



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

AUTOR: MARJAN HAJ MOHAMMAD ALI HIDALGO

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL
EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS**

DIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO

CODIRECTOR: ING. XAVIER SEGOVIA

SANGOLQUÍ, ENERO 2014

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS”** fue realizado en su totalidad por la Señora Marjan Haj Mohammad Ali Hidalgo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.

Ing. Fernando Olmedo
DIRECTOR

Ing. Xavier Segovia
CODIRECTOR

Sangolquí, 2014-01-20

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS”

ELABORADO POR:

Marjan
Haj Mohammad Ali Hidalgo

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Ing. Luis Echeverría
DIRECTOR DE CARRERA

Sangolquí, 2014-01-20

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD****MARJAN HAJ MOHAMMAD ALI HIDALGO****DECLARO QUE:**

El proyecto de grado denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Marjan Haj Mohammad Ali Hidalgo.

Sangolquí, 2014-01-20

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo: Marjan Haj Mohammad Ali Hidalgo

Autorizo a Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS”**, cuyo contenido, idea y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Marjan
Haj Mohammad Ali Hidalgo

Sangolquí, 2014-01-20

DEDICATORIA

Este proyecto de grado, es dedicado a mí Madre, la persona que siempre ha estado a mi lado apoyándome en todas mis decisiones y sacrificando sus propios sueños para que yo pueda cumplir con los míos, a mí esposo que es la fuerza que me ha empujado hacia adelante demostrándome que el amor y la constancia supera cualquier obstáculo y a mí hija que ha sido el regalo más apreciado de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, que por la fuerza que me ha dado, he logrado llegar hasta aquí y me ha dado el milagro más hermoso que es mi hija.

A mi madre, que además de ser madre ha sido mi mejor amiga, la persona que durante toda mi carrera me ha apoyado y me ha dado los mejores consejos.

A mi esposo, que su amor me da fortaleza y su confianza en mí, es la fuerza que me ha hecho ver que los problemas y los obstáculos ante mis capacidades son pequeños.

A mi abuelito, porque los angelitos nunca me han dejado sola, y sus sabias palabras y consejos me han guiado siempre por el mejor camino.

A toda mi familia, que siempre me han brindado su ayuda en los momentos difíciles que se me han presentado.

Y a mis amigos que me han demostrado el valor de la amistad y me enseñaron que la universidad no es solamente estudiar y ser profesional, sino que es vivir y compartir todas las buenas y malas experiencias de nuestra vida personal.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3. ANTECEDENTES.....	1
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.5. ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.6. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
CAPÍTULO II	6
2.1. ROBOT MÓVIL.....	6
2.2. SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN.....	9
2.2.1. GRADOS DE LIBERTAD.....	10
2.2.2. LIMITACIONES CINEMÁTICAS.....	11
2.2.3. CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN	13
2.3. TIPOS DE LOCOMOCIÓN	13
2.3.1. TIPOS DE LOCOMOCIÓN CON RUEDAS.....	17
2.3.2. CONFIGURACIONES ROBOT MÓVIL CON RUEDA.....	19
2.3.3. CONFIGURACIÓN TRICICLO	19
2.3.4. CONFIGURACIÓN DIFERENCIAL.....	20
2.3.5. CONFIGURACIÓN ACKERMAN.....	21
2.3.6. CONFIGURACIÓN SINCRONIZADA.....	22
2.3.7. CONFIGURACIÓN OMNIDIRECCIONAL.....	23
2.4. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.....	23
2.5. VELOCIDADES ANGULARES.....	25
CAPÍTULO III	27
3.1. DISEÑO DE SISTEMA DE LOCOMOCIÓN.....	27
3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN	28
3.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	37

3.4.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	42
3.4.1.	POSICIÓN EN MOVIMIENTO EN SUPERFICIE RECTO	46
3.4.2.	POSICIÓN EN MOVIMIENTO EN SUPERFICIE IRREGULAR	46
3.5.	ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO.....	49
3.5.1.	ANÁLISIS DE ESFUERZOS	51
3.5.2.	ANÁLISIS DE TORQUE.....	56
3.6.	SÍNTESIS DEL MECANISMO	63
3.7.	MODELAMIENTO DEL SISTEMA MULTICUERPO EN SOFTWARE COMERCIAL	64
CAPÍTULO IV	68
4.1.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	68
4.2.	SENSORES Y ACTUADORES.....	69
4.2.1.	SENSORES.....	69
4.2.2.	ANÁLISIS PARA SELECCIÓN DE LOS SENSORES	69
4.2.3.	ACTUADORES	71
4.3.	DISEÑO ELECTRÓNICO Y COMUNICACIÓN	73
4.3.1.	DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.....	73
4.3.2.	DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO	77
4.3.3.	DISEÑO DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO	81
4.3.4.	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE POTENCIA	84
4.3.5.	DISEÑO DEL CIRCUITO DEL CONTROL DEL ROBOT MÓVIL	87
4.4.	CONTROL.....	91
4.4.1.	DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL CONTROLADOR	91
4.4.2.	DIAGRAMA ACCIONES – RELACIONES DEL SISTEMA DE CONTROL DE LOCOMOCIÓN.....	93
4.4.3.	DIAGRAMA GRAFCET DE LA LÓGICA DE CONTROL.....	95
CAPÍTULO V	97
5.1.	CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA	97
5.2.	CONSTRUCCIÓN DE LAS PARTES INTERNAS DE LA ESTRUCTURA.....	99
5.3.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS	112
CAPÍTULO VI	121
6.1.	PRUEBA DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO	121
6.2.	RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO	122

6.3.	PRUEBAS A LOS SENSORES INFRARROJOS Y SERVOMOTORES.....	123
6.4.	RESULTADO DE LAS PRUEBAS A LOS SENSORES INFRARROJOS Y SERVOMOTORES	124
6.5.	PRUEBA DEL CIRCUITO Y ARRANQUE DE MOTORES DC.....	125
6.6.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ARRANQUE DE MOTORES DC.....	127
6.7.	PRUEBA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL ROBOT MÓVIL	128
6.8.	RESULTADO DE LA PRUEBA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL ROBOT MÓVIL....	129
6.9.	PRUEBAS MECÁNICAS DE LOS MECANISMOS	130
6.10.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS	131
CAPÍTULO VII		134
7.1.	CONCLUSIONES.....	134
7.2.	RECOMENDACIONES.....	136
BIBLIOGRAFÍA		138
ANEXO A		¡Error! Marcador no definido.
MANUAL DE OPERACIÓN DEL ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO.¡Error! Marcador no definido.		
ANEXO B		¡Error! Marcador no definido.
PROGRAMA DEL CONTROL DEL ROBOT Y CONTROL REMOTO...¡Error! Marcador no definido.		
ANEXO C		¡Error! Marcador no definido.
COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO		
		¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del Robot Móvil	5
Figura 2. Esquema de la estructura de un Robot Móvil	8
Figura 3. Tipos de pares inferiores	11
Figura 4. Sistema no holonómico.....	12
Figura 5. Ejemplos del Centro Instantáneo de curvatura en diferentes configuraciones de robots con rueda	13
Figura 6. Ejemplo de Robots con Cinta de deslizamiento.....	14
Figura 7. Ejemplo de Robots con piernas	15
Figura 8. Diferencia en superación de obstáculos en los robots móviles.....	16
Figura 9. Ejemplo de un robot con piernas y con rueda, atravesando un terreno irregular con obstáculos sin dificultades.	17
Figura 10. Rueda fija.....	18
Figura 11. Rueda Centrada	18
Figura 12. Rueda descentrada.....	19
Figura 13. Rueda sueca.....	19
Figura 14. Configuración triciclo.....	20
Figura 15. Configuración Diferencial (Giro alrededor de su propio eje)	21
Figura 16. Configuración Ackerman.....	21
Figura 17. Configuración Sincronizada	22
Figura 18. Sincronización mecánica en configuración sincronizada	22
Figura 19. Configuración Omnidireccional	23
Figura 20. Transmisión por cadena	24
Figura 21. Transmisión por piñón	24

Figura 22. Transmisión por piñón- cremallera	25
Figura 23. Esquema del sistema de locomoción y transmisión (vista lateral)	29
Figura 24. Dimensiones de la rueda de locomoción	30
Figura 25. Dimensiones del rodillo de transmisión.....	31
Figura 26. Ancho final del rodillo (doble rueda).....	31
Figura 27. Eje del motor DC.....	32
Figura 28. Vista frontal del sistema de transmisión.....	33
Figura 29. Partes del sistema de locomoción	34
Figura 30. Vista superior del eje común del rodillo, motor y brazo de acrílico	34
Figura 31. Transmisión entre rodillo y rueda móvil (caso de deslizamiento).....	35
Figura 32. Transmisión entre rodillo y rueda móvil (sin deslizamiento).....	35
Figura 33. Brazo móvil (vista frontal)	36
Figura 34. Diseño terminado Brazo de acrílico	36
Figura 35. Dimensiones de la estructura de aluminio	38
Figura 36. Dimensiones de la estructura de aluminio	39
Figura 37. Posición inicial del mecanismo	40
Figura 38. Posición levantada del mecanismo.....	40
Figura 39. Unión de los vagones de 1 GDL	41
Figura 40. Vagón delantero terminado.....	42
Figura 41. Vagón posterior terminado.....	42
Figura 42. Vista lateral del centro de masa del vagón	43
Figura 43. Vista superior del centro de masa del vagón	44
Figura 44. Vagón en estado de ruedas alzadas.....	44

Figura 45. Vagón cae por efecto de gravedad y falta de puntos de apoyo .	44
Figura 46. Centro de masa del robot en posición normal (vista lateral)	45
Figura 47. Centro de masa del robot en posición normal (vista superior)	45
Figura 48. Centro de masa del robot en posición de subida (vista superior)	45
Figura 49. Vista posterior del robot pasando por un pequeño obstáculo	46
Figura 50. Vista lateral del robot pasando por un pequeño obstáculo	47
Figura 51. Máxima inclinación del robot (Vista isométrica)	48
Figura 52. Máxima inclinación del robot (Vista posterior)	48
Figura 53. Máxima altura que sube el robot.....	49
Figura 54. Sección de sujeción y aplicación de fuerza	54
Figura 55. Malla de estudio por método de elementos finitos	54
Figura 56. Desplazamientos	55
Figura 57. Tensiones – Análisis de fallo	56
Figura 58. Diagrama de cuerpo libre.....	57
Figura 59. Fuerza de tracción entre rodillo y rueda móvil	59
Figura 60. Centro de masa de la rueda y el acople	61
Figura 61. Diagrama de cuerpo libre del brazo móvil.....	62
Figura 62. Distancias de cálculo de torque	62
Figura 63. Generación de funciones gráficas	63
Figura 64. Modelamiento del Robot en Solidworks.....	65
Figura 65. Mecanismo para subir la rueda móvil	65
Figura 66. Simulación Working Model	66
Figura 67. Posición de máximo valor del torque	67
Figura 68. Lazo de sistema de control.....	68
Figura 69. Diagrama de la estructura de control y potencia del robot.....	74

Figura 70. Circuito del control remoto.....	84
Figura 71. Circuito del control remoto con pistas de interconexión.....	85
Figura 72. Circuito de potencia vagón 2.	86
Figura 73. Circuito de potencia vagón 2 con pistas de interconexión.	87
Figura 74. Circuito de potencia vagón 1 con pistas de interconexión.	88
Figura 75. Circuito potencia vagón 1.	89
Figura 76. Circuito del controlador del robot móvil.....	90
Figura 77. Circuito del controlador del robot con pistas de interconexión. ...	91
Figura 78. Primer esquema para la construcción de la estructura	97
Figura 79. Piezas cortadas del perfil de aluminio.....	98
Figura 80. Unión de los perfiles de aluminio por remache	98
Figura 81. Estructura formándose a partir del diseño	98
Figura 82. Vagón delantero terminado.....	99
Figura 83. Placa de sujeción de los motores DC a la estructura	100
Figura 84. Motor acoplado a la placa de sujeción.....	100
Figura 85. Colocación de la rueda fija.....	101
Figura 86. Rueda fija instalada	101
Figura 87. Eje acoplado a la rueda	102
Figura 88. Tornillo de seguridad en la rueda	102
Figura 89. Brazo de acrílico	103
Figura 90. Ranura para el ajuste en el brazo de acrílico.....	104
Figura 91. Ajuste con tornillo de la rueda móvil en la ranura del brazo de acrílico.....	104
Figura 92. Abrazaderas para el brazo de acrílico en el Motor DC	105
Figura 93. Sujeción de los servomotores.....	106

Figura 94. Eslabón sujetado al servomotor.....	106
Figura 95. Mecanismo de la rueda móvil	107
Figura 96. Placa frontal del vagón posterior	108
Figura 97. Unión de los vagones	108
Figura 98. Atornillado de la unión a los vagones	109
Figura 99. Roscado sobre la unión de nylon.....	109
Figura 100. Soporte para el sensor infrarrojo	110
Figura 101. Sujeción del soporte del sensor infrarrojo.....	110
Figura 102. Limpieza de la estructura de aluminio.....	111
Figura 103. Colocación de los acrílicos al robot móvil.	111
Figura 104. Placa de control de motores DC del vagón delantero.....	112
Figura 105. Placa de control remoto	113
Figura 106. Placa de control de robot.....	113
Figura 107. Placa de control de motores DC del vagón posterior.....	114
Figura 108. Placas PCB con sus componentes soldados (capa frontal)....	115
Figura 109. Placas PCB con sus componentes soldados (capa inferior)...	115
Figura 110. Proceso de soldadura	115
Figura 111. Limpieza de las placas PCB's.....	116
Figura 112. Separación de la placa PCB con plancha de acrílico.....	116
Figura 113. Aislamiento de las placas PCB con acrílico	117
Figura 114. Ubicación de la placa de control de motores DC en el vagón delantero.....	117
Figura 115. Ubicación de la placa de control de motores DC y control del robot en el vagón posterior	118
Figura 116. Cableado del circuito del primer vagón.....	118

Figura 117. Cableado del circuito del segundo vagón	119
Figura 118. Organización de los cables	119
Figura 119. Etiquetado de los cables	120
Figura 120. Conexión de la fuente de alimentación externa	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sistema de locomoción de robots móviles	16
Tabla 2. Detalle de potencias en actuadores y sensores.....	73
Tabla 3 .Detalle de voltajes y corrientes de consumo del circuito de control del robot móvil.....	74
Tabla 4. Calibres AWG.	76
Tabla 5. Calibres AWG para conexión de actuadores y sensores.....	76
Tabla 6. Tamaños de agujeros sin metalizar.	78
Tabla 7. Tamaños de agujeros metalizados.	78
Tabla 8. Especificaciones técnicas del sensor acelerómetro.....	82
Tabla 9. Especificaciones técnicas del micro controlador del control remoto.	82
Tabla 10. Especificaciones técnicas de protecciones.....	83
Tabla 11. Especificaciones técnicas de reguladores de tensión.....	83
Tabla 12. Especificaciones para el puente H.....	85
Tabla 13. Entradas y salidas para el controlador del control remoto.	92
Tabla 14. Entradas y salidas para el controlador del robot móvil.....	93
Tabla 15. Acciones y relaciones de las etapas del robot móvil.	94
Tabla 16. Tabla de verdad de la salida del control remoto.	121
Tabla 17. Tabla de resultados de las salidas del control remoto.	122
Tabla 18. Porcentajes de ancho de pulso de los servomotores.....	124
Tabla 19. Voltajes analógicos con respecto a la distancia del sensor infrarrojo.....	125
Tabla 20. Resultado de la prueba de arranque del primer motor DC.....	127

Tabla 21. Resultado de la prueba de arranque del segundo motor DC.	127
Tabla 22. Resultado de la prueba de arranque del tercer motor DC.....	128
Tabla 23. Resultado de la prueba de arranque del cuarto motor DC.....	128
Tabla 24. Tabla de resultados del control posiciones iniciales	129
Tabla 25. Tabla de resultados del control posiciones finales.....	130
Tabla 26. Tabla de resultados de prueba de los rodillos.....	131
Tabla 29. Tabla de resultado de la prueba de salvar obstáculos.....	133
Tabla 30. Costos de implementación.....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

Se realizó el diseño e implementación del robot móvil experimental 8x8 articulado para salvar obstáculos; el robot cuenta con dos vagones unidos mediante una unión de tipo par cilíndrico, posee dos sensores infrarrojos para la detección de obstáculos ubicados frente a las ruedas delanteras articulada, que se suben de manera independiente; su sistema de locomoción es mediante transmisión por rodillos de fricción; cuatro motores de corriente continua son los cuales brindan la fuerza de tracción hacia el par de ruedas ubicadas a cada lado de los vagones, cuatro servomotores que sirven como actuadores de los mecanismos articulados los cuales cumplen la función de levantar las ruedas móviles y de esta manera poder salvar de mejor forma los obstáculos; dos circuitos de control de motores los cuales activan los motores DC y controlan el sentido de giro (adelante o atrás) para movilizar el robot para poder explorar su entorno y un circuito de control principal, el cual recibe la información de los sensores y el control remoto, los procesa y envía las señales de pulsos (PWM) a los servomotores y los motores DC. El control Remoto envía mediante cable información sobre el posicionamiento, mediante el movimiento del mismo.

Palabras Claves: Robot móvil, articulado, 8x8, salvar obstáculo, sistema de locomoción

ABSTRACT

The design and implementation of experimental 8x8 articulated mobile robot was made to avoid obstacles, the robot has two wagons connected by a cylindrical pair bonding type , has two infrared sensors to detect obstacles located in front of the articulated front wheels, which are independent of each other, its locomotion system is by friction roller drive; there are four DC motors which provide traction force to the pair of wheels on each side of the wagon, four servo actuators that move the articulated mechanism, which have the function to lift the front wheels and thus best way to save obstacles, two motor control circuits which activate and control the DC motor rotation direction (forward or reverse) to mobilize the robot to explore its environment; a main control circuit , which receives the information from the sensors and the remote control then sends the processed signals (PWM) to the servo motors and DC motors. Remote control sends via cable positioning information by movement thereof.

CAPÍTULO I

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EXPERIMENTAL 8X8 ARTICULADO PARA SALVAR OBSTÁCULOS.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseño y construcción de un Robot Móvil de transmisión por rodillos con sistema de locomoción articulado controlado mediante un instrumento de detección de obstáculos para poder salvarlos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño de los mecanismos del sistema de locomoción y transmisión mecánica.
- Selección los tipos, cantidad y ubicación de los sensores y actuadores.
- Realizar los algoritmos de control para manipular los mecanismos diseñados previamente.
- Construcción del Robot móvil según los diseños y verificar el correcto funcionamiento.
- Mejorar y perfeccionar el diseño.
- Realizar un manual de operación que permita el correcto manejo del Robot Móvil.

1.3. ANTECEDENTES

Los robots móviles son aquellos que tienen grandes capacidades de desplazamiento, basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo articulado que por telemando o guiándose por la

información de su entorno a través de los sensores. Una de las funciones más complicadas de implementar en un robot es la de pasar obstáculos artificiales que los humanos hacemos muy fácilmente;

En los años 50 las tortugas motorizadas fueron los primeros diseños de robots móviles cuya tarea era asegurar el transporte de material de un punto a otro dentro de una cadena de fabricación, estos robots sirvieron de base para posteriores estudios sobre inteligencia artificial desarrollados entre los años 1965 y 1973.

Los sistemas de locomoción son parte fundamental dentro del diseño de robots móviles capaces de salvar obstáculos, para lo cual durante las investigaciones se han desarrollado diferentes tipos de mecanismos como ruedas, orugas, piernas, etc., que ayudan a mejorar el desplazamiento de plataformas hacia su destino.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Debido al desafío que presentan los robots móviles al desplazarse en un medio irregular, en donde se pueden encontrar obstáculos y terrenos abruptos, hace que la movilización con un sistema simple de locomoción sea compleja e infructífera.

Los robots desarrollados en la actualidad tienen aplicaciones orientadas a brindar ayuda y facilidades a las personas en sus tareas; por lo tanto la importancia del presente proyecto surge de la necesidad de que los robots para poder asistir en las labores necesitan desplazarse en cualquier entorno lo que implica salvar obstáculos de forma ágil, rápida, eficiente y segura.

La elaboración del robot móvil capaz de salvar gradas, se justifica debido a que este tema ha sido objeto de investigación y mucha interés por parte de laboratorio de Mecanismos de la Escuela Politécnica del Ejército por los campos posibles de aplicación como en las industrias, seguridad, hospitales, para investigaciones espaciales, actividad militar, sector educativo, biología electrónica y juguetes.

