 pruebas para medir el tiempo mínimo de operación continua; en todas se obtuvo una duración mayor a 45 minutos. El tiempo máximo fue de 57 y el mínimo de 53 minutos. Las baterías de los motores quedaron sin energía al cabo de este tiempo.
Tiempo de operación continua en modo autónomo	45 minutos de operación continua en modalidad autónoma: La plataforma debe ser capaz de operar, con todos sus componentes electrónicos y sensores, durante este tiempo en la modalidad autónoma	PRUEBA CUMPLIDA: Se realizaron 3 pruebas para medir el tiempo mínimo de operación continua; en todas se obtuvo una duración mayor a 45 minutos. El tiempo máximo registrado fue de 52 y el mínimo de 49 minutos. Las baterías de los motores quedaron sin energía al cabo de este tiempo.
Velocidades esperadas	Velocidad máxima en la modalidad autónoma: Realizar un ciclo de operación en la modalidad autónoma en el que se recorra una distancia mayor a 100 metros, a una velocidad máxima de 1.1 m/s. Un ciclo de la modalidad autónoma contempla asignarle a la plataforma un punto objetivo, que ésta vaya al punto asignado y vuelva al de origen.	PRUEBA CUMPLIDA: La velocidad máxima en la modalidad autónoma es de aproximadamente 1.2 m/s. Se cumplió un ciclo de prueba a esta velocidad en la modalidad autónoma.
Modularidad	Prueba de modularidad: El vehículo debe constar de diferentes módulos, uno con los componentes eléctricos de potencia y componentes electrónicos (módulo central) y dos módulos con los componentes principales de la transmisión (módulos de transmisión).	PRUEBA CUMPLIDA: El éxito de esta prueba se demuestra con el diseño final de la plataforma. Se deben sacar únicamente dos pernos para desacoplar los módulos de transmisión del módulo principal. Una imagen de los módulos desacoplados se muestra en la figura 7.1-3, más adelante.

TABLA 7.1-1: Resultados de Pruebas – PARTE 2

<u>Requisito de diseño</u>	<u>Prueba a realizar</u>	<u>RESULTADO</u>
Interacción de sensores	Probar interacción simultánea de sensores: Se deberá realizar una prueba del modo autónomo en la que el dispositivo GPS, la brújula electrónica y el sensor de ultrasonido interactúen de manera simultánea.	PRUEBA CUMPLIDA: Se realizó una prueba de un ciclo de funcionamiento (asignando un punto objetivo) a la plataforma, en la que los tres sensores mencionados interactuaban. Se interpuso un obstáculo para probar el sensor de ultrasonido y la plataforma se detuvo antes de impactar con el obstáculo.
Cambio de modalidad RC - Serial	Cambio de modalidad operada a distancia: Se deberá hacer una prueba para verificar que el cambio de modalidad de autónoma a radiocontrol se puede realizar a una distancia mayor a 1000 metros.	PRUEBA CUMPLIDA: Se verificó el cambio de modalidad a una distancia mayor a 1200 metros.
Maniobrabilidad en el modo RC	Prueba de maniobrabilidad: Se deberá realizar una prueba en una pista de obstáculos simple, para verificar la maniobrabilidad en el modo de radiocontrol. En la prueba el operario no deberá tener contacto visual directo con la plataforma y se guiará por las imágenes transmitidas por la cámara de video.	PRUEBA CUMPLIDA: Se cumplió la prueba de maniobrabilidad en la pista de obstáculos descrita. El tiempo mínimo requerido para superar la prueba fue de 2 minutos y 34 segundos.
Alcance modalidad autónoma	Navegación con GPS: Se deberá realizar una prueba asignando un mínimo de 3 puntos objetivo al robot. La plataforma deberá llegar a un área circular de 6 metros a la redonda de cada objetivo y realizar un giro de 360° para que la imagen sea captada por la cámara. Luego de esto deberá regresar al punto de origen.	PRUEBA CUMPLIDA: El requisito inicial fue que la plataforma llegue a un área de 6 metros a la redonda del objetivo. En las pruebas realizadas el área de llegada fue de 12 metros a la redonda, aproximadamente. Esto se debe únicamente a problemas de precisión del dispositivo GPS, por lo que la prueba se considera cumplida. Una imagen de la trayectoria recorrida se muestra más adelante, en la figura 9.1-4.

TABLA 7.1-1: Resultados de Pruebas – PARTE 3

La figura 7.1-1 muestra la prueba que consiste en subir y bajar un escalón en la modalidad de radiocontrol. La prueba se hizo en un escalón de 7.5cm de altura, a una velocidad mayor a 1.1m/s:



FIGURA 7.1-1: Prueba que consiste en subir y bajar un escalón en modo RC

La figura 7.1-2 muestra la prueba que consiste en subir y bajar por una pendiente de inclinación mayor a 20°. La prueba se realizó en una pendiente de 22°, aproximadamente:



FIGURA 7.1-2: Prueba que consiste en subir y bajar una pendiente de inclinación mayor a 20°

La figura 7.1-3 muestra una imagen de la plataforma separada en el módulo principal y los módulos de transmisión:



FIGURA 7.1-3: Plataforma descompuesta en módulo central y módulos de transmisión

La figura 7.1-4 muestra una imagen de la trayectoria recorrida por la plataforma autónoma para la prueba de navegación con GPS. Esta prueba fue realizada en el parqueadero de estudiantes de la Universidad San Francisco de Quito, en Cumbayá-Ecuador. La plataforma empezó en el punto de inicio (indicado en la figura), fue a cada uno de los 3 puntos objetivo y volvió al punto inicial. La distancia recorrida fue de aproximadamente 240 metros. La imagen es una toma satelital obtenida de <http://maps.google.es/>.



FIGURA 7.1-4: Recorrido de la plataforma autónoma para la prueba de navegación con GPS

7.2 Análisis de Resultados

En la sección 3.2, "Pruebas de desempeño", se plantearon expectativas en cuanto a los siguientes campos:

- Dimensiones y peso
- Robustez y exploración en terrenos irregulares
- Tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas
- Diseño modular
- Versatilidad en cuanto a sensores y componentes electrónicos
- Capacidades de navegación: funcionamiento con radio control y autónomo

Como respuesta a la necesidad de tener una base concreta respecto a la que medir el desempeño de la plataforma en estos campos, se plantearon las pruebas listadas en la sección 7.1. Aquí se describe como las pruebas realizadas sirven para demostrar que las expectativas del proyecto fueron alcanzadas:

DIMENSIONES Y PESO

No se planteó una prueba específica respecto a las dimensiones y el peso de la plataforma, dado que estas medidas se toman del prototipo construido. La tabla 7.2-1 muestra estos resultados:

	<u>Expectativa de diseño:</u>	<u>Medida del prototipo construido:</u>
Largo:	≤ 1 metro	0.88 metros
Ancho:	≤ 0.8 metros	0.75 metros
Altura:	≤ 0.65 metros	0.52 metros
Peso:	≤ 80 kilogramos	78.5 kg

TABLA 7.2-1: Expectativas y resultados de Dimensiones y Peso

Como se ve en la tabla 7.2-1, las expectativas en cuanto a dimensiones y peso del prototipo de plataforma autónoma fueron cumplidas. Se tiene una diferencia considerable en cuanto a las dimensiones, lo cual es favorable ya que ayuda a que la plataforma sea fácil de transportar y manipular (como se mencionó en la sección 3.1.1, “Dimensiones y peso”).

La diferencia entre el peso esperado y el de la plataforma es únicamente de 1.5 kg. Sin embargo, éste se mantiene bajo el peso máximo deseado.

ROBUSTEZ Y EXPLORACIÓN EN TERRENOS IRREGULARES

El vehículo autónomo fue diseñado para recorrer terrenos irregulares, sin cambios de aceleración tan bruscos como al bajar o subir un escalón, como en una de las pruebas diseñadas. Esta prueba es un caso extremo de irregularidad en el terreno, al que la plataforma no estará sometida en condiciones normales. El hecho de que la plataforma haya podido superar esta prueba denota que el diseño es suficientemente robusto para la aplicación esperada.

La prueba de subir y bajar un escalón de 7.5 cm demuestra también que el diámetro de las llantas y la altura que separa al chasis del piso son suficientemente

grandes para recorrer terrenos irregulares y con obstáculos pequeños, como se estableció en los requisitos iniciales del diseño.

Como prueba de desempeño del diseño mecánico se estableció también que la plataforma debía operar por al menos 10 horas sin necesitar de ajustes o mantenimiento, a más de cargar las baterías. Estas 10 horas de uso incluyeron las pruebas de robustez y exploración en terrenos irregulares, entre ellas la de subir y bajar un escalón, lo que incrementa la severidad de la prueba.

Una última prueba de desempeño mecánico fue la de recorrer una pendiente con una inclinación mayor a 20°. Esta prueba se superó sin contratiempos gracias a la potencia de los motores y la correcta ubicación del centro de gravedad en la plataforma.

TIEMPO MINIMO DE OPERACION CONTINUA Y VELOCIDADES ESPERADAS

Se realizaron pruebas del tiempo mínimo de operación continua en las modalidades de radiocontrol y autónoma, donde estos tiempos fueron de 53 minutos y 49 minutos, respectivamente.

La prueba realizada en la modalidad autónoma consistió en programar a la plataforma para que ésta avance en línea recta a una velocidad promedio de 1.1 m/s y realice paros cada 10 segundos. Al cabo de una distancia de 100 metros la plataforma daba un giro de 180° y recorría 100 metros en sentido contrario. Esta operación se repitió continuamente. Esta prueba simula la operación en la modalidad autónoma, donde se tienen picos de consumo eléctrico cada vez que los motores arrancan.

La duración total de la prueba (incluyendo el tiempo en que la plataforma estaba parada) fue de 65 minutos. En este tiempo la plataforma robótica recorrió una distancia de 3240 metros, de donde se estima un tiempo de recorrido de 49 minutos (descartando los intervalos en que la plataforma estaba estática). Al cabo de este tiempo las baterías estaban descargadas.

La distancia recorrida satisface los requisitos iniciales de tiempo mínimo de operación continua y velocidades esperadas.

DISEÑO MODULAR

Siempre fue un requisito primordial el obtener un diseño modular del sistema de transmisión. Como se mencionó anteriormente, el alcance de este proyecto contempla únicamente el diseño y construcción de un sistema y configuración para las ruedas. Sin embargo, tener un diseño modular permite el desarrollo de otros sistemas de transmisión fácilmente intercambiables, los cuales podrían requerirse en aplicaciones futuras de la plataforma autónoma.

VERSATILIDAD EN CUANTO A SENSORES Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Se probó que se puede hacer que tres sensores (dispositivo GPS, brújula electrónica y sensor de ultrasonido) interactúen de manera simultánea con el controlador de la modalidad autónoma, que en este caso es una computadora portátil. Al mismo tiempo la computadora envía información al controlador de los motores para que la plataforma se mueva.

Además de estos sensores, la instalación de un hub USB permite conectar dos sensores más a la computadora portátil.

Se cuenta también con la cámara que transmite video de manera inalámbrica. A pesar de que este sensor no intercambia información con la computadora portátil, es otro componente que opera de manera simultánea con los demás.

CAPACIDADES DE NAVEGACIÓN: FUNCIONAMIENTO CON RADIO CONTROL Y AUTÓNOMO

Los resultados tanto en la modalidad de radiocontrol, como en la modalidad autónoma fueron satisfactorios.