1.5. ALCANCE DEL PROYECTO

Se realizará el dimensionamiento del cuerpo del robot basado en las herramientas existentes en el mercado, como son principalmente las ruedas.

El sistema de locomoción del robot que integra 2 vagones será mediante la transmisión por rodillos, para de esta forma multiplicar la tracción de 4 a 8 ruedas. EL giro del robot para el cambio de dirección es realizado por inversión de giros en los motores de cada lado de los vagones.

La energización de los circuitos de potencia y de control, incluido los actuadores y sensores será suministrada por dos fuentes de voltaje de corriente continua en exterior del robot para los circuitos de potencia y a bordo del robot para los circuitos de control.

El controlador principal del sistema del Robot Móvil es un controlador de interfaz periférica (PIC) con capacidades físicas suficientes para soportar el número de actuadores y sensores que integra el robot.

El manejo del Robot Móvil se realizará a través de un control remoto sensible al movimiento que facilitará la maniobrabilidad del mismo.

El presente proyecto involucra requisitos y restricciones de un robot con capacidad de subir obstáculos de una altura de 10 cm como máximo.

1.6. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto consiste en desarrollar un robot móvil de dos cabinas dotado de un sistema de locomoción articulado de 8 ruedas que le proporciona la capacidad de salvar obstáculos. Estos obstáculos pueden tener diferentes dimensiones de hasta un máximo de 10 cm de altura, el ancho del obstáculo puede ser menor o mayor al ancho del robot móvil, ya que sus articulaciones son independientes entre sí.

El robot móvil tiene la capacidad de detectar por medio de dos sensores infrarrojos los obstáculos que se encuentren en su camino, enviar esta información al sistema de control automático para levantar la articulación perteneciente a la ubicación del obstáculo. El control para el avance y giro del robot móvil es mediante una interfaz de mando a control remoto. La tracción de las 8 ruedas se realiza mediante transmisión por 4 rodillos entre cada par de ruedas distribuidas dos pares en cada vagón.

A continuación en la figura 1 se muestra el diagrama del funcionamiento del Robot Móvil:

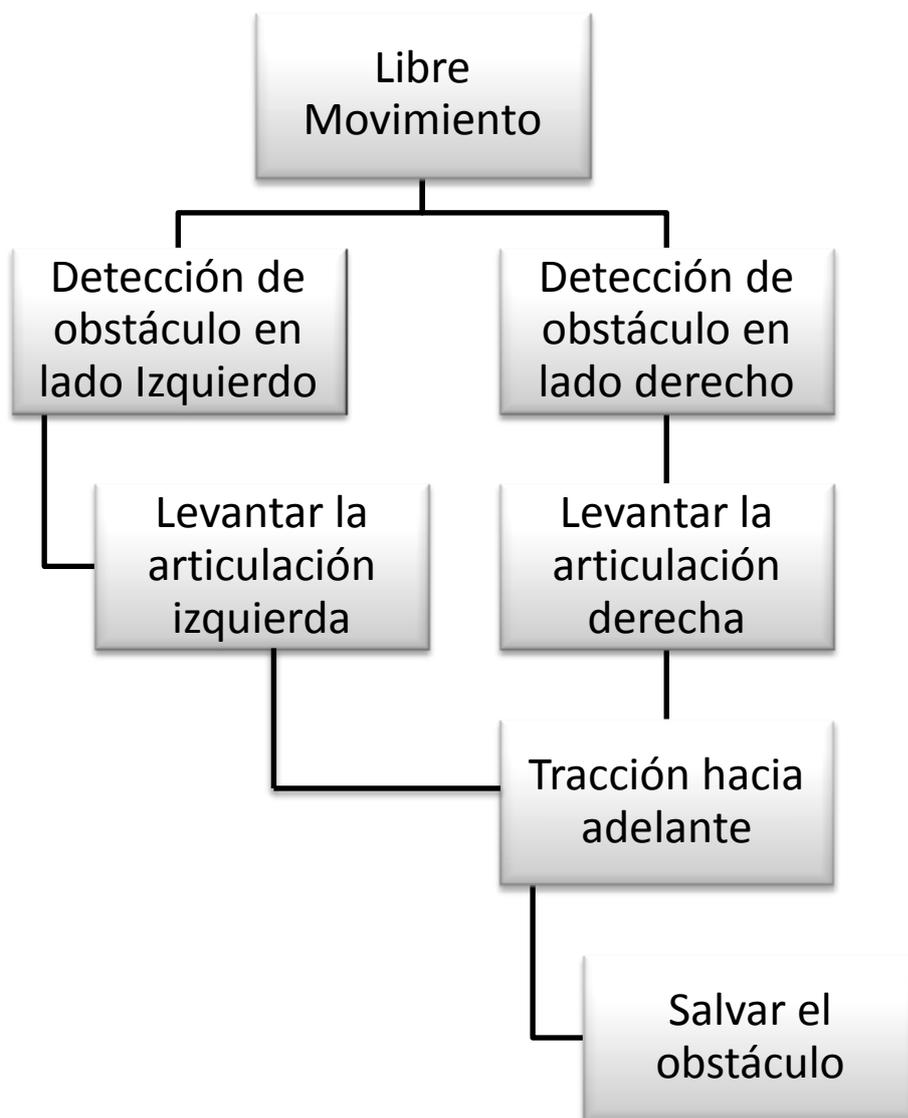


Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del Robot Móvil

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se revisan los conceptos fundamentales de los robots móviles y conceptos básicos de los mismos.

2.1. ROBOT MÓVIL

Para describir un robot móvil, es importante primero definir qué es un Robot. Existen muchas definiciones y muy distintas sobre lo que es un robot:

Según el “Robot Institute of America”, 1979: “Es un dispositivo reprogramable y multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados.”

Según el Diccionario Real Academia: “Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas.”

Podemos resumir que un Robot es una máquina hecha por humanos dotado de cierta inteligencia para realizar tareas específicas y limitadas.

Los robots se clasifican de la siguiente manera [4]:

- Humanoide
- Robot móvil
- Robot Industrial
- Robot inteligente
- Robot de servicio

Una definición de robot móvil viene de la teoría clásica de robots: “Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento (re)programado por medio de control automático para realizar una tarea específica.” [1]

Entonces un robot móvil se refiere a la capacidad de un robot de moverse en el ambiente, dependiendo de la inteligencia del robot, se determina su mayor o menos adaptación al ambiente y se divide en 4 subsistemas:

- Locomoción
- Percepción
- Razonamiento
- Comunicación

Los robots móviles se clasifican en guiados y no guiados. El vehículo guiado está restringido a un conjunto de trayectorias predefinidas en su área de trabajo. Estas trayectorias están indicadas por líneas ópticas ó magnéticas o una secuencia de movimientos guardados en la memoria. El robot en ningún momento puede abandonar la trayectoria. A estos robots se les llama también vehículos automáticos guiados. Los vehículos no-guiados no están restringidos a una trayectoria predefinida. A este tipo de robots no-guiados pertenecen los robots submarinos (bajo el agua), los del espacio aéreo y/o espacial y los terrestres. Los robots terrestres han sido clasificados por su sistema de movimiento en robot con ruedas o con piernas. Así cada robot desarrolla diferentes tareas de acuerdo a su capacidad.[2]

Su principal filosofía es la movilidad, lo cual es muy ventajoso para realizar ciertas tareas y poder trabajar en equipo con otros robots o de

manera aislada. Son útiles para realizar tareas en lugares peligrosos para los humanos, repetitivos, sucios o difíciles. Tal es el caso de los robots móviles que se envían a Marte, o los que se utilizan para limpiar centrales nucleares.[3]

La construcción mecánica y la programación de un Robot móvil son las principales características que le otorgan precisión en su desplazamiento y el nivel de inteligencia y autonomía para interactuar con el entorno de modo eficiente.

La estructura General de un Robot Móvil se puede apreciar en el siguiente esquema:

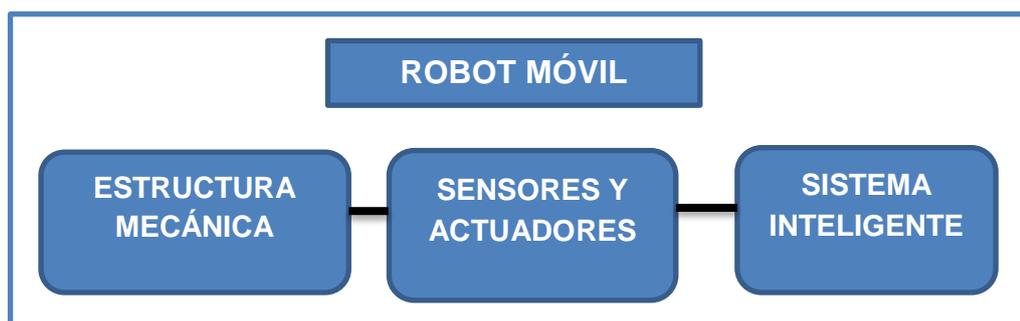


Figura 2. Esquema de la estructura de un Robot Móvil

- La estructura mecánica: estructuras con ruedas, piernas y orugas.
- Actuadores: motores, luces, ruedas.
- Sensores: sonar, láser, cámaras, infrarrojos y cualquier elemento que nos proporcione información del entorno.
- Inteligencia: métodos, algoritmos, etc. Estos van a permitir a partir de la información de los sensores, interactuar con el entorno.

En el diseño un sistema de locomoción aplicado a un Robot Móvil hay que tener en cuenta las siguientes características y consideraciones:

- Maniobrabilidad, que es la facilidad del vehículo para moverse; la sensibilidad de los mandos al piloto en todas las posibles condiciones de marcha, independientemente de las condiciones de terreno.
- Controlabilidad, es una de las características de un sistema en espacio de estado, que permite ejercer un cambio sobre uno o varios de sus estados, modificando su condición inicial.
- Tracción, es la potencia transmitida a las ruedas o ruedas de un vehículo desde uno o varios motores o mecanismos de transmisión para poder vencer la fricción estática y dinámica.
- Estabilidad mecánica, es la propiedad de un sistema de mantener el estado de equilibrio estático cuando éste es sometido a fuerzas o perturbaciones, tanto internas como externas.
- Eficiencia, es la relación entre la potencia que ingresa al sistema con respecto a la potencia entregada por el mismo sistema.
- Mantenimiento, el cual hace referencia a todas las acciones que tienen por objetivo mantener en buen estado un sistema para que éste pueda llevar a cabo una función específica.
- Navegabilidad, es la característica propia o asistida de un robot móvil que le permite realizar un estudio del entorno basado en la información recibida de los sensores.

2.2. SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN

La Locomoción en el contexto de Robot móvil se refiere a la forma en que el robot se traslada de un punto a otro.

Un robot está constituido por articulaciones y eslabones que son los que definen su sistema de locomoción. Este sistema de locomoción debe proveer al Robot Móvil Grados de libertad para que el Robot pueda realizar movimientos.

A continuación se hace una descripción de los componentes más importantes de un robot Móvil:

Mecanismo: Se denomina mecanismo a la máquina simple en un conjunto, que a se compone de más de un sólidos resistentes u elementos elásticos unidos con diferentes tipos de uniones entre sí, generando movimiento y cumpliendo con una función específica.

- **Eslabón:** Es un cuerpo rígido que al menos posee dos nodos que son los puntos de unión con otros eslabones.
- **Junta:** o Par cinemático, es el punto de conexión entre dos o más eslabones que permiten generar un movimiento.
 - **Unión de par inferior:** Son aquellos en que el contacto es de superficie y no hay deslizamiento.(ver figura 3)
 - **Unión de par superior:** El contacto entre los elementos de lleva a cabo entre una línea o un plano.

2.2.1. GRADOS DE LIBERTAD

Los grados de libertad (GDL), también llamados DOF por sus siglas en inglés (Degree Of Freedom) hacen referencia al número de movimientos independientes que se pueden realizar. En otras palabras, un grado de libertad es lo que define el tipo y numero de movimientos del robot [5]. Los

grados de libertad de cada tipo de unión de pares inferiores están mostrados en la figura 3.

2.2.2. LIMITACIONES CINEMÁTICAS

La combinación de juntas y eslabones constituye un mecanismo con movimientos específicos, pero estos movimientos pueden ser impedidos o disminuidos por limitaciones cinemáticas.

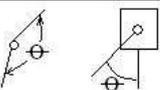
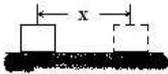
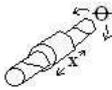
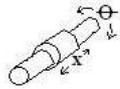
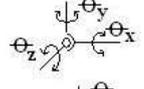
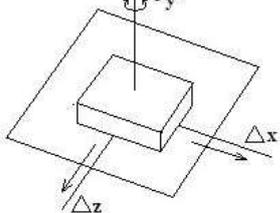
Tipo	Diagrama cinemático	Movimiento	Variable	Grado de libertad
Revoluta		Rotación	θ	1
Prismático		Traslación	x	1
Helicoidal		Rotación o traslación	θ o x	1
Cilíndrico		Rotación y traslación	θ y x	2
Globular		Rotación	$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	3
Planar		Rotación y traslación	$\Delta x, \Delta z, \theta_y$	3

Figura 3. Tipos de pares inferiores

Las limitaciones de cinemática son las que entre cuerpos rígidos que resultan en la disminución de los grados de libertad del sistema rígido del cuerpo o mecanismo, es decir si creamos un par inferior más, los grados de libertad se reducen [6].

La Ecuación para calcular los grados de libertad en un mecanismo es:

$$GDL = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$$

Ecuación 1. Cálculo de Grados de Libertad

Donde:

DOF = Grados de libertad totales del mecanismo,

n = Número de eslabones, incluyendo el eslabón fijo o de referencia,

j_1 = Número de pares inferiores,

j_2 = Número de pares superiores.

Esta ecuación es también conocido como la ecuación de Gruebler's [6].

Un sistema es holonómico si la cantidad de grados de libertad que se pueden controlar es igual a la cantidad de grados de libertad disponibles. En un sistema que es no holonómico, el Robot móvil no podrá desplazarse lateralmente [4] (ver figura 4).

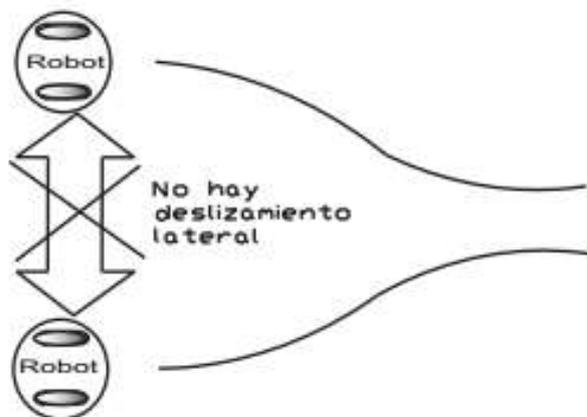


Figura 4. Sistema no holonómico

2.2.3. CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN

También llamado Centro Instantáneo de curvatura (ICC), se define como el punto por el cual cruzan los ejes de todas las ruedas; es el punto alrededor del cual el Robot móvil gira en un instante determinado (ejemplos: ver Figura 5).

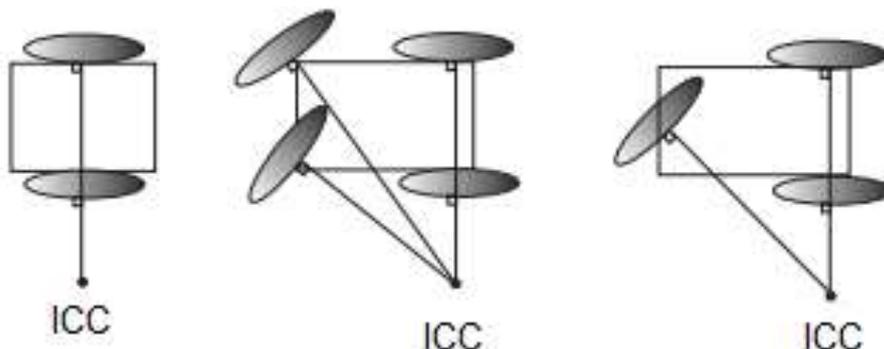


Figura 5. Ejemplos del Centro Instantáneo de curvatura en diferentes configuraciones de robots con rueda

2.3. TIPOS DE LOCOMOCIÓN

Los tipos de locomoción en los Robots móviles se clasifican teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Tipo de servicio del Robot
- Tipo de terreno
- Tipo de alimentación
- Peso del Robot
- Espacio que ocupa
- Costos de construcción
- Estabilidad
- Etc,

Y se clasifican según las siguientes configuraciones:

- Con ruedas
- Diferencial
- Síncrona
- Triciclo
- Ackerman
- Ominidireccionales
- Cintas de deslizamiento u orugas (ver figura 6)
- Con piernas (ver figura 7)
- Otros



Figura 6. Ejemplo de Robots con Cinta de deslizamiento



Figura 7. Ejemplo de Robots con piernas

A continuación en la Tabla 1 se muestran la comparación de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de locomoción.

De la tabla 1, se puede concluir que los robots móviles con ruedas son los más prácticos excepto en caso de superación de obstáculos, un robot con piernas puede superar obstáculos que estén a baja altura en comparación con el tamaño del robot, donde un robot con ruedas quedaría atascado si el tamaño del obstáculo fuera mayor que el radio de la rueda (ver figura 8).

	Facilidad de construcción	Mayor capacidad de carga	Menor susceptibilidad a daños	Algoritmos sencillos de control	Disminución del deslizamiento	Superación de obstáculos
Ruedas	✓	✓	✓	✓	✓	
Orugas	✓		✓	✓		✓
Piernas						✓

Tabla 1. Comparación de sistema de locomoción de robots móviles

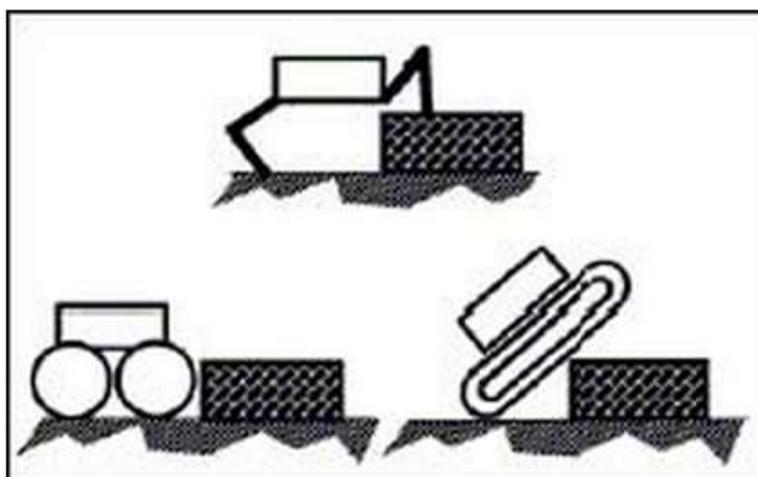


Figura 8. Diferencia en superación de obstáculos en los robots móviles

Entonces una combinación de un robot móvil con ruedas que también tenga piernas sería una solución a muchos de los problemas de la robótica. (Ver figura 9).



Figura 9. Ejemplo de un robot con piernas y con rueda, atravesando un terreno irregular con obstáculos sin dificultades.

2.3.1. TIPOS DE LOCOMOCIÓN CON RUEDAS

En este proyecto nos enfocaremos al estudio de los robots móviles con ruedas, que son el elemento que proporcionan la capacidad de movilidad y se clasifican de la siguiente manera:

- Rueda Fija: El movimiento se produce en la dirección de la rueda. Donde: ω es la velocidad angular de la rueda, V la velocidad y a_x , el vector unitario de dirección [4] (ver figura 10).
- Orientación Centrada: Además del giro t de la rueda, existe rotación alrededor del eje vertical que está dirigido al centro de la rueda. Donde: ω es la velocidad angular de la rueda, V la velocidad y a_x el vector unitario de dirección [4] (ver figura 11).
- Orientación descentrada: Gira sobre el eje de la rueda y rota alrededor del eje vertical situado a una distancia desde el centro de la rueda. Donde: ω es la velocidad angular de la rueda, V la velocidad y

ax el vector unitario de dirección, d la distancia de descentralizadora [4] (ver figura 12).

- Rueda sueca: Además de moverse en la dirección de la rueda, se mueve en la dirección perpendicular a la dirección de la rueda. $V = (r \cdot \omega) a_x + U a_s$. Donde: U es la velocidad de deslizamiento y a_s es un vector unitario en la dirección del deslizamiento, ω es la velocidad angular de la rueda y V la velocidad [4] (ver figura 13).

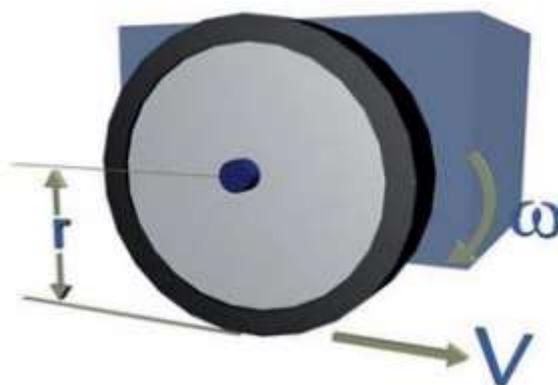


Figura 10. Rueda fija

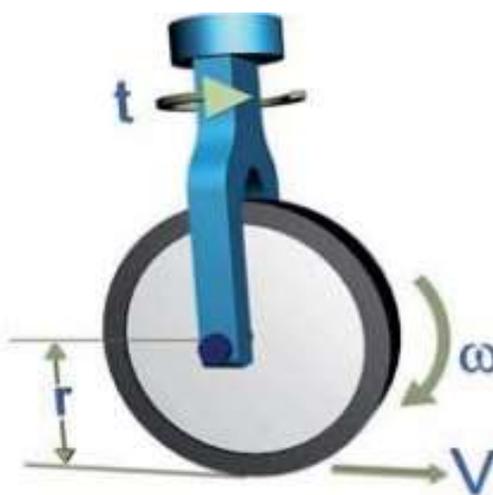


Figura 11. Rueda Centrada

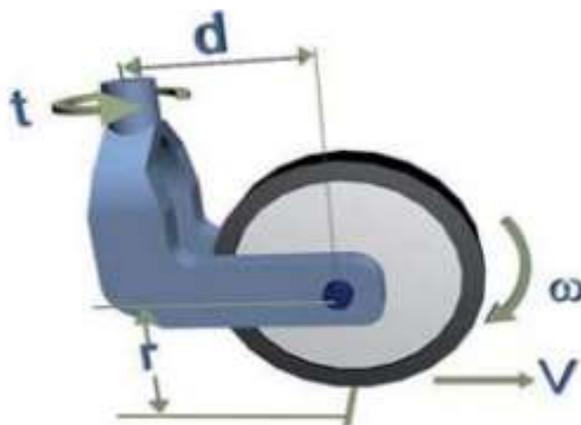


Figura 12. Rueda descentrada

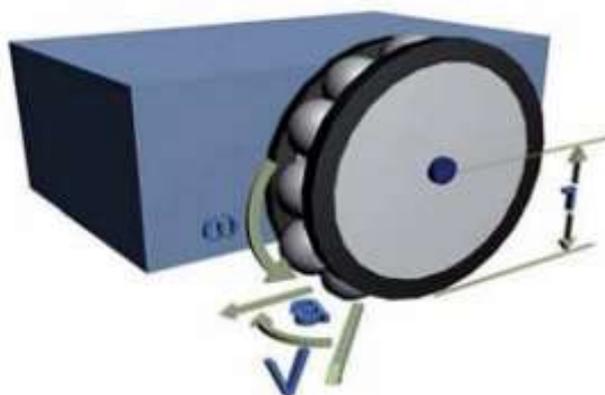


Figura 13. Rueda sueca

2.3.2. CONFIGURACIONES ROBOT MÓVIL CON RUEDA

La forma de la plataforma, ubicación y tipo de las ruedas, los motores, entre otros elementos del robots son los que dan la configuración del robot móvil. Existen distintas configuraciones para los robots móviles:

2.3.3. CONFIGURACIÓN TRICICLO

Esta configuración como indica su nombre tiene tres ruedas, y en esta configuración también hay dos posibilidades:

- Dos ruedas pasivas que no están acopladas a ningún motor y sirven de soporte, la tracción y dirección del motor dependen únicamente a la rueda delantera.
- La otra forma es que la orientación sea en la rueda delantera y las dos ruedas de atrás generan la tracción.

Para cualquiera de las formas de esta configuración, no se puede tener giros de 90° y el radio de curvatura (ICC), siempre se encuentra a lo largo del eje que cruza las dos ruedas traseras, un problema de esta configuración es que cuando el robot se encuentra en terrenos irregulares o inclinaciones, el centro de gravedad tiende a moverse lejos de la rueda delantera y pierde tracción. Esta configuración tiene la ventaja de que no existe deslizamiento.[4] (Ver figura 14).

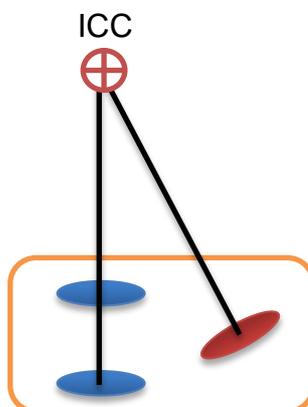


Figura 14. Configuración triciclo

2.3.4. CONFIGURACIÓN DIFERENCIAL

Esta configuración consta de dos ruedas colocadas en el eje perpendicular a la dirección del robot. Cada rueda es controlada por un motor independientemente del otro, por lo tanto, para que el robot pueda girar, se debe aplicar diferentes velocidades. En esta configuración es

posible que el robot gire en su propio eje, mientras una rueda gira a una velocidad constante, la otra rueda gira a la misma velocidad pero en sentido contrario. (ver figura 15)

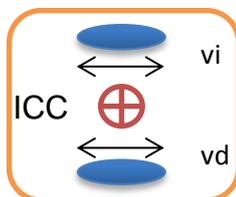


Figura 15. Configuración Diferencial (Giro alrededor de su propio eje)

Para esta configuración es fácil deducir lo siguiente:

- Giro a izquierda: $vi < vd$
- Giro a derecha: $vi > vd$
- Giro en su propio eje: $vi = -vd$

2.3.5. CONFIGURACIÓN ACKERMAN

También se le conoce como configuración “Coche”, ya que es la configuración que se utiliza en los diseños de los automóviles. Consiste en cuatro ruedas, dos ruedas traseras de tracción y dos delanteras de dirección, tiene la ventaja de tener estabilidad en terrenos irregulares.

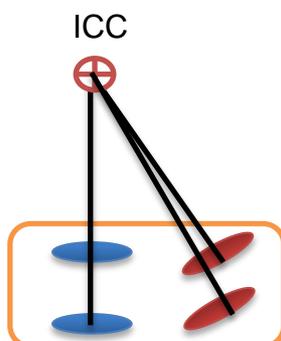


Figura 16. Configuración Ackerman

2.3.6. CONFIGURACIÓN SINCRONIZADA

Esta configuración puede tener tres o más ruedas, acopladas mecánicamente y traccionadas, de tal forma que todas giran en el mismo sentido y misma velocidad. En esta configuración el Centro de Curvatura Instantánea (ICC) se encuentra en el infinito, ya que siempre tiene las ruedas paralelas. Este sistema tiene la ventaja de ser holonómico, es decir el robot no necesita girar para cambiar de dirección a todas las ruedas. gracias a su sistema de locomoción compuesto por dos motores, uno para dirección y otro para tracción que mecánica mente esa tracción es transmitida. (ver figura 17 y figura 18)

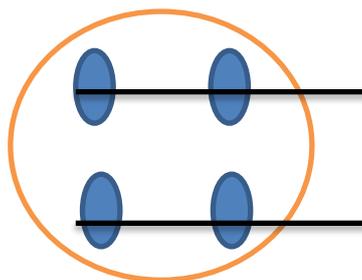


Figura 17. Configuración Sincronizada

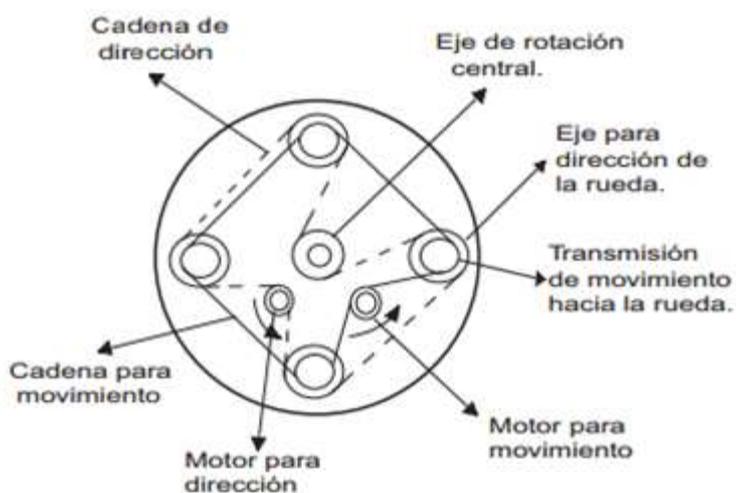


Figura 18. Sincronización mecánica en configuración sincronizada

2.3.7. CONFIGURACIÓN OMNIDIRECCIONAL

Los robots de esta configuración utilizan ruedas suecas como fue explicado en el 2.3.1., esto hace que el robot tenga la facilidad de moverse en cualquier dirección, puede tener 3 o más ruedas. Las ruedas suecas u omnidireccionales le das la propiedad de ser holonómico, ya que estas ruedas tienen rodillos con ejes perpendiculares el eje de la rueda que al aplicar una fuerza lateral le permite un movimiento en esa dirección. (ver figura 19)

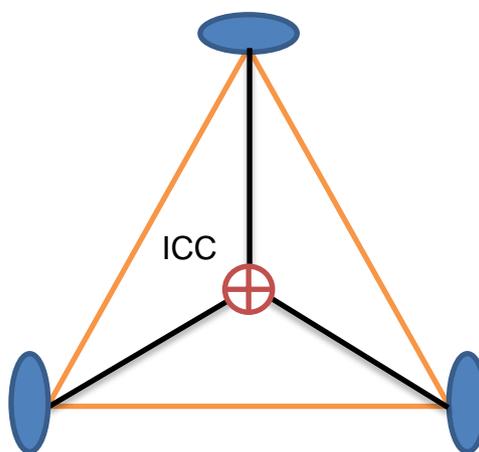


Figura 19. Configuración Omnidireccional

2.4. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Se le llama transmisión al conjunto de bandas, cadenas o engranes que sirven para brindar fuerza, potencia y movimiento desde un motor hasta su punto de aplicación. [7] Sus funciones son:

- Cambio de dirección
- Transferir movimiento
- Cambio de velocidad
- Transmitir potencia y torque

En el estudio de las transmisiones mecánicas encontraremos los siguientes:

- *Transmisión por Piñones y cadena:* Se utilizan para evitar un deslizamiento, las cadenas se enganchan con los dientes de los engranes y con este enganchamiento se logra transmitir el movimiento a dos ejes paralelos que estén separados por una distancia. (ver figura 20)



Figura 20. Transmisión por cadena

- *Transmisión por engranajes:* Sirven para transmitir potencia de un componente a otro. Están compuestos por dos ruedas, de las cuales la mayor se denomina corona y la menos piñón (ver figura 21).



Figura 21. Transmisión por piñón

- *Transmisión por piñón-cremallera:* Este mecanismo convierte un movimiento giratorio a un movimiento lineal, utiliza un barra dentada llamada cremallera. (ver figura 22)



Figura 22. Transmisión por piñón- cremallera

2.5. VELOCIDADES ANGULARES

En estos tipos de transmisión siempre existe un motor que genera el movimiento rotatorio en el eje de uno de los engranajes, poleas o ruedas, por lo que la velocidad angular del elemento que está directamente conectado al eje del motor tendrá la misma velocidad del motor. Para calcular la velocidad angular que tendrá el siguiente elemento conectado se sigue las siguientes fórmulas y casos:

Caso de transmisión por cadena: En este caso la cadena tiene una velocidad lineal constante que sería la misma velocidad tangencial para los dos engranajes y piñones, tenemos que:

$$V_t = \omega * r$$

Ecuación 2. Velocidad tangencial [9]

Donde:

V_t , es la velocidad tangencial,

ω , es la velocidad angular de la rueda, piñón o polea ,

r , es el radio.

Si tenemos que las velocidades tangenciales son iguales entonces tenemos:

$$v_{t1} = v_{t2}$$

$$\omega_1 * r_1 = \omega_2 * r_2$$

Ecuación 3. Relación de velocidades angulares [9]

Caso de transmisión por engranajes: En este tipo de transmisión existe una relación de transmisión en función de número de dientes:

$$\omega_1 * z_1 = \omega_2 * z_2$$

Ecuación 4. Relación de engranajes [9]

Donde:

ω , es la velocidad angular del engranaje,

z , es el número de dientes del engranaje.

CAPÍTULO III

DISEÑO MECÁNICO

En el presente capítulo se realizan los diseños de los elementos mecánicos basados en las normas y cálculos respectivos.

3.1. DISEÑO DE SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Basándose en el capítulo II del presente documento, el robot móvil del proyecto se define como un robot móvil de tipo combinado de ruedas con eslabones, ya que su sistema de locomoción se compone de ruedas para movimiento y la posibilidad de bascularlas para salvar obstáculos.

El robot móvil es de tipo no holonómico, es decir que no puede girar sus ruedas para realizar cambios de dirección instantáneamente y por lo tanto no podrá hacer un movimiento lateral.

Sus grados de libertad de acuerdo a la ecuación 1, definido en el Capítulo II:

$$GDL = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$$

Donde:

$$n = 2$$

$$j_1 = 1$$

$$j_2 = 0$$

Por lo que se tiene por cada mecanismo de rueda móvil:

$$GDL = 3(2 - 1) - 2(1) - (0)$$

$$GDL = 3 - 2$$

$$GDL = 1$$

Es decir el total de GDL del robot móvil son 4, ya que tiene 4 mecanismos de rueda móvil, es decir que para cada mecanismo se necesita de un actuador.

En este robot, no hay eslabones que estén conectados a otros, por lo tanto los grados de libertad se reducen a la cantidad de juntas que son de tipo pares inferiores.

Cada rodillo, implica también un grado de libertad, por lo que sus grados de libertad totales, o también deduciendo de otra forma, la cantidad de motores en total que se debe poner para mover cada juntura es:

- Rodillos de transmisión: 4
- Ruedas móviles: 4
- Motores para control del mecanismo: 8

3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El diseño del sistema de locomoción comienza con la definición de la dimensión que tendrá el robot, para ser capaz de subir obstáculos, en este caso la dimensión del robot tiene una dependencia directa con la dimensión de la rueda, las ruedas son los únicos elementos mecánicos que no son contruidos, sino adquiridos en el mercado.

Como se ha mencionado en el capítulo I, el robot móvil del presente proyecto se compone de dos vagones unidos mediante un par cinemático

tipo cilíndrico y su sistema de locomoción se caracteriza por el tipo de transmisión de rodillos de fricción, los cuatro motores del robot van acoplados a cuatro rodillos, que éstos a su vez transmiten el movimiento y la potencia a dos ruedas cada uno, y es así como se realizó la tracción 8X8. En la figura 23 se muestra la un esquema del sistema de locomoción del robot.

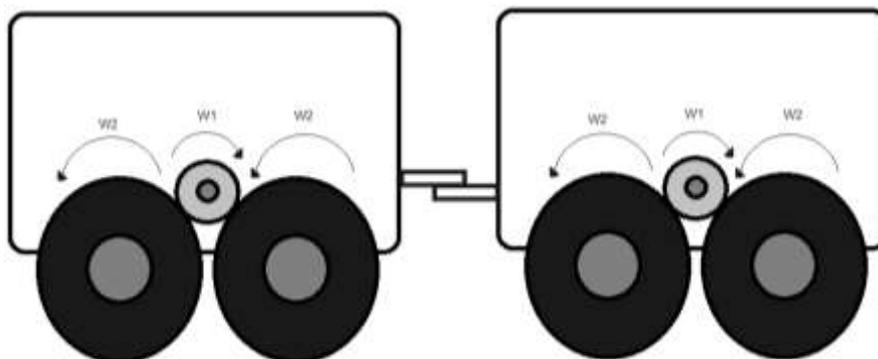


Figura 23. Esquema del sistema de locomoción y transmisión (vista lateral)

Las ruedas que fueron adquiridos para este objetivo tiene las siguientes características:

Ruedas de locomoción:

- Material:
 - Rueda: Caucho
 - Aro: plástico
- Peso neto de la rueda: 200 ± 10 gr.
- Ancho de la rueda: 60 mm (figura 24)
- Diseño de superficie con rugosidades para mayor tracción y adherencia con el suelo. (Figura 24)
- Diámetro exterior: 120 mm (figura 24)
- Diámetro del Aro: 60 mm (figura 24)



Figura 24. Dimensiones de la rueda de locomoción

Ruedas para rodillos de transmisión:

- Material:
 - Rueda: Caucho
 - Aro: plástico
- Peso neto de la rueda: 45 ± 10 gr.
- Diámetro exterior: 60 mm (figura 25)
- Diámetro del Aro: 44 mm (figura 25)
- Ancho de la rueda: 25 mm (figura 25)
- Diseño de superficie con rugosidades para mayor tracción y adherencia con el suelo. (Figura 25)

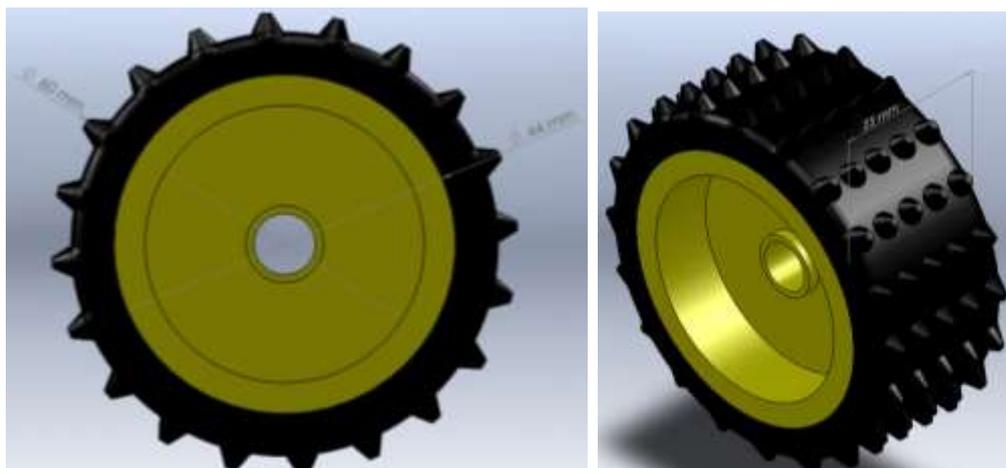


Figura 25. Dimensiones del rodillo de transmisión

Los rodillos tienen un ancho menor a la anchura de las ruedas de locomoción, por tal motivo se unieron dos rodillos para tener un rodillo de 50 mm de ancho, y de esta forma se asegura un mayor área de contacto con las ruedas, y por lo tanto mayor adherencia y contacto con las ruedas de locomoción. (Ver figura 26)

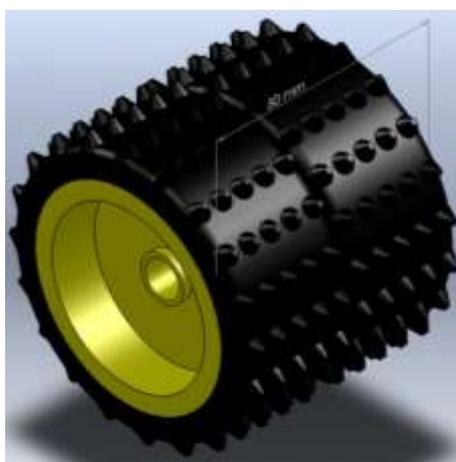


Figura 26. Ancho final del rodillo (doble rueda)

La unión de los dos rodillos se realizó pasando un tornillo M8 por el agujero central de las dos ruedas y ajustado a presión, al otro lado con una tuerca de la misma medida.

A éstos rodillos se acoplará el motor de corriente directa (Figura 27), el cual está encargado de los movimientos del robot hacia adelante y atrás. La unión del eje del motor y los rodillos se realizó por medio de un prisionero ajustándolo en la parte recta.



Figura 27. Eje del motor DC

Como se había mencionado anteriormente, este motor debe transmitir el torque a dos ruedas, una de estas ruedas es fija y su eje va directamente acoplado a la estructura del robot. La segunda rueda es la rueda móvil que además de recibir el movimiento por parte del motor DC, también está sujeto a un brazo que lo sube de acuerdo a la altura del obstáculo, para poder salvarlo.

En la figura 28, se puede apreciar el sistema de locomoción en estado normal, de movimiento libre hacía delante, atrás, izquierda y derecha.