Se comprobó que el switch de cambio de modalidad puede ser operado con el control remoto, a una distancia mayor a 1 km, como se estableció en uno de los requisitos iniciales.

La prueba de maniobrabilidad demuestra que una operación eficiente en la modalidad de radiocontrol puede darse sin necesidad de contacto visual directo con la plataforma, sino únicamente con la guía de las imágenes transmitidas de manera inalámbrica. Se constató también que se puede operar de esta manera a una distancia mínima de 1 km.

Respecto a la modalidad autónoma, el requisito inicial fue que la plataforma llegue a un área circular de 6 metros a la redonda de cada punto objetivo. En las pruebas realizadas se llegó a un área aproximada de 12 metros a la redonda de cada punto. Se determinó que esta diferencia se debe únicamente a falta de precisión por parte del dispositivo GPS utilizado. Sin embargo, un desfase de 12 metros respecto

al punto de llegada no es crítico en este prototipo inicial, ya este desfase es problema únicamente del dispositivo GPS y se demuestra un funcionamiento global correcto.

A manera de ejemplo, si se le asigna a la plataforma un punto objetivo a 500 metros de distancia del punto inicial, 12 metros de desfase respecto al punto de llegada representan únicamente un error de 2.4%. Para una distancia recorrida de 1000 metros, el error sería de 1.2%, ya que la magnitud del error (12 metros) se mantiene constante sin importar la distancia que la plataforma recorra.

Con el objetivo de mejorar la precisión del dispositivo GPS se implementó un algoritmo mediante el cual la plataforma recibe 20 datos del dispositivo GPS en un punto fijo, calcula un promedio de los datos tomados y corrige su trayectoria. Esta secuencia se repite constantemente.

También se evalúa la calidad de los datos adquiridos y se descartan si no son adecuados. Gracias a este procesamiento de la información recibida se obtuvo la precisión de 12 metros antes mencionada.

La secuencia de acciones realizadas en la modalidad autónoma también cumple con las expectativas iniciales. Se pueden asignar múltiples puntos objetivo a la plataforma y al entrar al área de llegada para cada punto objetivo, se realiza un giro completo, lo que permite obtener una imagen de 360° del punto de llegada. Después de pasar por todos los puntos objetivo, la plataforma vuelve al punto inicial.

CAPITULO 8: CONCLUSIONES

Se obtuvieron conclusiones generales respecto a los diferentes temas tratados dentro de este proyecto:

-Respecto al sistema de dirección del vehículo, se observó que la estructura elegida de skid steer es adecuada para el prototipo desarrollado. A pesar de que la fricción es considerablemente mayor en esta configuración, la maniobrabilidad del vehículo es óptima, permitiendo realizar giros prácticamente sobre un eje vertical. Esto permite también a la cámara de la plataforma obtener una imagen de 360° alrededor de un punto fijo, como se hace en la modalidad autónoma.

-El diseño y la construcción de la estructura mecánica son procesos iterativos que requieren retroalimentación continua el uno del otro. El desarrollo del vehículo comenzó con un diseño en computadora. Una vez finalizado este diseño, se debió verificar que su construcción fuera posible, debido a limitantes en la obtención de materiales, procesos de manufactura y componentes disponibles en el mercado. Si algún componente diseñado no podía ser adquirido o manufacturado, se debían replantear ciertos aspectos del diseño.

El prototipo expuesto en este escrito es el resultado final de dicho proceso iterativo, luego de un sinnúmero de cambios y modificaciones tanto en el diseño en computadora como en el prototipo construido, para que el uno corresponda al otro.

Para facilitar este proceso es importante el uso de un software de diseño paramétrico, como el utilizado aquí, ya que permite cambios rápidos y sin necesidad de rediseñar el proyecto completo.

Es importante también tener presentes los procesos de manufactura y ensamblaje implicados, al momento de hacer un diseño.

-Se demostró que el funcionamiento e interacción simultánea de diferentes sensores y componentes electrónicos es posible en una modalidad de operación autónoma. Esto abre paso a posibles aplicaciones futuras en los campos de exploración e investigación para el prototipo desarrollado aquí.

-La implementación de dos modalidades de operación, radiocontrol y autónoma, representa varias ventajas para el prototipo desarrollado. Por una parte, el modo de radiocontrol funciona como modalidad auxiliar en caso de que se encuentre alguna dificultad que no pueda ser resuelta en el modo autónomo, como obstáculos en el camino. A pesar de ser la modalidad autónoma el modo principal de operación, podrían también realizarse funciones de exploración e investigación en la modalidad de radiocontrol, dado que se puede controlar a la plataforma en base a las imágenes transmitidas por la cámara de video inalámbrica.

-El funcionamiento en la modalidad autónoma es adecuado, a pesar de que la precisión respecto al punto de llegada disminuyó en comparación al planteamiento inicial. Esto no representa un inconveniente en el alcance del proyecto, ya que una vez demostrado un funcionamiento correcto, es posible implementar un GPS más sofisticado con el programa ya desarrollado para la modalidad autónoma.

La implementación de un dispositivo GPS más preciso permitirá un funcionamiento más rápido de la plataforma, ya que no se necesitará tomar múltiples medidas y realizar un promedio para compensar por la falta de precisión, como es el caso con el dispositivo actual.

De esto se puede concluir que el dispositivo GPS fue uno de los mayores limitantes en este proyecto.

Como conclusiones específicas se tienen las referentes a los objetivos y requisitos impuestos inicialmente para el prototipo construido. Se plantearon requisitos en los siguientes aspectos:

-Dimensiones y peso

-Robustez y exploración en terrenos irregulares

-Tiempo mínimo de operación continua

-Velocidades esperadas

-Diseño modular

-Versatilidad en cuanto a sensores y componentes electrónicos

-Capacidades de navegación: funcionamiento con radio control y autónomo

Se diseñaron pruebas específicas para evaluar todos estos aspectos y, como se demostró en la sección de resultados, los objetivos se cumplieron de manera satisfactoria.