El brazo acoplado a la rueda delantera es para hacer posible que el robot suba obstáculos más altas que el radio de las ruedas, es decir 6 cm. Esta rueda debe subir una altura que no es lineal, sino radial, esto quiere decir que el brazo que sujeta la rueda móvil tiene un punto de giro que coincide con el centro del rodillo, lo que hace que la rueda móvil siempre mantenga un punto de tangencia con el rodillo y así en todo momento mantener

velocidad, torque y movimiento. El giro del brazo se realiza mediante un servomotor. (Ver Figura 29)

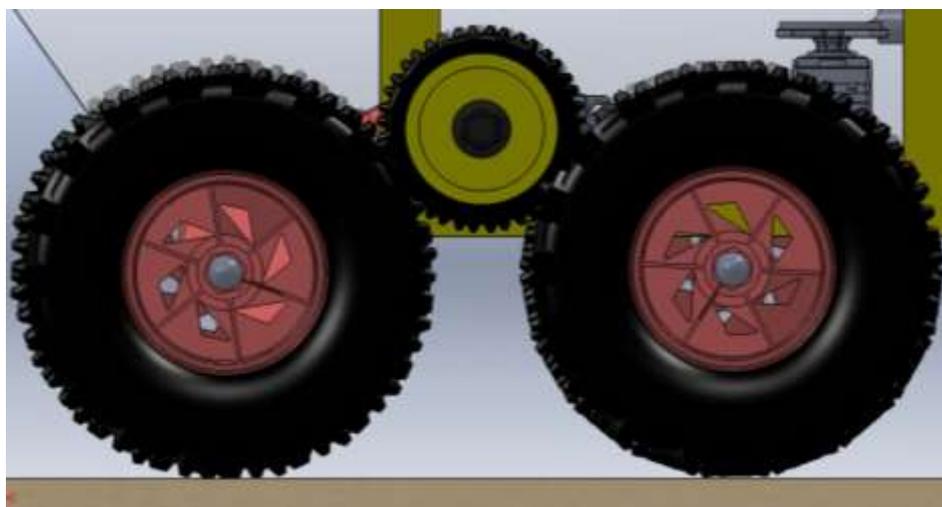


Figura 28. Vista frontal del sistema de transmisión

Para el diseño del brazo móvil se debe tener en consideración los siguientes puntos:

- *El centro de giro es el centro del rodillo:* el brazo debe girar con respecto al eje del rodillo, esto implica que el rodillo, el Motor DC y el eje de giro de brazo de acrílico deben ser concéntricos. (ver figura 30)
- *La presión que existe entre el rodillo y la rueda:* Entre el rodillo y la rueda móvil, debe haber cierta presión para aumentar el contacto y así asegurar la transmisión, ya que la transmisión no es por ruedas dentadas, sino por rodillos de fricción entonces entre las dos ruedas debe haber una distancia un poco menor a la sumatoria de sus radios, caso contrario se genera un deslizamiento entre ellos. Esta distancia fue determinado experimentalmente y es de: 85 mm. En la figura 31,

se muestra el caso en que no haya ninguna presión entre las dos ruedas y teniendo un punto de tangencia, y por otro lado en la figura 32 se muestran las ruedas teniendo cierta presión.

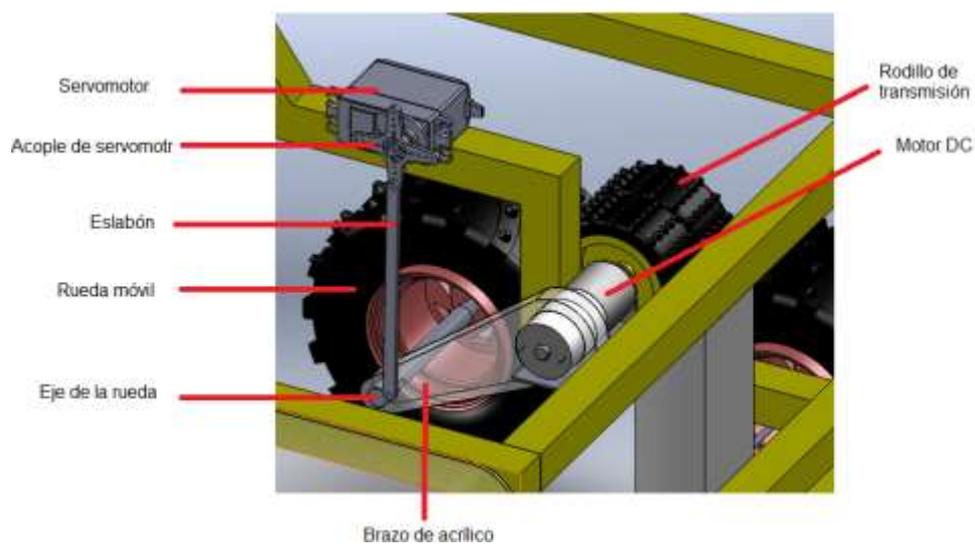


Figura 29. Partes del sistema de locomoción

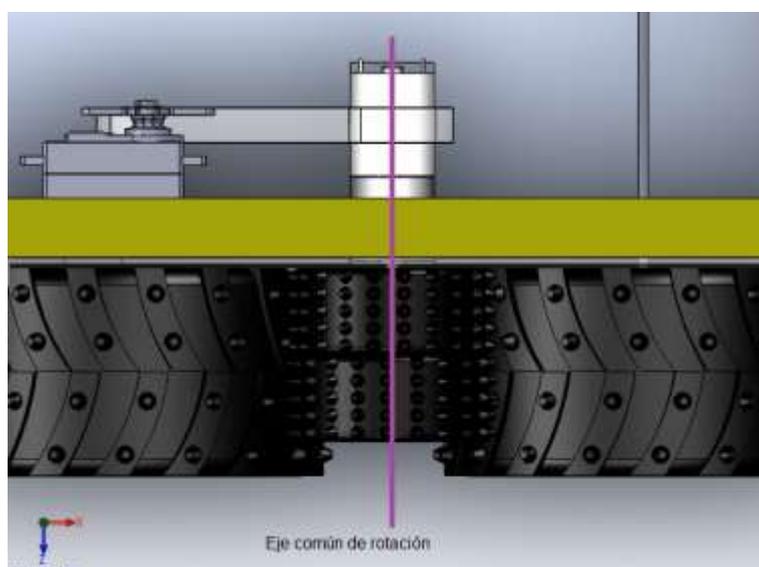


Figura 30. Vista superior del eje común del rodillo, motor y brazo de acrílico

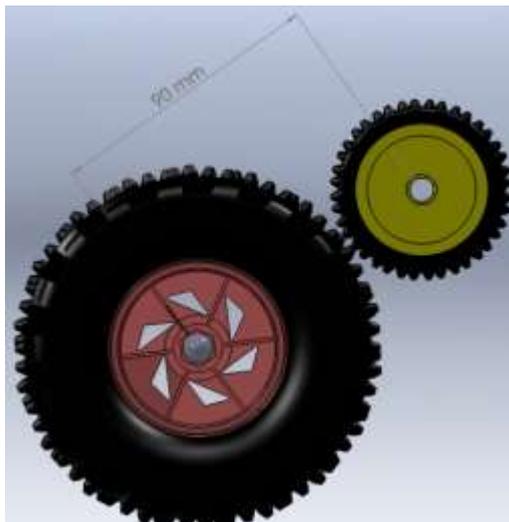


Figura 31. Transmisión entre rodillo y rueda móvil (caso de deslizamiento)

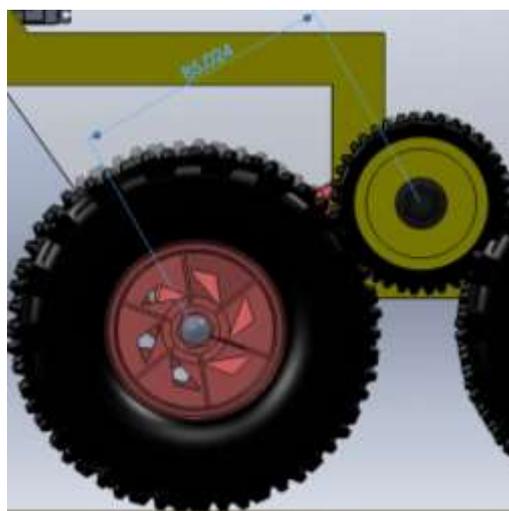


Figura 32. Transmisión entre rodillo y rueda móvil (sin deslizamiento)

Tomando en cuenta los puntos anteriores, el diseño del brazo de acrílico fue terminado de la siguiente manera:

- Dimensión horizontal desde el eje de giro hasta el eje de la rueda móvil: 85 mm (Ver figura 33)
- Agujeros necesarios para la inserción del Motor DC, colocación del eje de la rueda y acople del eslabón. (ver figura 34)

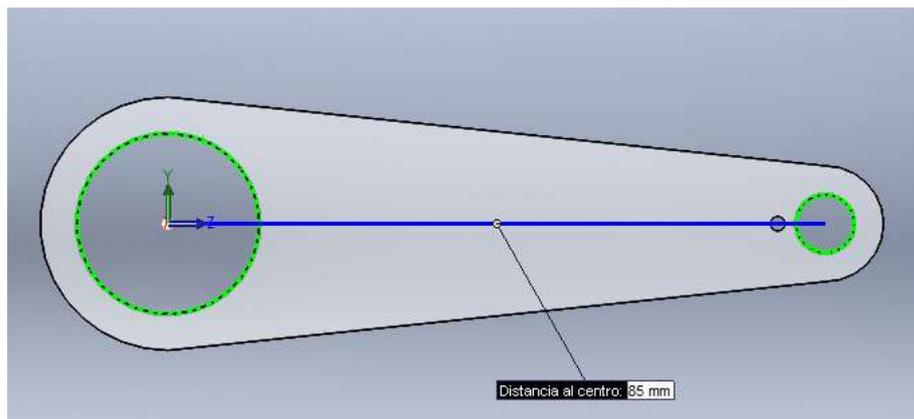


Figura 33. Brazo móvil (vista frontal)

El material del brazo es de acrílico de 10 mm de espesor, por sus propiedades físicas de resistencia media para esta aplicación bajo peso y facilidad de corte en CNC.

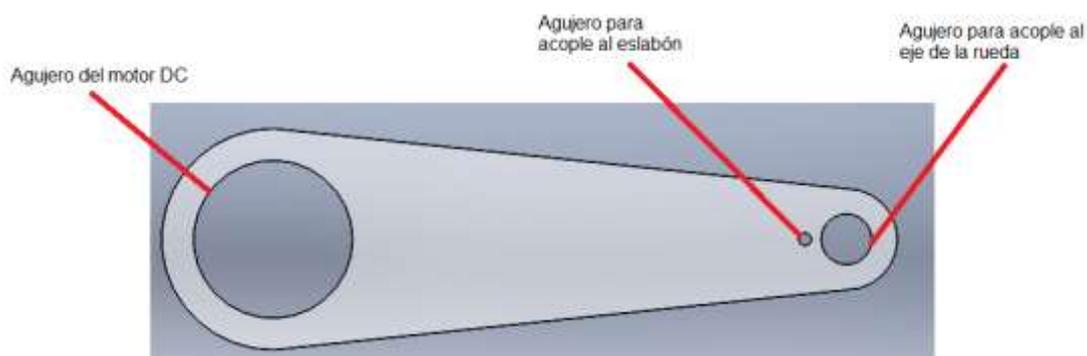


Figura 34. Diseño terminado Brazo de acrílico

El proceso de fabricación de este brazo fue corte por CNC. Las características finales son:

Peso: 30 gramos

Espesor: 10 mm

Este brazo permite una elevación de 4 cm de la rueda móvil es decir, que aumenta en un 80% la capacidad de pasar por los obstáculos con respecto al funcionamiento sin levantar las ruedas delanteras.

Este sistema de transmisión y locomoción se repite cuatro veces, para cada lado y para cada vagón.

3.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El diseño de la estructura del robot está basado principalmente en facilidad de construcción y simplicidad, por lo que se seleccionó la forma más simple que es un rectángulo quitando partes frontales para no impedir el movimiento de las ruedas móviles, ni tampoco chocar al acercarse a los obstáculos.

Para fines didácticos se optó por hacer visible toda la parte interna del robot móvil por lo que se hizo indispensable hacer una estructura firme que pueda soportar todo el requerimiento de peso y esfuerzo mecánico y cubierta con planchas de acrílico. Para eso fue seleccionado el perfil cuadrado de Aluminio anodizado de 19 mm, el más pequeño que comercialmente fue encontrado. (Figura 35)

Las dimensiones de la estructura están basadas en las siguientes consideraciones:

- **Altura de la estructura:** Altura que sube la rueda móvil más el espacio vertical que ocupa la fuente de alimentación ubicado sobre los motores.

- Ancho de la estructura: Se ha tomado como consideración el espacio que ocupan los motores, más el largo del motor de giro y también para darle una mayor estabilidad.
- Largo de la estructura: Esta dimensión está relacionado con la dimensión del sistema de transmisión, que por su parte dependen de las dimensiones de las ruedas y rodillos.

Las dimensiones de la estructura final para los dos vagones son:

Alto: 164 mm X Largo: 338 X Ancho: 321 (Figura 35)

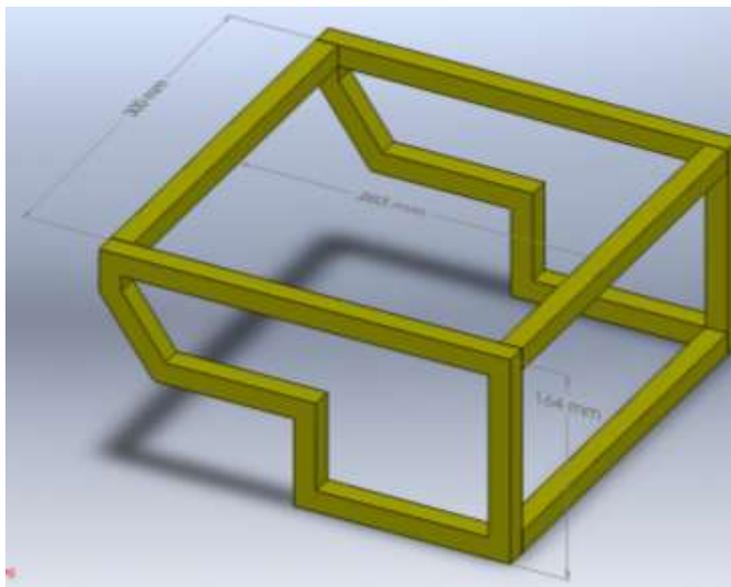


Figura 35. Dimensiones de la estructura de aluminio

Teniendo diseñado la estructura se puede hacer el montaje del sistema de locomoción, primero asegurando los motores DC que van acoplados a los rodillos mediante una base que va atornillado en la cara frontal del motor y atornillado también a la estructura. (Ver figura 36)

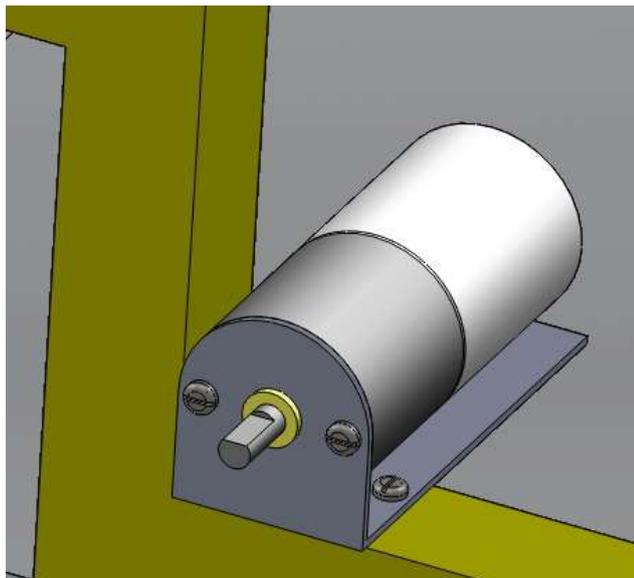


Figura 36. Acoplamiento del motor DC a la estructura de acrílico

Una vez fijado los cuatro motores a la estructura se acoplan los rodillos con el prisionero a los motores y las ruedas fijas a la estructura.

Para las ruedas móviles, primero se debe posicionar el servomotor en el lugar correcto, asegurarlo y acoplar los brazos articulados al mismo. El eje de la rueda móvil irá en el agujero diseñado para este propósito en el brazo articulado.

El acople del servomotor, como se mencionó anteriormente tiene un diámetro de 40 mm y va unido por medio de un sujetador que es una barra simple al brazo móvil de acrílico lo más cerca posible al agujero de la rueda. El servo motor está colocado exactamente encima del brazo móvil de la forma que el sujetador en posición inicial tiene una forma vertical, de la misma forma en posición levantada de la rueda , el servomotor ha girado 180° y nuevamente el sujetador queda en dirección vertical.

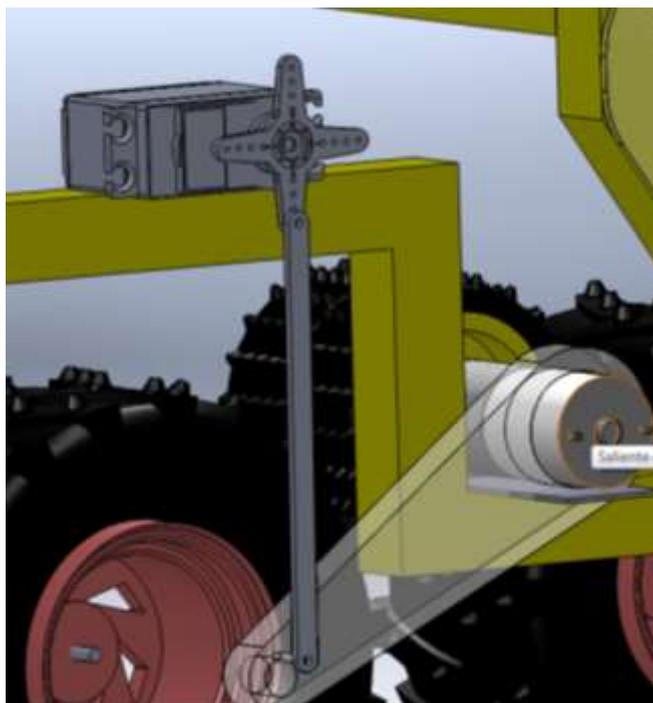


Figura 37. Posición inicial del mecanismo

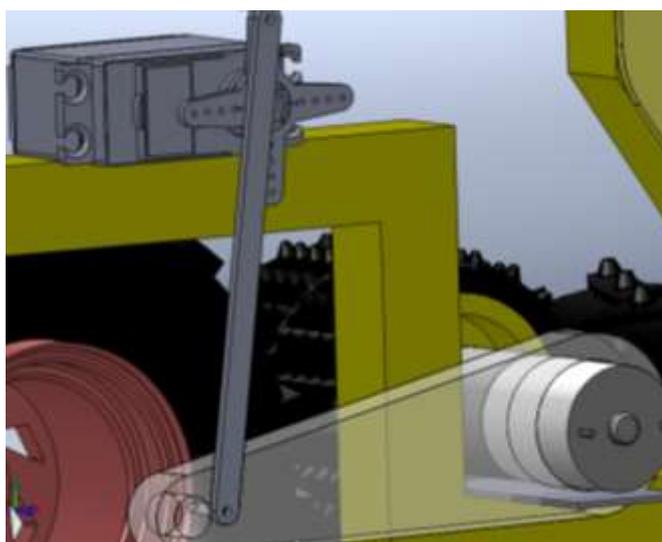


Figura 38. Posición levantada del mecanismo

El largo del sujetador es la distancia que separa el punto de sujeción del acople del servomotor y el brazo móvil de acrílico, en posición inicial. Esta distancia es físicamente medida y tiene un valor de 85 mm.

El diseño de la unión se trata de dar un solo grado de libertad a la unión entre vagones tipo cilíndrica de que cada vagón gire en su propio eje, por lo tanto se diseña una unión parecido a un tubo que vaya sujetado por sus dos extremos a los dos vagones, como se muestra en la figura 39.

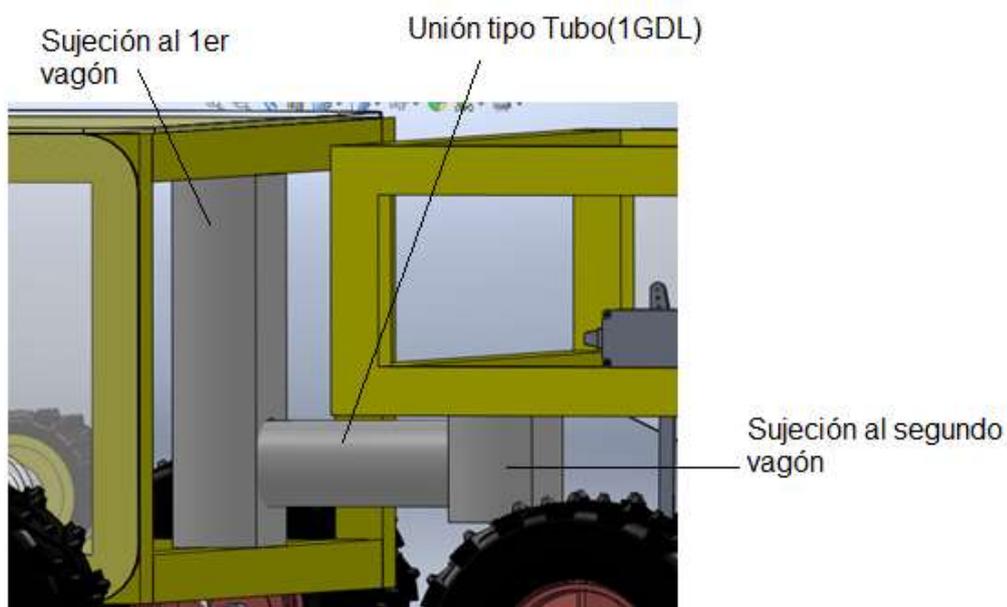


Figura 39. Unión de los vagones de 1 GDL

Esta unión fue diseñada para dar más robustez al Robot Móvil y para soportar los choques, golpes y vibraciones

Terminando el montaje del sistema de locomoción los vagones quedarían como se muestra en la figura 40 y 41.

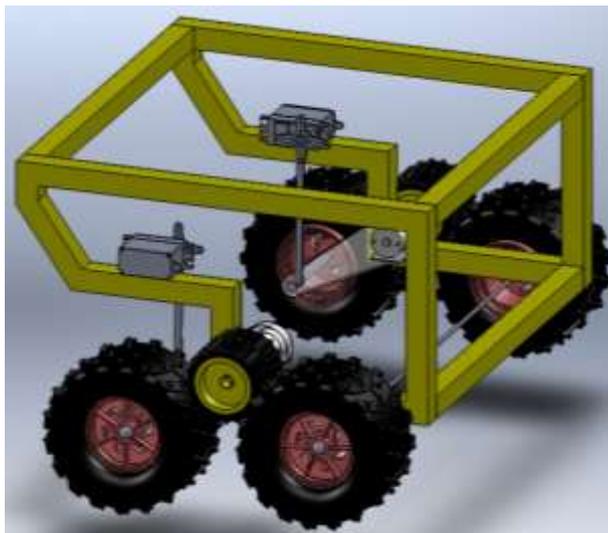


Figura 40. Vagón delantero terminado

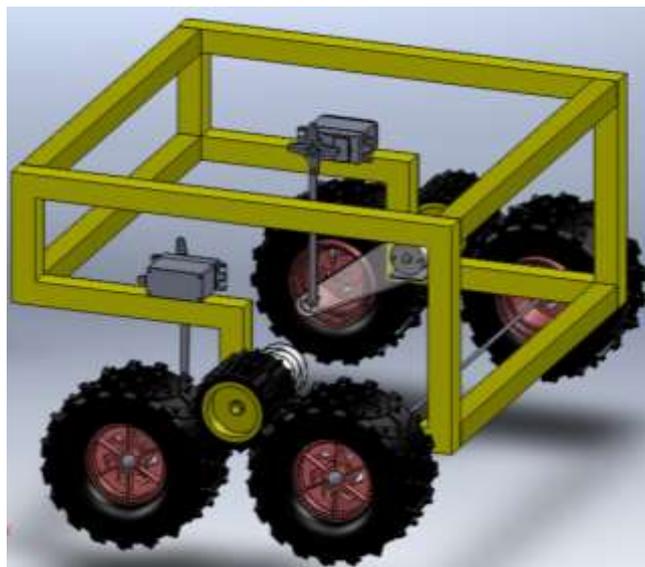


Figura 41. Vagón posterior terminado

3.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Cada vagón tiene diferente peso y por lo tanto diferente centro de masa además de que sus estructuras varían un poco en la parte frontal. Como ejemplo a continuación tomaremos uno de los vagones, ya que el comportamiento y el equilibrio son iguales en los dos.

- Vagón delantero:
 - Peso diseñado: 3507.27 gramos
- Vagón posterior:
 - Peso diseñado: 3287.44 gramos

El Centro de masa se muestra en la figura 42, en vista lateral y en la figura 43 en vista superior.

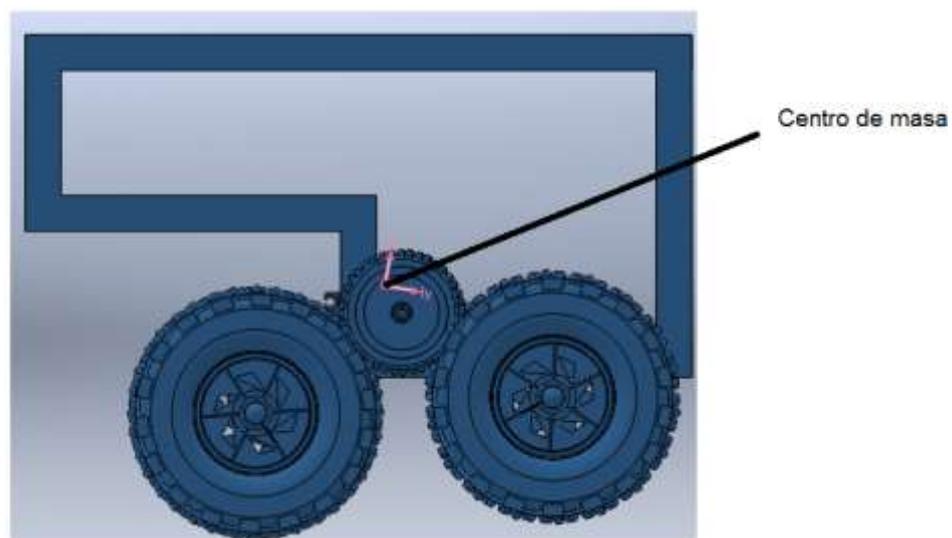


Figura 42. Vista lateral del centro de masa del vagón

El vagón posterior al tener las ruedas en posición normal (no levantada), tiene cuatro puntos de apoyo (ver figura 42), pero cuando las ruedas suben debido a cambio de centro de masa y no tener apoyo el vagón tiende a inclinarse para adelante. (Ver figura 43 y figura 44).

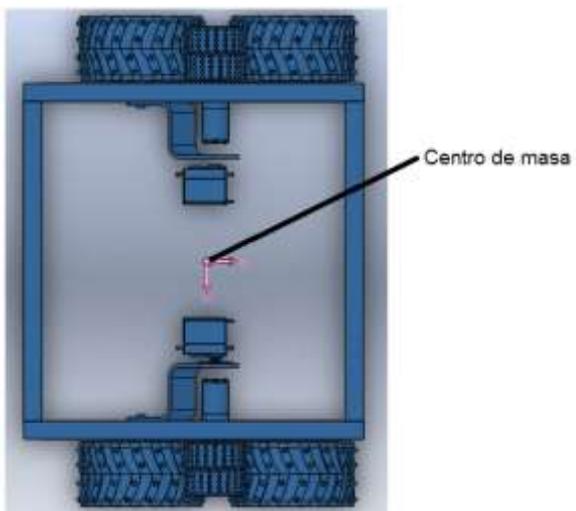


Figura 43. Vista superior del centro de masa del vagón

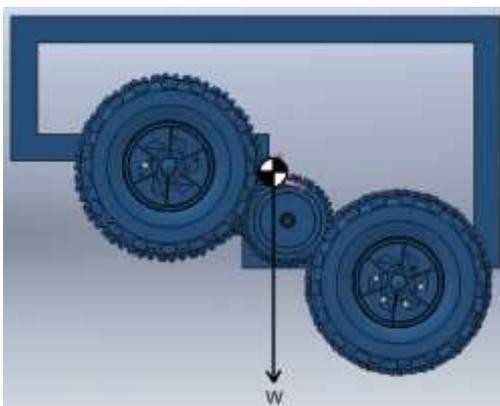


Figura 44. Vagón en estado de ruedas alzadas

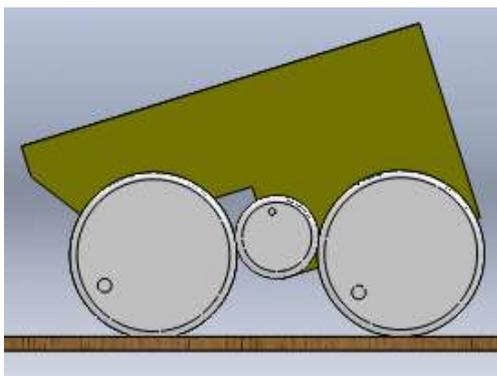


Figura 45. Vagón cae por efecto de gravedad y falta de puntos de apoyo

Este problema se soluciona al conectar los dos vagones, ya que el centro de gravedad de todo el conjunto de elementos que componen al robot, se

mueve hacia la unión y para ese punto el robot cuenta con un total de 8 puntos de apoyo en posición normal, es decir 4 puntos de apoyo a cada lado del centro de masa (ver figura 46 y figura 47) y en caso de estar en posición de subida (levantadas las ruedas móviles), tiene un total de 4 puntos de apoyo o 2 puntos de apoyo a cada lado del centro de masa (ver figura 48). El peso total diseñado es de : 6848.98 gramos.

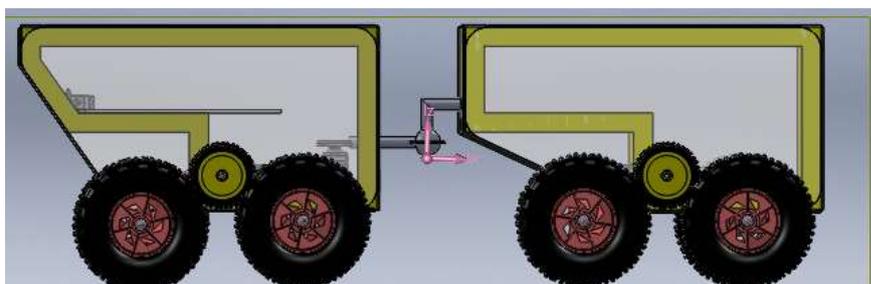


Figura 46. Centro de masa del robot en posición normal (vista lateral)

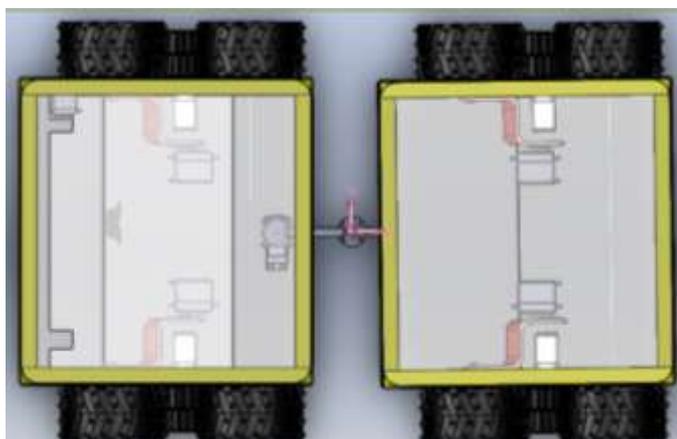


Figura 47. Centro de masa del robot en posición normal (vista superior)

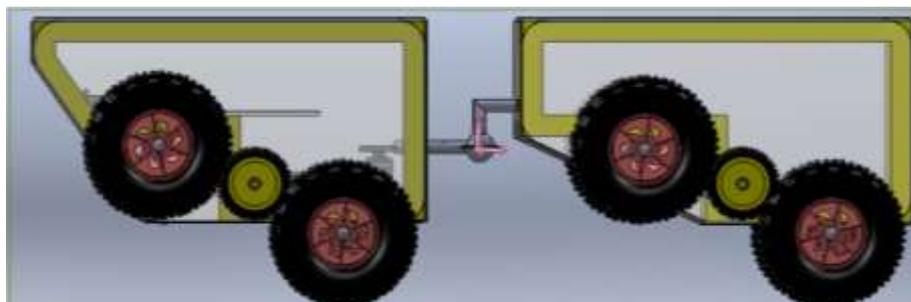


Figura 48. Centro de masa del robot en posición de subida (vista superior)

A continuación se analizará la estabilidad y el equilibrio de la estructura del robot en varias posiciones en los que puede enfrentarse mientras está en movimiento.

3.4.1. POSICIÓN EN MOVIMIENTO EN SUPERFICIE RECTO

En esta posición, si la superficie es sin obstáculos y recto, el robot se encuentra con las ruedas móviles en posición normal por lo que su estado de estabilidad es igual que en estado de posición parada.

3.4.2. POSICIÓN EN MOVIMIENTO EN SUPERFICIE IRREGULAR

En una superficie irregular puede haber obstáculos que afecten la estabilidad del robot, por esta razón la unión tipo cilindro está diseñado para que cada vagón pueda girar alrededor de su propio eje, de este modo en caso de que una de las ruedas del vagón pase por un obstáculo pequeño no afectará la estabilidad de todo el robot en conjunto. (ver figura 49 y figura 50).



Figura 49. Vista posterior del robot pasando por un pequeño obstáculo

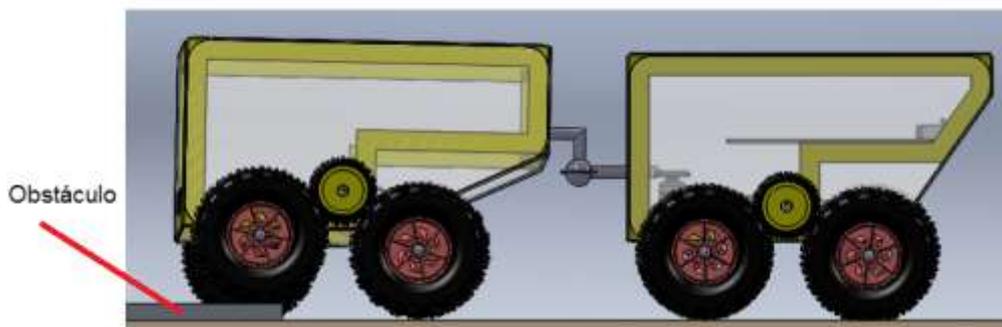


Figura 50. Vista lateral del robot pasando por un pequeño obstáculo

Como se puede ver en la figura 54, el vagón posterior supera el obstáculo sin que el primer vagón se vea afectado y tome el mismo ángulo de inclinación del segundo vagón.

Por otro lado se analiza la estabilidad de los vagones, la elevación máxima que puede inclinarse cada vagón para subir obstáculos o para pasar un obstáculo.

Cuando los vagones pasan por un obstáculo, el robot lo podrá superar si su altura no sobrepasa los 10 cm, eso debido a la tracción que se necesita para vencerlo, pero analizándolo desde el punto de vista de estabilidad el robot como una estructura podría soportar una inclinación equivalente a un obstáculo o una rampa de hasta 20 cm (lo que representa un ángulo de 34° de la base con respecto a la horizontal), en uno de sus lados sin perder el equilibrio y volcarse. Esta estabilidad es debido al ancho del robot, lo que hace que el centro de masa se mantenga dentro de los límites de estabilidad de la estructura, además la distribución completamente simétrica de los elementos tanto en peso como en ubicación facilita a que el centro de masa siempre se encuentre en la mitad. Esa situación está mostrada en la figura 51 y figura 52.

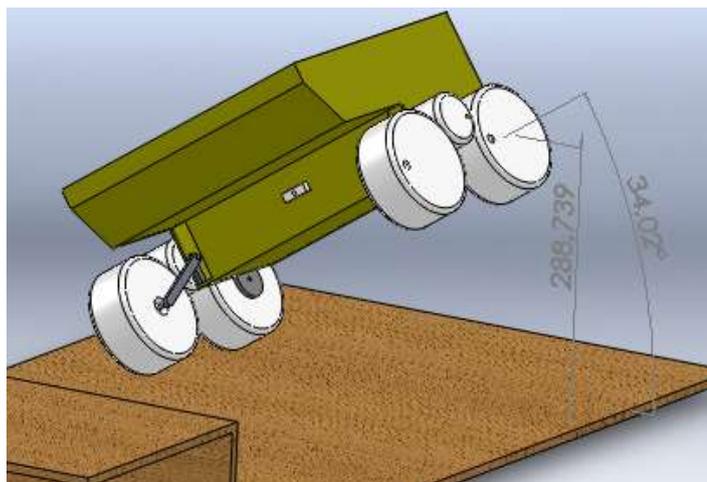


Figura 51. Máxima inclinación del robot (Vista isométrica)

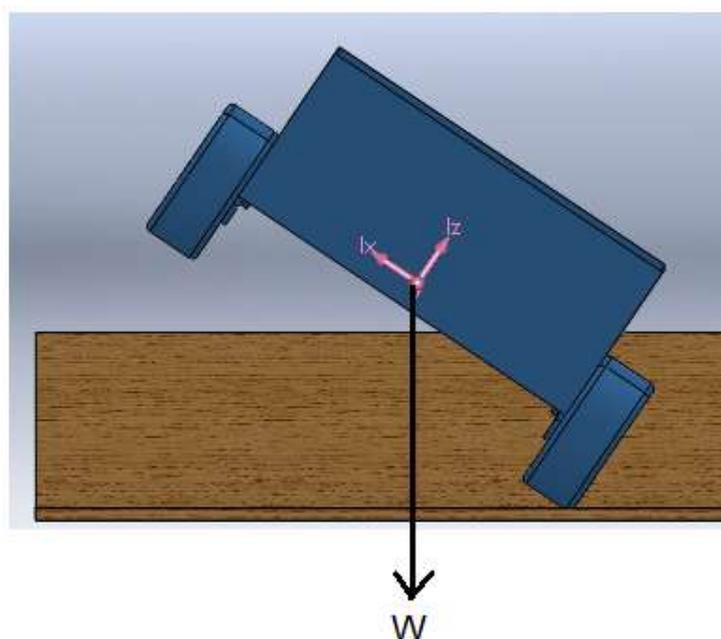


Figura 52. Máxima inclinación del robot (Vista posterior)

Cuando el robot se encuentre subiendo los obstáculos tiene la capacidad de subir obstáculos con una altura máxima de 10 cm, pero nuevamente analizándolo desde el punto de vista de estabilidad la estructura soporta una inclinación de 56° de la base con respecto a la horizontal equivalente a un obstáculo de aproximadamente 17,5 cm, cabe recalcar que esta inclinación es de la estructura del robot y no incluye el peso de la fuente de

alimentación. En la figura 53 se muestra la máxima altura que podría subir el robot.

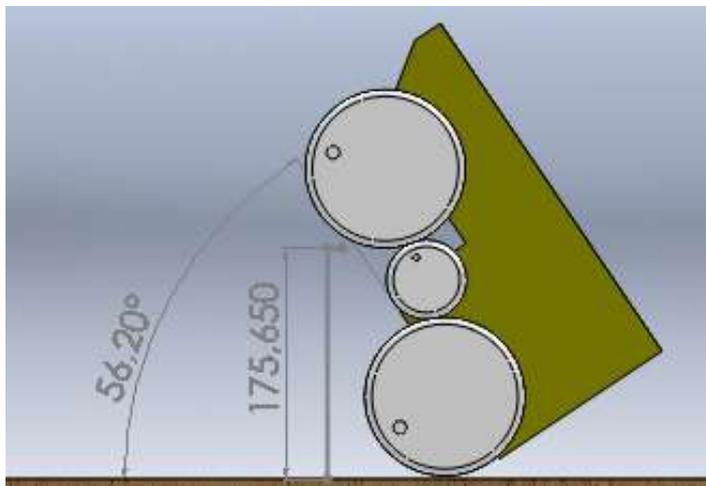


Figura 53. Máxima altura que sube el robot

3.5. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO

Este sub-capítulo se enfoca a verificar el diseño mecánico, en lo que es esfuerzos y calcular los torques que necesitarían los motores para cumplir con los requerimientos de diseño.

Un elemento importante de este análisis es la velocidad del robot en movimiento, para eso están a continuación los datos del motor DC.