Como conclusión final, se debe recordar que la plataforma aquí desarrollada es únicamente un prototipo inicial, cuyo objetivo es dar una base para el diseño y construcción de un vehículo autónomo con aplicaciones en los campos de la exploración e investigación. Una vez establecida esta base, se espera que el desarrollo del proyecto continúe, con nuevas aplicaciones e implementaciones.

CAPITULO 9: RECOMENDACIONES

Dado que el vehículo autónomo construido es un prototipo inicial, cuyo desarrollo debe continuar, es importante tener recomendaciones que puedan servir en este proceso. Se tienen recomendaciones respecto al prototipo construido y respecto a implementaciones futuras. Estas se listan a continuación:

RECOMENDACIONES PARA EL PROTOTIPO CONSTRUIDO

-Para poder operar la plataforma construida y realizar futuras reparaciones o ajustes, es importante entender la estructura mecánica a cabalidad. El capítulo 5 de este documento se enfoca en este tema. Se tienen además planos de las piezas manufacturadas en la sección de apéndices y el archivo digital del diseño de la plataforma, realizado en el software Autodesk Inventor, en el CD adjunto.

-Uno de los elementos críticos del diseño mecánico son las bandas dentadas. En caso de desmontar estos elementos para algún ajuste o mantenimiento, se debe ser cuidadoso al momento de volverlas a instalar. La tensión en las bandas es importante, ya que una tensión insuficiente provoca que éstas se deslicen, ocasionando desgaste innecesario en éstas y operación defectuosa en el vehículo. Un ajuste excesivo también provoca desgaste acelerado.

Las bandas deben tensarse hasta el punto en que éstas no deslicen al aplicar un torque elevado a los motores (como al arrancar en una pendiente o al girar sobre un eje vertical). Se debe ser cuidadoso de no tensar las bandas de manera excesiva.

De igual manera, se debe prestar atención a la correcta alineación de los ejes que soportan las bandas.

-Otro elemento con el que se debe ser cuidadoso al momento de desmontar y volver a ensamblar son las llantas. Estas giran con sus ejes únicamente debido a la fricción producida por el ajuste de las tuercas en éstos. Se debe verificar que este ajuste sea suficiente para que las llantas no se deslicen respecto al eje.

-El fabricante de la brújula electrónica indica que ésta debe ser calibrada una única vez antes de ser utilizada. Sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto este instrumentó se descalibró (no se pudo determinar el motivo) y arrojaba datos notablemente erróneos. Se recomienda revisar el correcto funcionamiento de este instrumento periódicamente y recalibrarlo en caso de ser necesario. Un archivo de LabVIEW para la calibración de este instrumento se encuentra en el CD anexo. Instrucciones para la calibración en la página web <http://www.robot-electronics.co.uk/html/cmeps3tech.htm>.

-Respecto a la modalidad autónoma, se debe recordar que el programa implementado hace que la computadora tome múltiples medidas (20 medidas en el estado actual del programa) del GPS para obtener un promedio. También se evalúa la calidad de éstas mediciones y se descartan si no son adecuadas. Un motivo común por el cual la secuencia autónoma parece detenerse es debido a la adquisición de datos de mala calidad. En este caso el GPS continúa esperando datos

de mejor calidad antes de obtener un promedio. La medida de la calidad de los datos se expresa con el parámetro "Horizontal Dilusion" dentro del programa. Se puede cambiar la configuración para aceptar datos de menor calidad, pero esto no es recomendable.

RECOMENDACIONES PARA IMPLEMENTACIONES FUTURAS:

Recomendaciones con respecto a implementaciones futuras y posibles maneras de mejorar el prototipo construido se tienen a continuación:

-La manera en la que se sujeta la tapa del chasis a éste es eficiente pero poco práctica, sobre todo debido a que dicha tapa debe desmontarse para cargar las baterías que alimentan los motores. Se podría implementar otro sistema para sujetar la tapa al chasis o bien idear un sistema para cargar las baterías sin necesidad de desmontar la tapa del chasis.

-Una implementación a considerar es la de diseñar un sistema de transmisión que acople las llantas a los ejes por medio de un componente mecánico, como un disco que se acople a los ejes y a las ruedas de manera rígida, más no dependiendo únicamente de fricción.

-Además de las baterías que alimentan los motores, se cuenta con baterías adicionales para algunos de los componentes electrónicos. El tener una batería

“centralizada” para todos los componentes electrónicos evitaría el tener que recargar diferentes baterías después de cada uso, facilitando este proceso.

-La limitación en cuanto a la distancia que la plataforma puede recorrer está impuesta por la capacidad de las baterías y el alcance de la comunicación entre emisor-receptor de la modalidad de radiocontrol y de la cámara de video. Si se deseara aumentar esta distancia para aplicaciones futuras, se deberá adquirir baterías de mayor capacidad, al mismo tiempo que adquirir equipos de radiofrecuencia de mayor alcance.

-La programación implementada en el prototipo construido contempla navegación en espacios abiertos y sin obstáculos. Algoritmos de programación más complejos podrían ser implementados para mejorar el funcionamiento del robot, por ejemplo, para detección y evasión de obstáculos.

-La calidad de los datos arrojados por la brújula electrónica puede verse afectada si este componente está inclinado. Existen brújulas electrónicas con compensación para estas ocasiones (“tilt compensated”). Se recomienda la adquisición de uno de estos sensores. Una alternativa a esto es adquirir un dispositivo GPS con brújula incorporada.