Los motores DC que generan el movimiento del robot tienen una reducción de 75:1, esta relación quiere decir que por cada 75 revoluciones del Motor, habrá una revolución a la salida de la caja de reducción. El Motor DC tiene una velocidad a la salida de la caja reductora de 75 rpm, para calcular la velocidad con la que el robot se desplaza se procede a realizar los cálculos descritos a continuación:

Velocidad angular del rodillo ω_r :

$$\omega_r = 75 [rpm]$$

Radios de las ruedas r_u y del rodillo r_r :

$$r_u = 60 [mm]$$

$$r_r = 30 [mm]$$

Cálculo de velocidad angular de las ruedas ω_u , utilizando la ecuación 3:

$$\omega_u = \left(\frac{\omega_r}{r_u}\right) * r_r [rpm]$$

$$\omega_u = \left(\frac{75}{60}\right) * 3030 = 32.5 [rpm]$$

Ésta velocidad angular nos indica que debido a que el radio de las ruedas es el doble del radio del rodillo, la velocidad se reducirá a mitad.

Cálculo de velocidad tangencial del robot V_t , utilizando la ecuación 2:

$$V_t = \omega_u * r_u \left[\frac{m}{s}\right]$$

Para eso primero se hará la transformación de unidades:

$$\omega_u = 32.5 \left[\frac{rev}{min}\right] * \left[\frac{2\pi rad}{1 rev}\right] * \left[\frac{1 min}{60 s}\right]$$

$$\omega_u = 3.403 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$r_u = 60[mm] \left[\frac{1 m}{1000 mm}\right]$$

$$\omega_u = 0.06 [m]$$

$$V_t = 3.403 \left[\frac{rad}{s} \right] * 0.06[m]$$

$$V_t = 0.204 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Esta velocidad significa aproximadamente que el robot se desplaza linealmente 20 centímetros aproximadamente por segundo.

La velocidad nominal del motor se considerará como la velocidad máxima a la que se podrá llegar, ya que la velocidad real del robot será menor por las cargas, fuerzas de fricción y fuerzas que se opongan al movimiento del mismo.

3.5.1. ANÁLISIS DE ESFUERZOS

El análisis de esfuerzo se debe realizar a los componentes que sufren la aplicación de una fuerza o torque, que podría afectar al funcionamiento correcto del robot. En ese caso, la estructura del robot es un componente muy importante ya que además de contener al resto de los elementos también podría sufrir un golpe o caída. Para eso la estructura deberá mantener su forma para proteger a los equipos y circuitos que se encuentran dentro de ella.

Para ello calcularemos las fuerzas que posiblemente le afectarán, el primer caso es suponiendo que habrá un choque frontal, es decir una colisión entre la estructura y un obstáculo frontal a la máxima velocidad del robot:

Calcularemos la cantidad de movimiento que se transmite al robot en caso de un choque, suponiendo que es un choque perfectamente elástico, utilizando la ecuación 5:

$$p = m * v$$

Teniendo la masa total de Robot:

$$m = 7.4 \text{ Kg}$$

La velocidad:

$$v = 0.204 \text{ m/s}$$

Por lo tanto la cantidad de movimiento o impulso es de:

$$p = 7.4[\text{kg}] * 0.204 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$p = 1.5096 \left[\frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}} \right]$$

Para sacar la fuerza media con la que la estructura se choca, consideraremos una deformación de choque de 0.5 mm, y se aplica la ecuación 6:

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$$

$$a = \frac{-v_i^2}{2\Delta x}$$

$$a = \frac{-(0.204)^2}{2(0.005)}$$

$$a = -4.1616 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta t = \frac{v_f - v_i}{a}$$

$$\Delta t = \frac{-(0.204)}{-(4.1616)}$$

$$\Delta t = 0.049[s]$$

Teniendo el tiempo de choque se puede calcular la fuerza media:

$$F_m = \frac{p}{\Delta t}$$

$$F_m = \frac{1.5096}{0.049}$$

$$F_m = 30.808[N]$$

Entonces la fuerza con la que el robot chocaría con un objeto en su parte frontal a su máxima velocidad, es de 30.8 [N], aplicando esta fuerza a las partes afectadas de la estructura se obtiene un resultado de la deformación máxima y posibles puntos de falla.

El primer elemento afectado es el acrílico de la parte frontal, que éste debido a que está perfectamente en contacto con el perfil de aluminio transmite esa fuerza al perfil, a continuación se hará el análisis de esfuerzos que genera como resultado la deformación que produce ese golpe y dónde estaría el punto de falla.

Todos los análisis de este proyecto están realizados en el programa de modelamiento mecánico llamado Solidworks.

Como se muestra en la figura 54, se selecciona la parte inferior del perfil de aluminio como la superficie de sujeción, es decir que es la sección fija y

no tendrá ninguna deformación. La fuerza que se le aplicará es debido a un choque frontal por esta razón se le considera como paralela a la superficie.

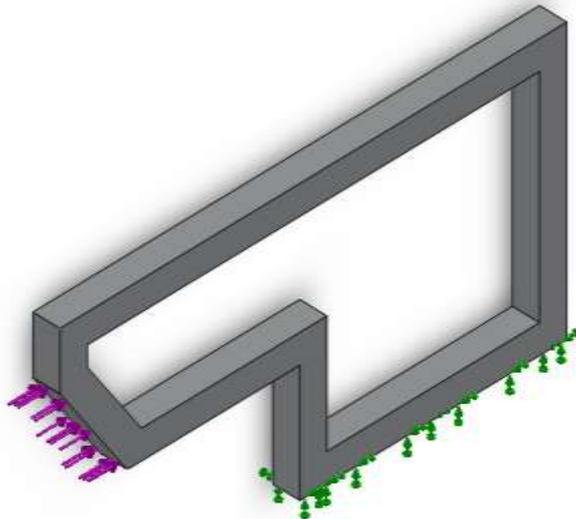


Figura 54. Sección de sujeción y aplicación de fuerza

Al aplicar esta fuerza, el cuerpo sufre una deformación en toda su amplitud, el simulador utiliza el método de elementos finitos y mallas para realizar este estudio (ver figura 55).

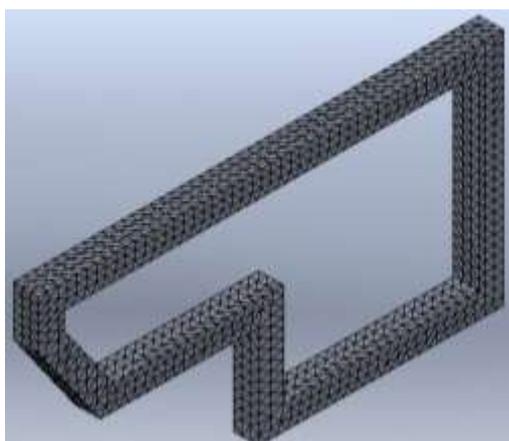


Figura 55. Malla de estudio por método de elementos finitos

Como se puede ver en la figura 59 el resultado de desplazamiento y deformación que sufre el cuerpo es de:

- Mínimo : Alrededor de la zona de sujeción (0 mm)
- Máximo: La zona más lejana a la sección fija y cercana a la zona de aplicación de fuerza (0.0677 mm)

Como se puede ver en la figura 56, el desplazamiento es menor en la parte inferior y mientras más se aleja tiene mayor desplazamiento

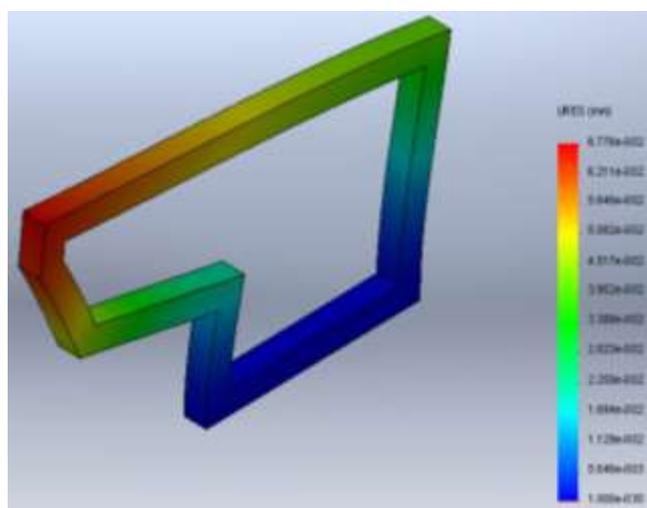


Figura 56. Desplazamientos

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión y se usa en el contexto de teoría de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. El simulador utiliza ésta teoría para determinar el esfuerzo máximo, como se puede observar los posibles puntos de fallo son las uniones cerca de la zona de sujeción, justamente debido al desplazamiento que hay los valores son:

- Máximo σ : 7.663 MPa
- Mínimo σ : 0.0005575 MPa

El límite elástico del material del perfil, Aluminio 6063 es de 90 MPa, este valor está muy por encima de la máxima tensión, por lo que no habrá fallas o roturas en estas partes (ver figura 57).

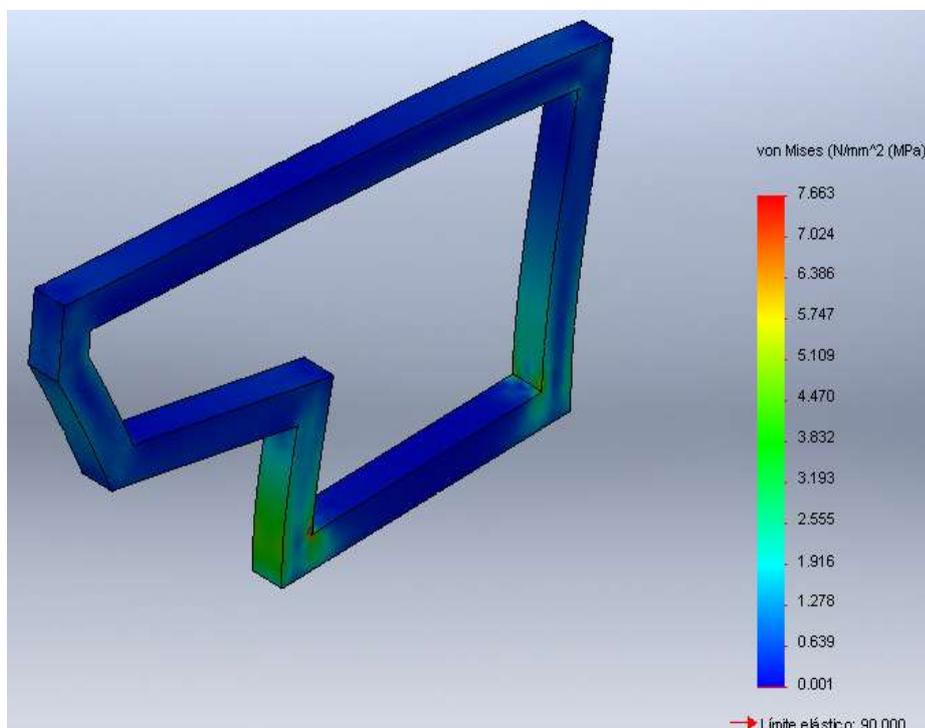


Figura 57. Tensiones – Análisis de fallo

Como se mencionó anteriormente el acrílico es el primer elemento que recibe el choque frontal pero su existencia es justamente para proteger la parte interna de la estructura, por lo tanto que pueda romperse es de poca importancia, por esta misma razón, su desmontaje y cambio es muy fácil.

3.5.2. ANÁLISIS DE TORQUE

El análisis de torque se debe hacer para la selección correcta de los motores, para esto se realiza el diagrama de cuerpo libre (Figura 58) y se calcula el peso que debe mover el motor que sería la fuerza y medir la

distancia desde el eje de rotación hasta el punto de concentración de la fuerza de peso.

EL primer motor a analizar es el motor DC de movimiento del robot en general, para lo cual se tiene los siguientes datos:

Masa total del robot: 7 Kg Aproximadamente

Masa por cada rueda: $7\text{Kg} / 8(\text{motores}) = 0.875 \text{ Kg}$

Distancia al centro de la rueda (eje de rotación): 60 cm

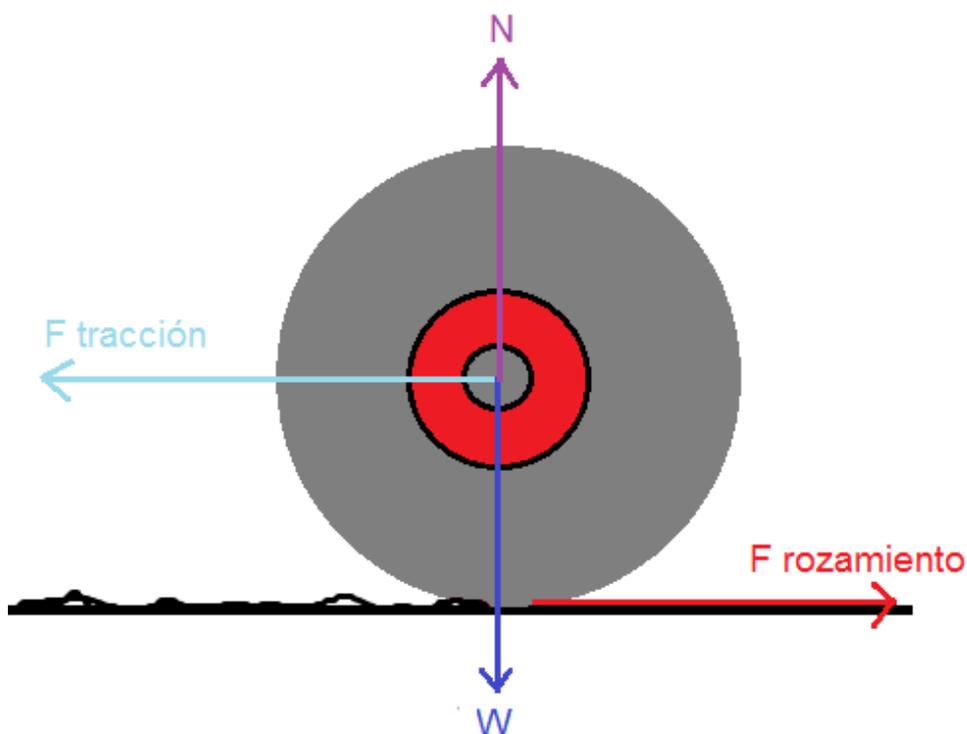


Figura 58. Diagrama de cuerpo libre

El torque que debe tener cada rueda es calculado de la siguiente manera:

Coefficiente de rozamiento estático entre caucho y concreto:

$$\mu_s = 1$$

$$\mu_k = 0.8$$

Fuerza de rozamiento máximo:

$$F_{\text{rozamiento max}} = N * \mu_s$$

Para el cálculo de la fuerza normal se debe hacer la sumatoria de fuerzas en estado estacionario:

$$\sum F_y = 0$$

$$N = W$$

El peso que soporta cada rueda es:

$$W = M * g$$

$$W = 0.875[Kg] * 9.8\left[\frac{kg}{m^2}\right]$$

$$W = 8.575 [N]$$

$$N = 8.575 [N]$$

La fuerza de rozamiento entre rueda y el piso:

$$F_{\text{rozamiento max}} = 8.575[N] * 1$$

$$F_{\text{rozamiento max}} = 8.575[N]$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{\text{rozamiento max}} = F_{\text{tracción}}$$

$$F_{\text{tracción}} = 8.575[N]$$

Esta fuerza de tracción (Figura 59) es la que se debe transmitir desde el rodillo hacia la rueda móvil con esta fuerza se calculará el torque que debe tener el motor.

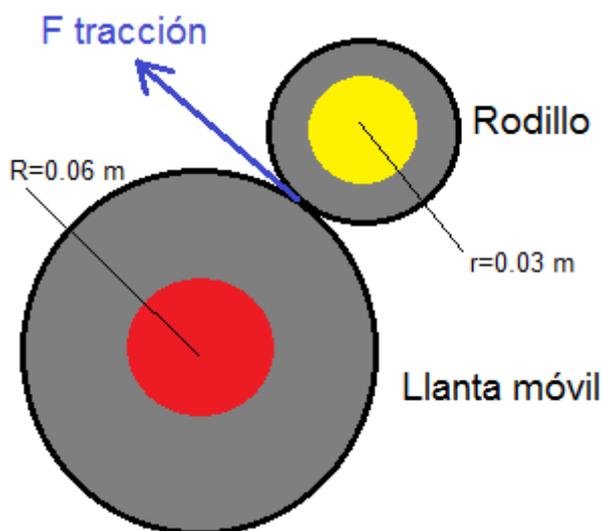


Figura 59. Fuerza de tracción entre rodillo y rueda móvil

Como se puede observar en la figura 59, la fuerza de tracción es común entre el rodillo y la rueda, por lo que para calcular el torque que debe tener el motor que va directamente acoplado al rodillo, se tomará los datos del rodillo:

$$T = F * r$$

$$T = 8.575[N] * 0.03[m]$$

$$T = 0.25725 [N.m]$$

Este valor de torque de 0.26 N.m. es para poder mover una sola rueda pero el sistema de transmisión se compone de dos ruedas, las dos ruedas tienen exactamente las mismas características y condiciones, por lo tanto el valor del torque que debe ser transmitido se duplica.

$$T = 0.25725 [N.m] * 2$$

$$T = 0.5145 [N.m]$$

Por consideraciones de que pueda haber terrenos de mayor coeficiente de fricción y pérdidas de torque por deslizamiento se tomará en cuenta un 20% más de torque para la selección del motor DC.

$$T = 0.51[N.m] + 0.51[N.m] * 20\%$$

$$T = 0.6174[N.m]$$

El motor seleccionado para el movimiento del robot debe tener como requisito de torque un mínimo de 0.62 N.m.

Ahora se procederá a calcular el torque necesario para el servomotor que subirá la rueda móvil, de la misma manera que se explicó anteriormente.

- Masa del brazo móvil: 150 gr
- Masa de la rueda y el acople: 235 gr
- Distancia del punto de rotación hasta el centro de masa del brazo: 32.5 mm (Ver figura 62)
- Distancia del punto de rotación hasta el centro de aplicación del peso de la rueda móvil: 99.88 mm (Ver figura 62)

Cálculo de peso de la rueda y el acople:

$$W = m * g$$

$$W = 0.235[Kg] * 9.8\left[\frac{kg}{m^2}\right]$$

$$W = 2.303[N]$$

Cálculo de peso de la rueda y el acople:

$$W = m * g$$

$$W = 0.150[Kg] * 9.8\left[\frac{kg}{m^2}\right]$$

$$W = 1.47 [N]$$

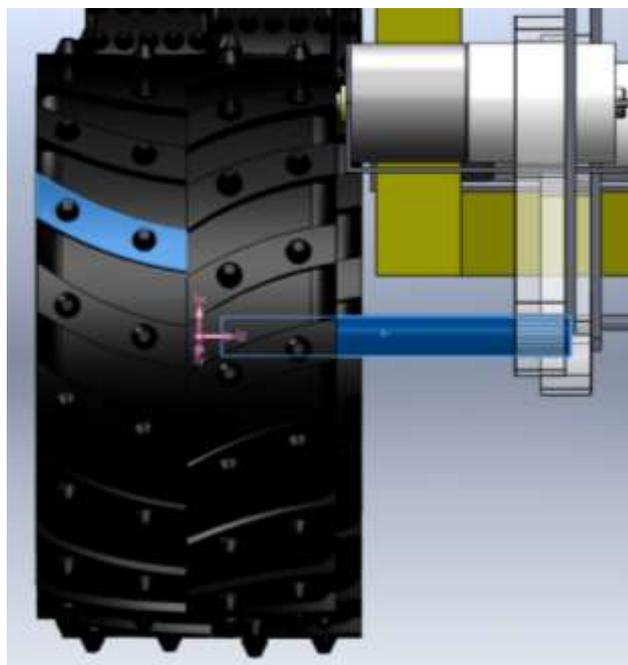


Figura 60. Centro de masa de la rueda y el acople

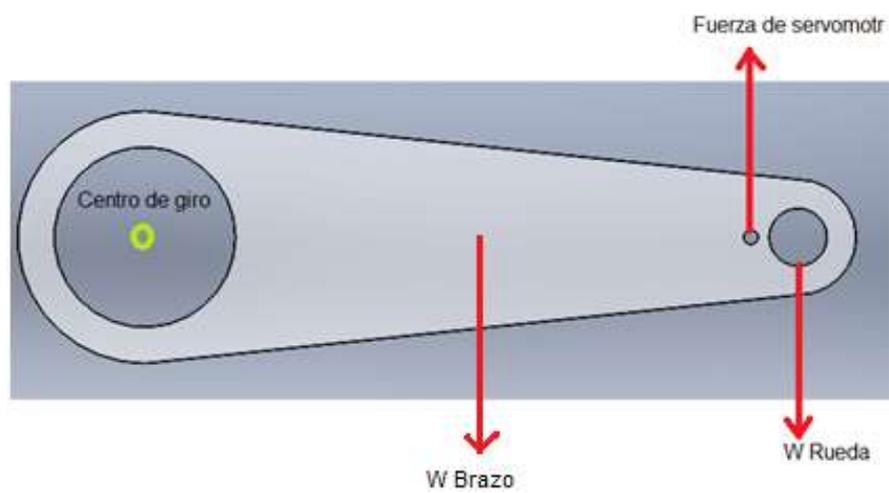


Figura 61. Diagrama de cuerpo libre del brazo móvil

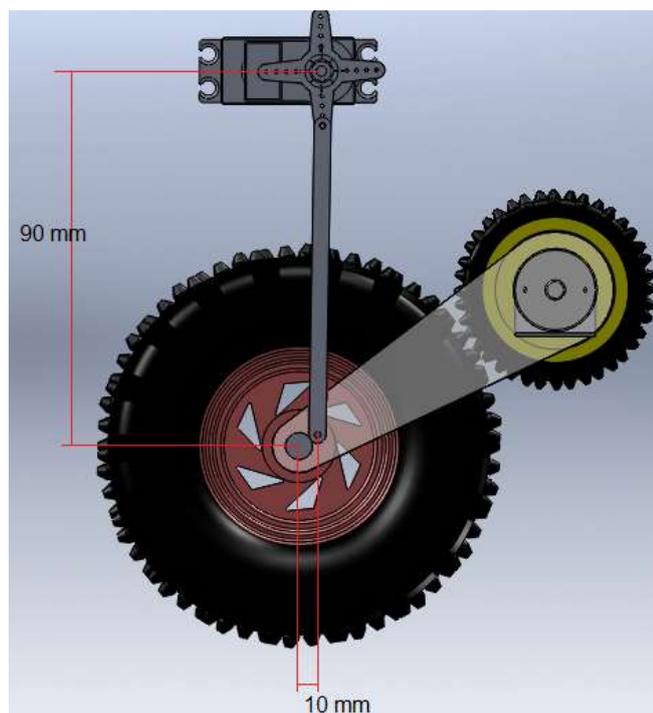


Figura 62. Distancias de cálculo de torque

Cálculo de torques:

$$T_{brazo} = 1.47[N] * 0.0325[m]$$

$$T_{brazo} = 0.047775[N * m]$$

$$T_{rueda} = 2.303[N] * 0.09988[m]$$

$$T_{rueda} = 0.23 [N * m]$$

$$T_{total} = 0.0477 [N * m] + 0.23 [N * m]$$

$$T_{total} = 0.277[N * m]$$

El torque del Servomotor para levantar las ruedas delanteras debe ser de 0.28 N.m.