-Una recomendación de suma importancia es adquirir un dispositivo GPS de mejor calidad que el utilizado. Debido a la mala calidad del dispositivo empleado se debió

implementar algoritmos para la toma de múltiples datos y adquisición de promedios en puntos fijos. Esto obliga al vehículo a detenerse constantemente en la modalidad de funcionamiento autónomo. Un dispositivo GPS de mejor calidad permitiría implementar múltiples mejoras, empezando por una operación más rápida en el modo autónomo.

-Se recomienda la implementación de diferentes sensores para enfocar este proyecto a campos de investigación y exploración. A manera de ejemplo, sensores de detección de gases y termocuplas serían útiles para el caso de investigación vulcanológica mencionado anteriormente.

BIBLIOGRAFIA:

Kozłowski, Krzysztof. "Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot". Poznan University of Technology. 2004. En línea. Internet. 3 junio 2010.

Sandin, Paul E. Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated. Estados Unidos: Mc Graw-Hill, 2003.

Siegwart, Roland y Nourbakhsh, Illah R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

McComb, Gordon. The robot builder's bonanza. Estados Unidos: Mc Graw-Hill, 2001.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Androide>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Rob%C3%B3tica>

http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge

http://es.wikipedia.org/wiki/Defense_Advanced_Research_Projects_Agency

<http://www.darpa.mil/>

http://www.roboteq.com/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=79

<http://www.japatoyo.com/en/2004816103344337.pdf>

<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=en&imperial=false&windowName=null&perfid=105001&prodid=1050016003>

<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=en&imperial=false&windowName=null&perfid=105001&prodid=1050010304>

<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=en&imperial=false&windowName=null&perfid=105002&prodid=1050026006>

<http://www.mitecnologico.com/Main/ModularidadObjetos>

<http://npcrobotics.com/products/viewprod.asp?prod=42&cat=20&mode=gfx>

http://www.roboteq.com/files_n_images/files/datasheets/ax2550datasheet.pdf

<http://www.japatoyo.com/en/2004816103344337.pdf>

http://www.robot-electronics.co.uk/htm/usb_i2c_tech.htm

http://www.gopass.com.tw/Product/GPT810_GPS_datalogger.htm

<http://www.wirelessvideocameras.net/product/I5/380---380-Line-Color-CCD-Camera--Audio.html>

<http://www.wirelessvideocameras.net/product/AIRBORNE1-WATT58G/58GHz-1-WATT-Color-Airborne-Video-Virtual-Reality-Glasses-Combo.html>

<http://www.hobbyengineering.com/specs/devantech-cmps03-tech.pdf>

<http://www.ef-uk.net/data/rc-switch.htm>

ANEXO 1

Este anexo presenta hojas de información y especificaciones técnicas de los diferentes componentes eléctricos de potencia y componentes electrónicos utilizados. Se tienen especificaciones de los siguientes componentes:

-Motores

-Controlador de motores

-Baterías

- Adaptador I2C-USB utilizado con la brújula

-Dispositivo GPS

-Cámara video

-Transmisor y receptor de video

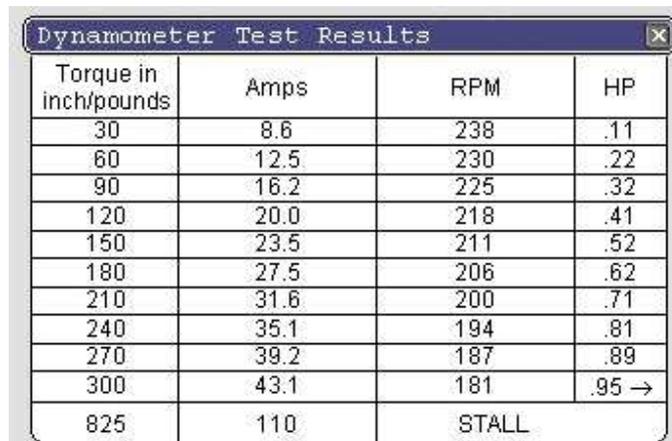
-Brújula

-Circuitos switch RC/RS232

ANEXO 1A

Especificaciones de Motor NPC-T64

Type	Permanent Magnet Reversible, center timed
Voltage	24 V
RPM	230 RPM
Gear Ratio	20:1
Mass	5.9 Kg
Controlador sugerido por fabricante	NPC-AX2550



Dynamometer Test Results

Torque in inch/pounds	Amps	RPM	HP
30	8.6	238	.11
60	12.5	230	.22
90	16.2	225	.32
120	20.0	218	.41
150	23.5	211	.52
180	27.5	206	.62
210	31.6	200	.71
240	35.1	194	.81
270	39.2	187	.89
300	43.1	181	.95 →
825	110	STALL	

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

<http://npcrobotics.com/products/viewprod.asp?prod=42&cat=20&mode=gfx>

ANEXO 1B

Especificaciones del Controlador ROBOTEQ AX2850 HE

Technical Features

Microcomputer-based Digital Design

- Multiple operating modes
- Fully programmable using either built-in switches and 7 segment LED display or through connection to a PC
- Non-volatile storage of user configurable settings. No jumpers needed
- Simple operation
- Software upgradable with new features

Multiple Command Modes

- Serial port (RS-232) input
- Radio-Control Pulse-Width input
- 0-5V Analog Voltage input

Multiple Motor Control modes

- Independent channel operation
- Mixed control (sum and differential for tank-like steering)
- Open Loop or Closed Loop Speed mode
- Position control mode for building high power position servos
- Modes can be set independently for each channel

Optical Encoder Inputs (AX2850)

- Two Quadrature Optical Encoders inputs
- 250kHz max. frequency per channel
- 32-bit up-down counters
- Inputs may be shared with four optional limit switches

Automatic Command Corrections

- Joystick min, max and center calibration
- Selectable deadband width
- Selectable exponentiation factors for each command inputs
- 3rd R/C channel input for accessory output activation

Special Function Inputs/Outputs

- 2 Analog inputs. Used as
 - Tachometer inputs for closed loop speed control

- Potentiometer input for position (servo mode)
- External temperature sensor inputs
- User defined purpose (RS232 mode only)
- One Switch input configurable as
 - Emergency stop command
 - Reversing commands when running vehicle inverted
- Up to 2 general purpose outputs for accessories or weapon
 - One 24V, 2A output
 - One low-level digital output
- Up to 2 digital input signals

Built-in Sensors

- Voltage sensor for monitoring the main 12 to 40V battery
- Voltage monitoring of internal 12V
- Temperature sensors near each Power Transistor bridge

Advanced Data Logging Capabilities

- 12 internal parameters, including battery voltage, captured R/C command, temperature and Amps accessible via RS232 port
- Data may be logged in a PC or microcomputer
- Data Logging Software supplied for PC

Low Power Consumption

- On board DC/DC converter for single 12 to 40V battery system operation
- Optional 12V backup power input for powering safely the controller if the main motor batteries are discharged
- 200mA at 12V or 100mA at 24V idle current consumption
- Power Control wire for turning On or Off the controller from external microcomputer or switch
- No consumption by output stage when motors stopped
- Regulated 5V output for powering R/C radio. Eliminates the need for separate R/C battery.

High Efficiency Motor Power Outputs

- Two independent power output stages
- Dual H bridge for full forward/reverse operation
- Ultra-efficient 2.5 mOhm (1.25mOhm HE version) ON resistance MOSFETs
- Four quadrant operation. Supports regeneration
- 12 to 40 V operation
- User programmable current limit up to 140A depending on controller version and heatsink arrangement
- Standard Fast-on connectors for power supply and motors
- 16 kHz Pulse Width Modulation (PWM) output
- Aluminum heat sink. Optional conduction cooling plate

Advanced Safety Features

- Safe power on mode
- Optical isolation on R/C control inputs
- Automatic Power stage off in case of electrically or software induced program failure
- Overvoltage and Undervoltage protection
- Watchdog for automatic motor shutdown in case of command loss (R/C and RS232 modes)
- Large and bright run/failure diagnostics on 7 segment LED display
- Programmable motors acceleration
- Built-in controller overheat sensors
- "Dead-man" switch input
- Emergency Stop input signal and button

Compact Design

- All-in-one design. Built from aluminum heat sink extrusion with mount brackets
- Efficient heat sinking. Operates without a fan in most applications.
- 9" (228.5mm) L, 5.5" W (140mm), 1.8" (40mm) H
- -20o to +70o C (-40 to +85o C, HE version) operating environment
- 3 lbs (1,350g)

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

http://www.roboteq.com/files_n_images/files/datasheets/ax2550datasheet.pdf

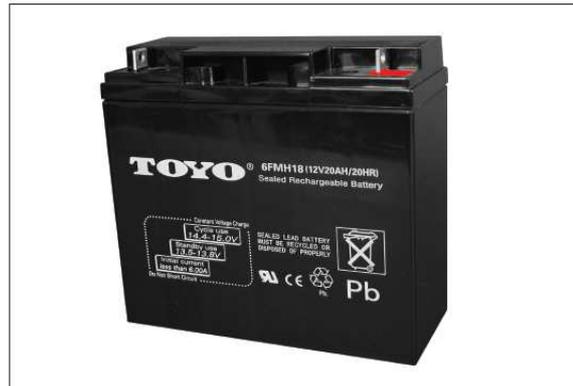
ANEXO 1C

Especificaciones de Batería TOYO 6FMH18

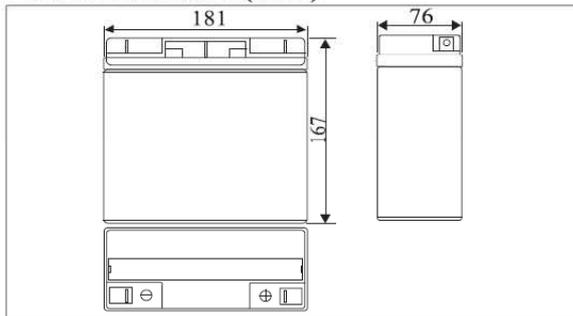
6FMH18 (12V20AH)

• Specifications

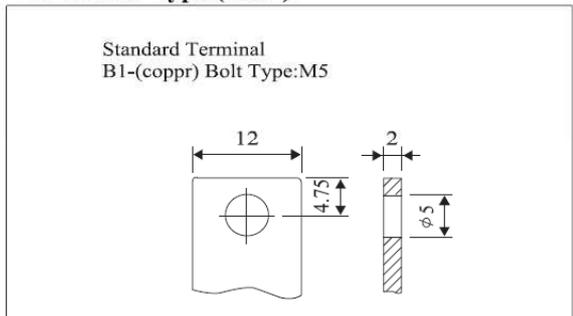
Nominal Voltage		12V
Nominal Capacity (20HR)		20AH
Dimension	Length	181±1mm (7.13 inches)
	Width	76±1mm (2.99 inches)
	Container Height	167±2mm (6.57 inches)
	Total Height	167±2mm (6.57 inches)
Weight		Approx 6.40Kg (14.08 lbs)
Standard Terminal		B1-Bolt and nuts terminal



• Outer Dimensions (mm)



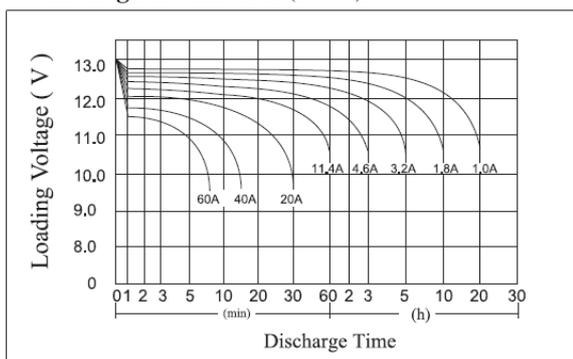
• Terminal Type (mm)