3.6. SÍNTESIS DEL MECANISMO

A continuación se realiza una síntesis del mecanismo realizado con método de generación de funciones gráficas.

En este método se analiza gráficamente si es que el mecanismo cumple con su función y se puede determinar la distancia que se eleva la rueda móvil. Para esto se realiza un bosquejo la posición inicial y final del mecanismo sobreponiéndolos en la misma gráfica. El arco \widehat{ac} , es la trayectoria que traza el brazo de acrílico durante su recorrido, por lo tanto como se puede apreciar en la figura 63, la mitad de la cuerda \overline{ac} , es el radio de giro ($r = 40$ mm).

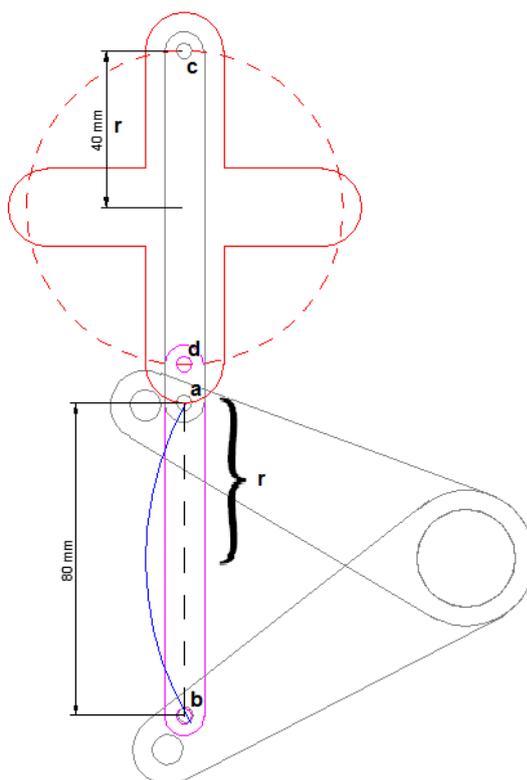


Figura 63. Generación de funciones gráficas

3.7. MODELAMIENTO DEL SISTEMA MULTICUERPO EN SOFTWARE COMERCIAL

Para la verificación del funcionamiento de las partes mecánicas, es necesario realizar el modelamiento en un software que tenga la suficiente capacidad de realizar ciertas simulaciones que aprueban el diseño mecánico y comprueben su funcionamiento.

En este proyecto, el diseño fue modelado en Solidworks, que es un software para realizar el diseño de las partes mecánicas en 3 dimensiones (3D), y el ensamblaje completo del Robot. En este programa se puede realizar análisis de esfuerzos, como fue expuesto en el Capítulo 3.3. del presente proyecto (*Análisis de esfuerzos*), análisis térmico, análisis de fluidos, etc. . El modelamiento en 3D permite hacer una construcción virtual de la estructura ubicando todos los componentes que realmente tendrá, de esta forma es fácil verificar espacios y observar los errores de diseño y problemas que se prevean que ocurran.

Para este proyecto fue muy útil realizar el modelamiento, ubicación y el acople de las ruedas móviles, ubicación de los motores y servomotores y el diseño de la rótula de ubicación de los dos vagones. También se realizó la verificación de las relaciones de giro entre el rodillo y las ruedas entre otros. En la figura 72, se muestra el robot ensamblado completamente.

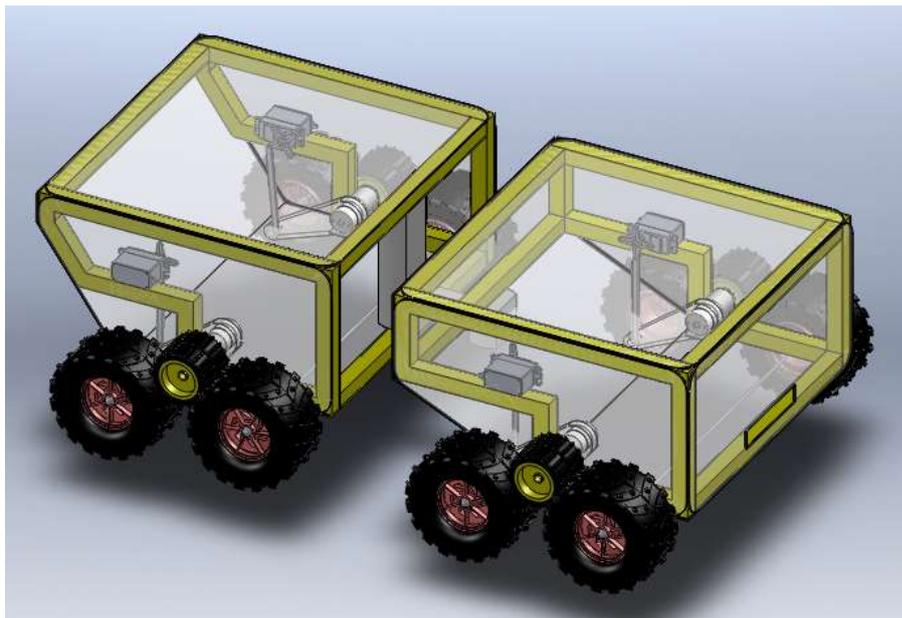


Figura 64. Modelamiento del Robot en Solidworks

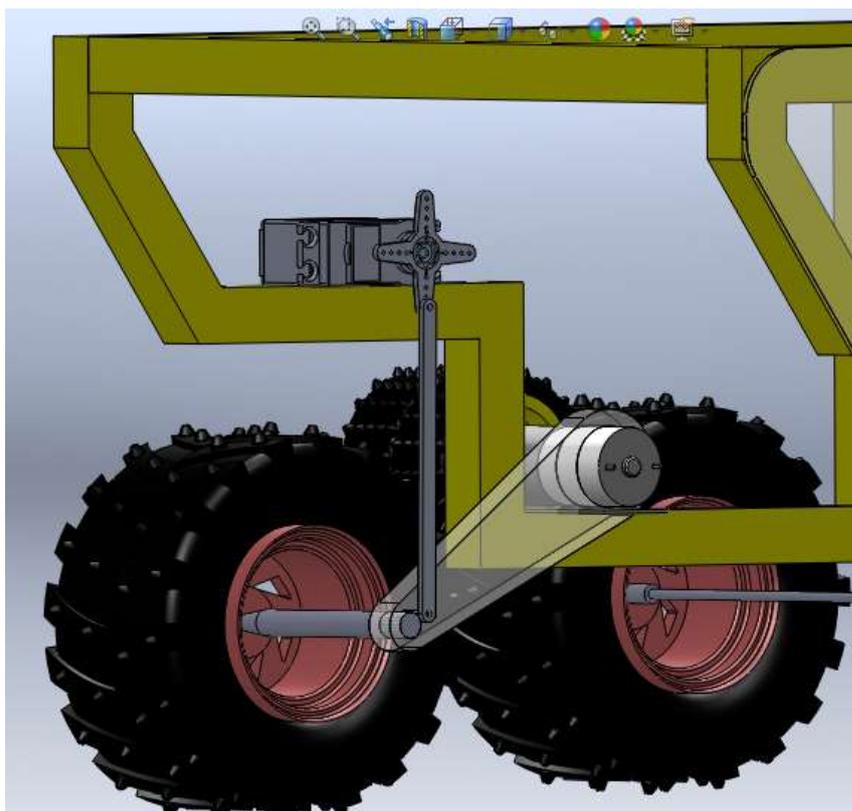


Figura 65. Mecanismo para subir la rueda móvil

También se realizó la simulación de este mecanismo en el programa de simulación de mecanismos 2D, esta simulación ayuda a verificar el

funcionamiento del mecanismo con las dimensiones diseñadas y medir la distancia que se subiría la rueda, que es el diámetro del acople del servomotor, en este caso se ha seleccionado el acople más grande de un diámetro de 40 mm. (ver figura 66)

En esta simulación se pudo medir algunas variables que serán de mucha ayuda como por ejemplo el torque necesario para levantar la rueda, que según los resultados obtenidos es variable dependiendo del ángulo en que se encuentra el servomotor. También se puede medir otras variables como el ángulo de giro del sujetador, verificar la trayectoria que recorre la rueda y la distancia máxima. La gráfica del Torque del servomotor está mostrado en la figura 67.

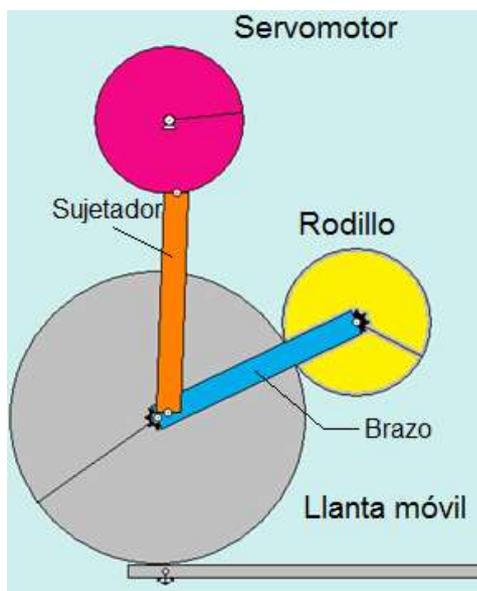


Figura 66. Simulación Working Model

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, el torque del motor llega a su máximo valor que es 120.830 N.mm, en casi la mitad de la trayectoria

cuando lo está subiendo, eso debido a que en esa posición todos los objetos del mecanismo tienen el peso completamente apoyado sobre el sujetador.

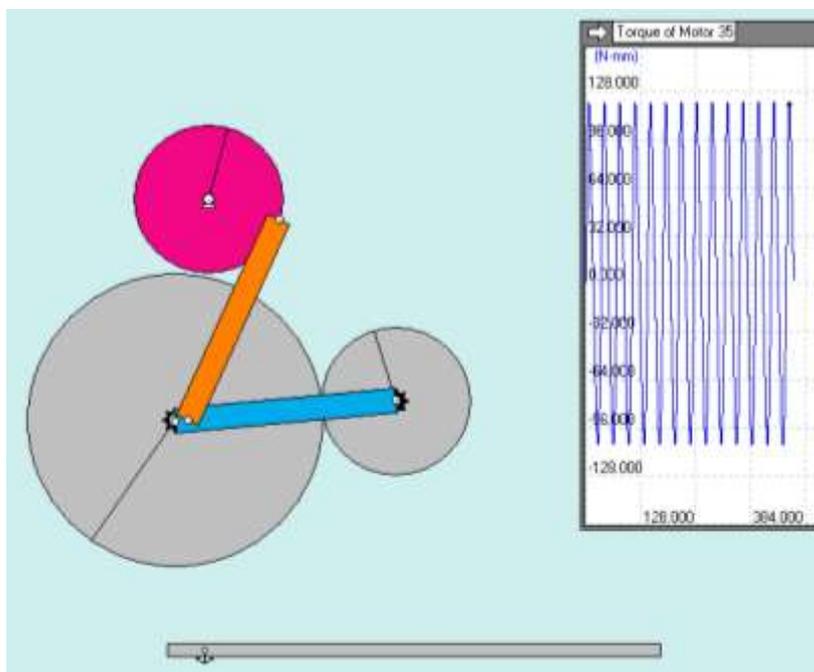


Figura 67. Posición de máximo valor del torque

CAPÍTULO IV

DISEÑO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

En el presente capítulo se detalla los criterios de diseño, selección de actuadores y sensores seleccionados para la implementación de los circuitos eléctricos y electrónicos.

4.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El diseño del sistema de control para el robot móvil, por las características de la aplicación, se precisa un sistema de lazo cerrado que involucra todas las variables a intervenir como se define en la figura 68:

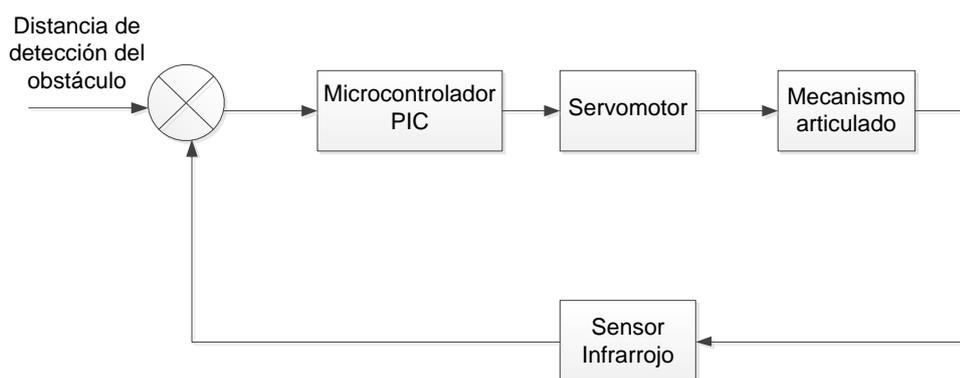


Figura 68. Lazo de sistema de control

En donde la entrada del sistema de control se define como la distancia máxima de detección del obstáculo que puede percibir el robot móvil, se realiza la comparación del lazo entre la medida del sensor infrarrojo y la entrada del sistema para que posteriormente esta información se procese en el microcontrolador (PIC) que a su vez envía la señal de control a los servo motores con la finalidad de posicionar las ruedas móviles a la posición inicial o final.

4.2. SENSORES Y ACTUADORES

4.2.1. SENSORES

Son dispositivos que miden cantidades físicas del medio en el que se desenvuelve; para el robot móvil, los sensores cumplen el objetivo fundamental de permitir la recepción de información desde el mundo que lo rodea.

El tipo de sensor depende de la propiedad física a medir, para el caso del robot móvil se necesita medir un obstáculo; la distancia en donde se encuentra posicionado y la altura de la misma, para esto se debe tener en cuenta los siguientes sensores de proximidad:

- Ultrasonido.
- Radar.
- Infrarrojo.
- Fines de carrera.
- Encoder lineal magnético.
- Sensor de distancia láser.

Dependiendo del medio en el que se va a desenvolver el robot móvil y la aplicación se realiza la selección del sensor más adecuado.

4.2.2. ANÁLISIS PARA SELECCIÓN DE LOS SENSORES

Para la selección del sensor que va a interactuar con el medio para la detección y medición de la grada se debe tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- Distancia mínima; que es la distancia a la cual es colocado el sensor de detección del obstáculo en el robot móvil con respecto a la superficie donde se encuentra posicionado, mecánicamente, esta distancia se consideró 0.18 metros por encima del nivel del robot.
- Distancia de trabajo; que se define como la distancia promedio a la cual el robot móvil va a posicionar sus ruedas móviles en posición final, la distancia de diseño es de 0.09 metros que representa una longitud suficiente para que el robot móvil pueda detectar el obstáculo y actuar para poder vencerlo.
- Altura máxima del obstáculo, que por motivos de diseño mecánicos se selecciona la altura de 0.10 metros.
- Requerimiento de baja potencia de consumo y de fácil montaje.
- Circuitería simple, sin necesidad de realizar una tarjeta electrónica para el envío de datos hacia el controlador, por motivos de ahorro de espacio dentro del robot.
- Existencia del sensor en el mercado.
- Sensor de fácil montaje que se acople de manera sencilla a la estructura mecánica del robot móvil.
- Costos del sensor.

Tomando en cuenta las consideraciones para la selección de los sensores, el sensor GP2D120 de SHARP es el más apto para la implementación en el robot móvil, presentando las siguientes características:

- Entrada analógica.
- Rango efectivo de detección de 4 – 30 centímetros.

- Tiempo de respuesta típico de 44 milisegundos.
- Corriente promedio de consumo de 33 miliamperios.

Los beneficios de utilizar un sensor infrarrojo con respecto a otros tipos de sensores se presenta a continuación:

- A diferencia de los sensores ultrasónicos, fines de carrera y encoder lineal magnético; el sensor infrarrojo detecta la ubicación del objeto a una distancia específica, necesaria para la detección de un obstáculo.
- La ergonomía del sensor GP2D120 de SHARP lo hace ideal para la ubicación de éste dentro del robot, sin ocupar mucho espacio físico que pueda interferir en el funcionamiento del robot.
- El sensor infrarrojo es más económico y comercial que otro tipos de sensores de detección.

4.2.3. ACTUADORES

Los actuadores en el robot móvil se encargan del desplazamiento de la estructura (adelante y atrás) y del posicionamiento de las ruedas delanteras de cada vagón para que este se posicione en su punto inicial o final con el propósito de vencer obstáculos.

Los dos tipos de actuadores que integran el robot móvil se describen a continuación:

- Actuadores de desplazamiento; en donde se tiene en cuenta las siguientes especificaciones:
 - Potencia, que se define mediante el torque obtenido en el diseño mecánico del capítulo III del presente documento.

- Velocidad promedio, la cual se obtiene en el capítulo III Diseño Mecánico del presente documento.

- Actuadores para el movimiento del mecanismo de la rueda móvil.

Los motores de corriente continua son ampliamente utilizados en la robótica para realizar movimientos de fuerza; el robot móvil necesita de cuatro motores DC con el propósito de brindar tracción al desplazamiento del mismo, tomando en cuenta los parámetros de torque mínimos descritos en el capítulo III, los motores DC de Pololu con caja reductora de 75 a 1 presentan características que satisfacen los parámetros de diseño, como se describe a continuación.

- Torque del motor de 0.6 N.m.
- Velocidad nominal de 75 rpm.
- Promedio de consumo de corriente de 2 amperios.
- Tamaño de 25 mm de diámetro por 54 mm de largo.

Para realizar posicionamiento del mecanismo de las articulaciones de las ruedas, se selecciona un servomotor modelo HS 311 de HITEC debido que presenta las siguientes ventajas:

- Torque del motor de 0.3 N.m. suficiente para levantar las ruedas del mecanismo.
- Control con ancho de pulso nominal de 20 milisegundos.
- Corriente nominal de 700 miliamperios.
- Velocidad de operación de 60 ° por cada 0.19 segundos.
- Tamaño de 40X20X36 mm.
- Servomotor comercial en Ecuador.