• Characteristics

Capacity	20 hour rate (1.00A)	20.0Ah
	10 hour rate (1.8A)	18.1Ah
	5 hour rate (3.2A)	16.2Ah
	1 hour rate (11.4A)	11.4Ah
Capacity affected by temperature	40 °C (104°F)	105%
	25 °C (77°F)	100%
	0 °C (32°F)	85%
Internal Resistance		Fully charged battery (25°C, 77°F) 12mΩ
Constant-Voltage Charge	Cycle	Initial Charging Current less than 6.0A Voltage 14.4~15.0V at 25°C (77°F) Temperature Coefficient -30mV/°C
	Stand by	No limit on Initial Charging Current Voltage 13.5~13.8V at 25°C (77°F) Temperature Coefficient -20mV/°C

• Discharge curves 25°C (77°F)



Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

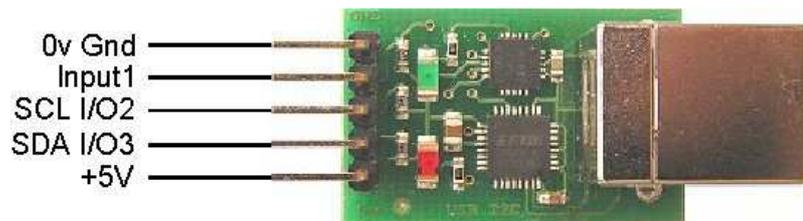
<http://www.japatoyo.com/en/2004816103344337.pdf>

ANEXO 1D

Especificaciones de adaptador Devantech USB-I2C module

I2C Devices	Any registered or unregistered I2C device.
Host support	Drivers available for Windows XP64, XP, 2000, ME, 98, CE.NET V4.2, Linux, Mac OS8, OS9, OSX.
Voltage	Self powered - 5V available
Current	Up to 70mA available for your own circuits
On-board Pull-up resistors	4.7k
Digital I/O	1 Input and 2 I/O available when not using I2C.
Analog Input	2 10-bit channels available when not using I2C
I2C clock rate	100 kbps

Asignación de pines:



Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

http://www.robot-electronics.co.uk/html/usb_i2c_tech.htm

ANEXO 1E

Especificaciones de GPS GPT-810

Specifications	
General	
Frequency	L1, 1575.42MHz
Channels	51 CH for tracking
DGPS	WAAS, EGNOS, MSAS
Datum	WGS84
Acquisition	
Cold Start	36 sec, average
Warm Start	33 sec, average
Reacquisition	<1sec
Accuracy (none DGPS)	
Position	Without aid: 3.0m 2D-RMS <3m CEP(50%) without SA (horizontal)
Velocity	0.1 m/sec without SA
Time	50 ns RMS
Protocol	
GPS Output	NMEA-0183 (V3.01) GGA, GSA, GSV, RMC (default)
	GLL, VTG (optional)
	Data bit : 8, stop bit : 1(Default)
Interface	
Bluetooth	Version 1.2 compliant
Output Power	Class 2 (10 meter in free space)
Frequency	2.4 to 2.48 GHz
Power	
Battery	Rechargeable 750mAh Lithium battery
Work Hours	18 hrs
DC Input	5V
Physical	
Dimension	93.5 x 46 x 10.8mm
Weight	49.5g
Others	
LED	Bluetooth, Navigation, Battery / changer status

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

http://www.gopass.com.tw/Product/GPT810_GPS_datalogger.htm

ANEXO 1F

Especificaciones de cámara de video "Color CCD Airborne Camera with audio"

Imager:	Color CCD
Sensor Format:	1/4" Sony
Video Format:	NTSC
Resolution:	380 TV Lines
Scanning System	2:1 Interlace (NTSC)
Neutral Density Filter:	210
Lens:	3.6mm f/2.0, 90 degree FOV
Video Output:	1 Vp-p, 75 Ohms
Electronic Shutter Speed:	1/60 to 1/100,000 sec
Supply Voltage:	12VDC
Power Consumption Max:	100 mA
Chip Set:	Sony
S/N Ratio:	Greater than 50dB
Audio	Yes
Sync System:	Internal Sync
Weight:	1.5 oz
Size	36mm (W) x 36mm (H) x 33mm (D)
Cable Length - Standard	4 feet

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

<http://www.wirelessvideocameras.net/product/15/380---380-Line-Color-CCD-Camera--Audio.html>

ANEXO 1G

Especificaciones de Transmisor y receptor de video "5.8GHz Airborne Video Downlink "

	TRANSMISOR	RECEPTOR
rango:	1 milla (1600metros)	1 milla (1600metros)
frecuencia:	5.8GHz	5.8GHz
voltaje:	12V	12V
consumo de energía:	250mA	350mA
tamaño:	63.5 x 76.2 x 25.4mm	56 x 44 x 15mm
peso:	113 gramos	-

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

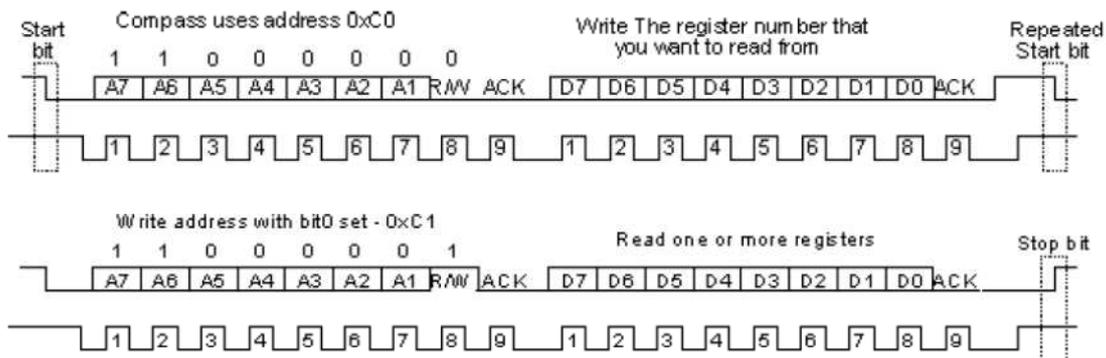
<http://www.wirelessvideocameras.net/product/AIRBORNE1-WATT58G/58GHz-1-WATT-Color-Airborne-Video-Virtual-Reality-Glasses-Combo.html>

ANEXO 1H

Especificaciones de brújula electrónica “CMP S03 Magnetic Compass”

Voltage	5V
Current	25 mA Typ.
Resolution	0.1 Degree
Accuracy	3-4 degrees approx. After calibration
Output 1	Timing Pulse 1mS to 37mS in 0.1mS increments
Output 2	I2C Interface, SMBUS compatible, 0-255 and 0-3599 , SCL speed up to 1MHz
Size	32mm x 35mm
Communication Protocol	I2C

Communication Protocol I2C



Bit Registers

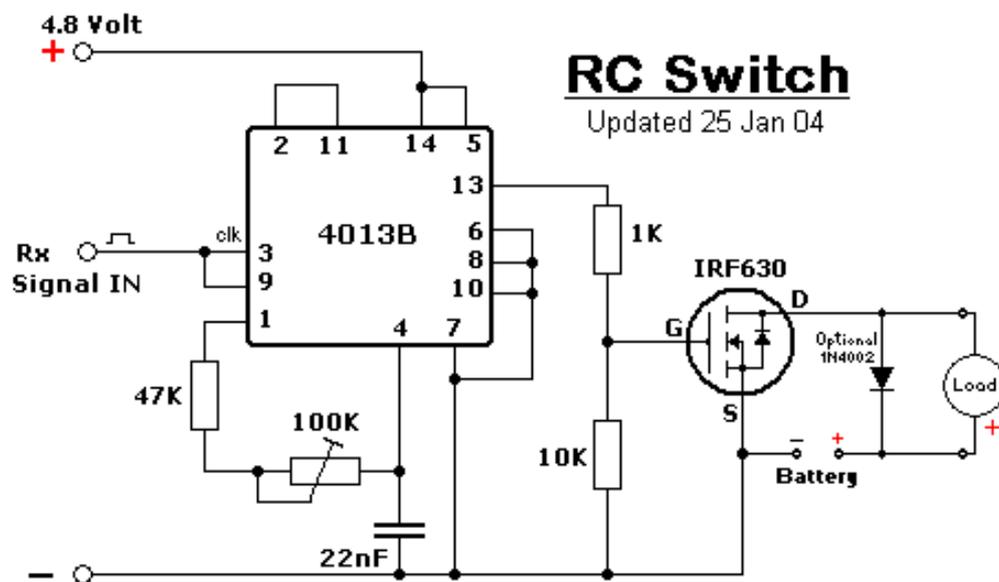
Register	Function
0	Software Revision Number
1	Compass Bearing as a byte, i.e. 0-255 for a full circle
2,3	Compass Bearing as a word, i.e. 0-3599 for a full circle, representing 0-359.9 degrees.
4,5	Internal Test - Sensor1 difference signal - 16 bit signed word
6,7	Internal Test - Sensor2 difference signal - 16 bit signed word
8,9	Internal Test - Calibration value 1 - 16 bit signed word
10,11	Internal Test - Calibration value 2 - 16 bit signed word
12	Unused - Read as Zero
13	Unused - Read as Zero
14	Unused - Read as Undefined
15	Calibrate Command - Write 255 to perform calibration step. See text.

Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

<http://www.hobbyengineering.com/specs/devantech-cmps03-tech.pdf>

ANEXO 11

Circuito de switch activado por radio control



Para mayor información, ingresar a la dirección electrónica:

<http://www.ef-uk.net/data/rc-switch.htm>

ANEXO 2

Aquí se presentan planos de los diferentes componentes y piezas mecánicas que se debieron manufacturar:

-Chasis	(CODIGO: CE-Chs)
-Eje Interior	(CODIGO: CE-EjInt)
-Soporte de eje interior	(CODIGO: CE-Spr-EjInt)
-Tapa del chasis	(CODIGO: CE-Tp)
-Base de componentes electrónicos	(CODIGO: CE-Bs)
-Tapa de base de componentes electrónicos	(CODIGO: CE-Bs-Tp)
-Base de parrilla	(CODIGO: CE-Bs-Prr)
-Estructura de tubos de parrilla	(CODIGO: CE-Estr-Prr)
-Eje exterior	(CODIGO: TR-EjExt)
-Eje de ruedas	(CODIGO: TR-EjRd)
-Soporte de ejes de ruedas	(CODIGO: TR-Spr-EjRd)
-Buje de rodamiento d35mm	(CODIGO: TR-Bj-Rdm-30)

- Buje de rodamiento d17mm (CODIGO: TR-Bj-Rdm-17)
- Separador de acero (CODIGO: TR-SprAc)
- Separador de módulos (CODIGO: TR-Spr-Mdl)

CD ANEXO:

1.- Diseño en Autodesk Inventor Professional 2009

(carpeta con archivos necesarios para visualizar el modelo ensamblado)

2.- Programa en LabVIEW versión 7.1:

Carpeta con instrumento virtual principal y sub instrumentos virtuales

Archivo para calibración de brújula electrónica

Archivo para visualización de video transmitido por la cámara inalámbrica

3.- Videos de pruebas Realizadas

4.- Hoja de datos y especificaciones NMEA

5.- Archivo digital de Redacción de Proyecto de Tesis