4.3. DISEÑO ELECTRÓNICO Y COMUNICACIÓN

4.3.1. DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

Para el dimensionamiento de los componentes electrónicos que van a intervenir para el control del robot móvil, se debe considerar la tabla 2 presentada a continuación:

Actuadores y Sensores	Potencia Máxima [W]
Motores DC	24
Servomotor de control	5
Sensor de detección	0.2

Tabla 2. Detalle de potencias en actuadores y sensores.

El robot móvil tiene integrado entre sus comandos las acciones de avance y retroceso, por lo que se debe implementar un circuito que permita realizar el cambio de voltaje en los terminales de los motores DC, el puente H es un circuito ampliamente utilizado en robótica que permite realizar el cambio de voltaje mediante señales de control en sus terminales.

El control de las acciones avance y retroceso se realiza a través del control remoto conectado mediante cable por la facilidad de manejo y el alto alcance que maneja en el envío de datos.

La estructura de control y potencia del robot móvil se describe en la figura

69:

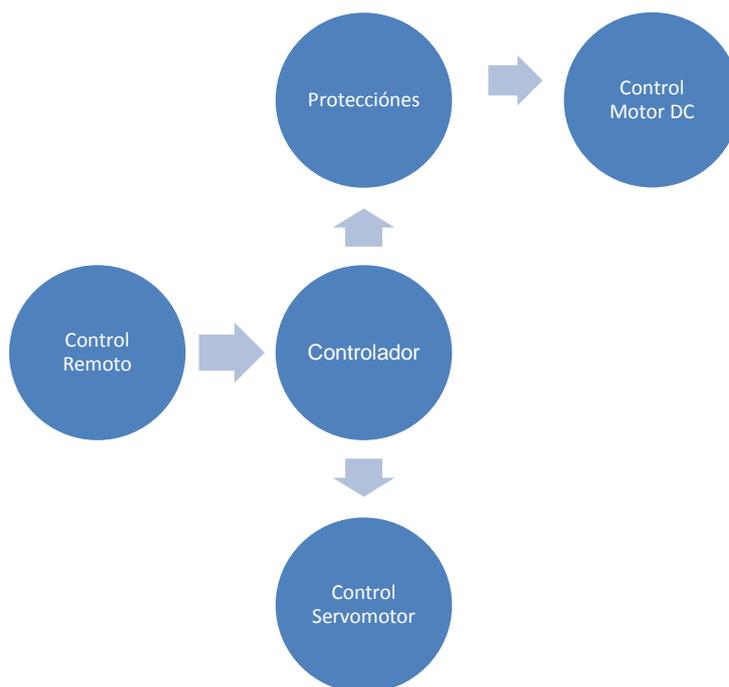


Figura 69. Diagrama de la estructura de control y potencia del robot.

Para el controlador y los componentes que intervienen en el circuito del control remoto, se tomará los datos referenciales de potencias.

En cuanto a la selección de las fuentes de alimentación del circuito de potencia como para el circuito del control remoto, se procede al cálculo de corriente máxima y voltajes de operación tomadas en cuenta de la tabla 3:

Elementos	Voltaje [V]	Corriente [A]
4 Motores DC	12	8
4 Servomotores de control	5	4
Sensor de detección	5	0.04
Micro controlador	5	1

Tabla 3 .Detalle de voltajes y corrientes de consumo del circuito de control del robot móvil.

Haciendo referencia a la tabla 3, se puede determinar que la corriente máxima para la fuente de alimentación de los circuitos de potencia y control del robot móvil es de 14.946 [A] con tomas de 5[V] y 12 [V] respectivamente.

Para la selección del cable que sirve para la interconexión entre los circuitos de control y de potencia del control móvil se toma en cuenta la tabla 4 de calibres AWG para saber el grosor necesario de acuerdo a la corriente máxima que circula por los diferentes dispositivos.

Código AWG	Diámetro del conductor (mm)	Amperaje (A)
10	2,58	55
11	2,30	47
12	2,05	41
13	1,82	35
14	1,62	32
15	1,45	28
16	1,29	22
17	1,15	19
18	1,02	16
19	0,91	14
20	0,81	11
21	0,72	9
22	0,64	7
23	0,57	4,7
24	0,51	3,5
Continua →		

Código AWG	Diámetro del conductor (mm)	Amperaje (A)
26	0,40	2,2
27	0,36	1,7
28	0,32	1,4
29	0,28	1,2
30	0,25	0,86
31	0,22	0,7
32	0,20	0,53

Tabla 4. Calibres AWG.

En la tabla 5 se presenta los actuadores y sensores conectados en cada vagón a las placas PCB de potencia respectivamente con el detalle de la capacidad máxima de consumo de corriente y su pertinente cable que le corresponde de acuerdo al lineamiento de la tabla 4.

La selección del cable para las señales de alimentación como para las señales de control, son distintas debido a que el ruido puede influir en la lectura de los datos analógicos de los sensores por lo que se debe tomar en cuenta un cable apantallado en las conexión de los sensores con señales analógicas.

Actuadores y Sensores	Corriente [A]	Calibre mínimo (AWG)
Motores DC	2	26
Servomotor de control	1	29
Sensor de detección	0.04	32

Tabla 5. Calibres AWG para conexión de actuadores y sensores.

4.3.2. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

Para el diseño del circuito impreso se debe partir de los circuitos que conforman el control remoto, el controlador y de potencia.

Para la fabricación y empleo de placas de circuito impreso se debe tener en cuenta las normas DIN 40801 (Circuitos Impresos), IEC 52-102 (Requisitos de circuitos impresos) y UNE (Técnico de circuitos impresos), de las cuales se tomó en cuenta la norma UNE 20-621-84 cuyos literales se detallan a continuación:[10]

- En placas de uno o dos caras los espesores del material aislante van desde 0.2 hasta 6.4 mm.
- La forma de conectar los componentes a la capa conductora puede ser mediante agujeros sin metalizar con nudos, metalizados con nudos, metalizados con nudos y nudos sin agujeros.
- El tamaño de los nudos y agujeros se detalla en la tabla 6.
- El tamaño del conductor o el ancho de la pista depende de la corriente eléctrica que circula por la misma y del espesor de la capa conductora de la placa, en general se tendrá en cuenta que 0.8 mm puede soportar, dependiendo del espesor de la pista, alrededor de 2 amperios; 2mm, unos 5 amperios; y 4.5 mm, unos 10 amperios.

Tamaño nominal del agujero [mm]	Tolerancia [mm]
0.5	± 0.05
0.6	± 0.05
0.8	± 0.05
0.9	± 0.05
1.0	± 0.1
1.3	± 0.1
1.6	± 0.1
2.0	± 0.1

Tabla 6. Tamaños de agujeros sin metalizar.

Tamaño nominal del agujero [mm]	Tolerancia [mm]
0.5	0.45
0.6	0.55
0.8	0.75
0.9	0.85
1.0	0.9
1.3	1.2
1.6	1.5
2.0	1.9

Tabla 7. Tamaños de agujeros metalizados.

- La separación entre pistas mínima para tensiones de trabajo pequeñas es de 0.3 mm, dicha separación aumenta cuando las tensiones de trabajo son mayores.
- Para el diseño del circuito impreso se debe utilizar un programa con rejillas en décimas de pulgada de modo que coincidan las pistas en las líneas de la cuadrícula o formando un ángulo del 45° con estas, y los puntos de soldadura con las intersecciones de las líneas.
- Se debe realizar el diseño con la distribución de elementos lo más sencillo posible.
- No se debe realizar pistas con ángulos de 90° , cuando sea necesario realizar un giro en una pista, se debe realizar con dos ángulos de 135° , si es necesario se debe realizar una bifurcación entre las pistas.
- Los círculos de las pistas deben ser círculos cuyos diámetros debe ser al menos el doble de ancho de las pistas que en el termina.
- Entre pistas y puntos de soldadura, se debe considerar una distancia que depende de la tensión eléctrica que se prevea entre ellas, a modo general, se debe dejar una distancia mínima de 0,8 mm; en caso de diseño complejos, se puede reducir la distancia a 0.4 mm.
- La distancia mínima entre pistas y los bordes de la placa será de 5 mm.
- Todos los componentes se deben colocar paralelos a los bordes de la placa.
- No se podrá colocar pistas entre los bordes de la placa y los puntos de soldadura de terminales de entrada.
- No se pasarán pistas entre dos terminales de componentes activos

- Se debe dejar una o dos décimas de pulgada de patilla entre el cuerpo de los componentes y el punto de soldadura correspondiente.
- La pista debe disponerse sobre el nodo perpendicularmente, y no de forma tangencial.
- Para facilitar la soldadura, se debe evitar áreas con exceso de cobre.
- En casos de pistas de masa en donde se requiere grandes cantidades de cobre, se recomienda diseñar una rejilla de tipo rayado para evitar que se deforme el aislamiento.
- .Cuando se tenga que unir dos nodos próximos, se debe realizar un tramo de pista entre ambos.
- Al trazar las pistas de unión entre varios nodos, se debe evitar la formación de ángulos agudos.
- La separación mínima entre un integrado y los borde de la placa debe ser de 0.9mm y la separación mínima entre circuitos integrados debe ser de 0.5 mm.
- No se debe pasar más de un terminal de conexión por taladro de la placa.
- Se recomienda que todos los componentes de un mismo grupo (resistencias, diodos, capacitores, etc.) se monten en un mismo sentido.
- Las placas que contengan una mezcla de circuitos analógicos y digitales deben tener dos pistas de masa totalmente diferentes para cada tipo de circuito.
- Se debe tratar que la pista general de masa cubra el 50 % de la superficie total de la placa.

- El ancho mínimo de una pista de alimentación debe ser de 2 mm.
- Las pistas de señal deben tener una anchura mínima de 0,5 mm.

El software PCB Wizrd, es un programa que me permite realizar circuitos impresos de forma ágil e intuitiva al igual que el software Proteus de Labcenter Electronics, además, cumple con los requerimientos descritos anteriormente, este software se utilizará para realizar el ruteo de las pistas además de presentar de forma visual el trabajo final que se obtendrá.

4.3.3. DISEÑO DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO

El control remoto integra en sus funciones los siguientes puntos descritos a continuación:

- Recepción de datos mediante un acelerómetro que es un tipo de sensor que mide aceleraciones lineales. Las aceleraciones se suelen medir utilizando la unidad "G" que se define como la unidad de referencia de la aceleración gravitatoria de la tierra, donde 1 g corresponde a la fuerza de aceleración vertical debido a la gravedad. Los acelerómetros comerciales generalmente cumplen con las especificaciones de la tabla 8:

Especificaciones	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	3 - 3.6	V
Eje X Centro	1.76	V
Eje X Izquierda	2	V
Continua →		

Especificaciones	Valor	Unidad
Eje Y Centro	1.76	V
Eje Y Izquierda	2	V
Eje Y Derecha	1.5	V
Corriente	350	uA

Tabla 8. Especificaciones técnicas del sensor acelerómetro.

- Análisis y comparación de datos mediante un micro controlador que realiza las funciones de recepción de señales analógicas para compararlas con niveles de voltaje obtenidas mediante pruebas para determinar el movimiento del robot móvil, las especificaciones del controlador se detalla en la tabla 9:

Especificaciones	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	5	V
Entradas analógicas	2	Unidades
Entradas digitales	2	Unidades
Salidas digitales	5	Unidades
Corriente	1	A

Tabla 9. Especificaciones técnicas del micro controlador del control remoto.

- Protecciones en las salidas del micro controlador con el propósito de separar señales de este con otros periféricos, los requerimientos se especifican en la tabla 10:

Especificaciones	Valor	Unidad
Tipo de Protección	Óptico	NA
Número de entradas	1	Unidad
Especificaciones	Valor	Unidad
Número de salidas	1	Unidad
Corriente máxima	50	mA

Tabla 10. Especificaciones técnicas de protecciones.

- Reguladores de tensión, que garantizan el voltaje requerido a cada componente y que cumplen con las especificaciones descritas en la tabla 11:

Especificaciones	Valor	Unidad
Regulador 5V, voltaje de salida	5	V
Regulador 5V, corriente de salida	1.5	A
Regulador 3.3V, voltaje de salida	3.3	V
Regulador 3.3V, corriente de salida	1.5	A

Tabla 11. Especificaciones técnicas de reguladores de tensión.

Luego de determinar los componentes del circuito con sus respectivas cargas, se procede a la elaboración del mismo, para esto se utiliza un software para su posterior simulación, como se muestra en la figura 70:

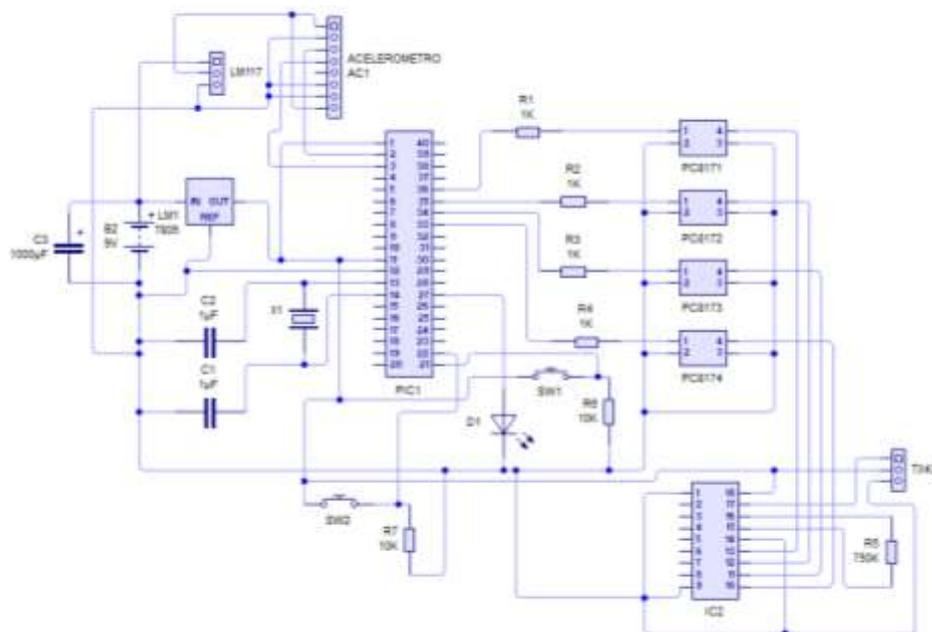


Figura 70. Circuito del control remoto.

Luego, mediante el ruteo automático, propiedad del software, se procede a la elaboración del ruteado de pistas, componentes, nombre de la placa, límites y agujeros para su instalación posterior, requeridas en la placa del control remoto, presentado en la figura 71.

4.3.4. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE POTENCIA

Para los diseños de las placas de los circuitos de potencia se debe tener en cuenta la ubicación de la placa de control, debido a la longitud del cable definido en cada servomotor, por objeto de diseño, se supone que la placa de control estará situada en el vagón trasero (vagón 2).

Para el vagón 2, la placa del circuito de potencia debe integrar las siguientes funcionalidades:

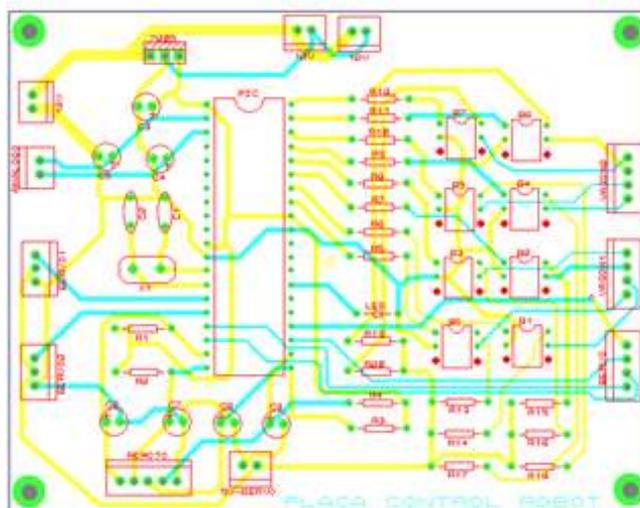


Figura 71. Circuito del control remoto con pistas de interconexión.

- Recepción de señales de control que indiquen el sentido de giro de los motores.
- Puente H; para realizar el sentido de giro de los motores, el puente H debe tener los requerimientos descritos en la tabla 12:

Especificaciones	Valor	Unidad
Capacidad - Motores	2	Unidades
Voltaje de alimentación - motores	12	V
Voltaje de entrada - control	5	V
Corriente por canal	2	A

Tabla 12. Especificaciones para el puente H.

Mediante las especificaciones de conexión de los puentes H comerciales, se realiza el circuito de potencia como se muestra en la figura 72:

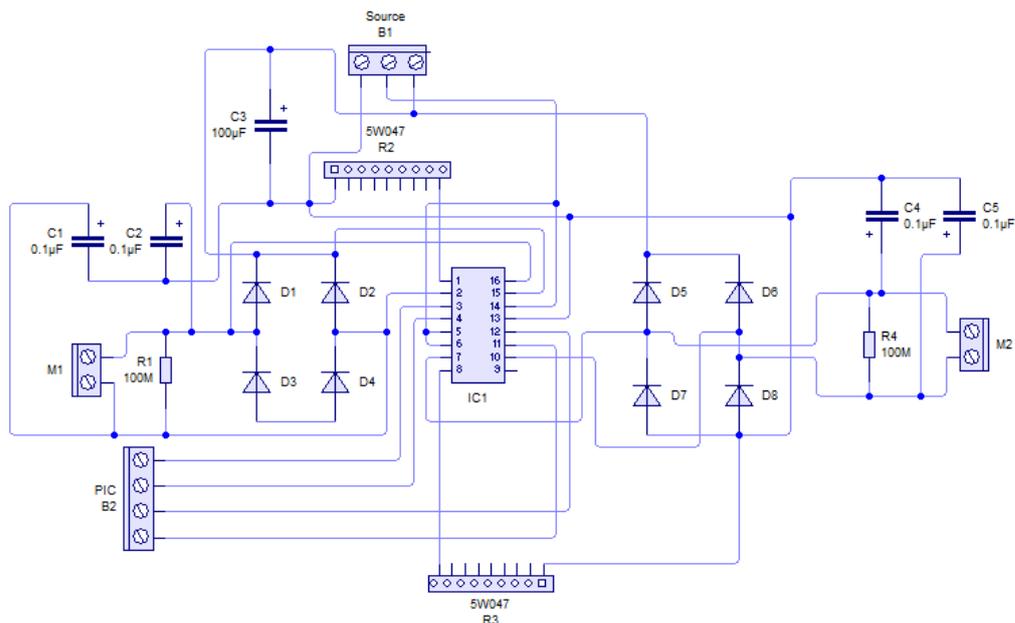


Figura 72. Circuito de potencia vagón 2.

El circuito de potencia final se lo configura en el software de desarrollo y simulación de circuitos electrónicos, donde se obtienen el diseño de la figura 73.

Para el vagón 1, la placa del circuito de potencia debe integrar las funciones del vagón 2 además de 4 señales PWM para los 3 servomotores ubicados en este vagón, de esta forma se obtiene un circuito similar al anterior y se presenta en la figura 75.

Definido el circuito para la placa de potencia del vagón 1, se lo configura en el software, el diseño de la placa, como se presenta en las figuras 74 y 75.

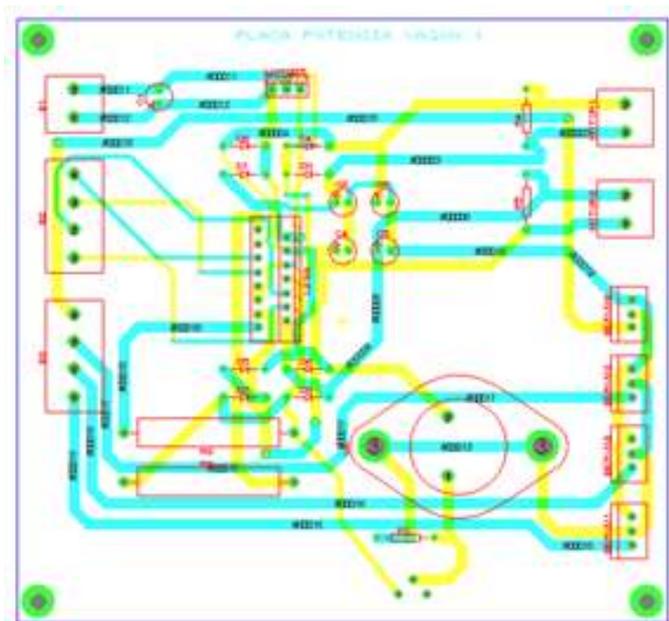


Figura 74. Circuito de potencia vagón 1 con pistas de interconexión.

- Reguladores de tensión, especificado en la tabla 11 “Especificaciones técnicas de reguladores de tensión”.
- Módulo de señales PWM, para realizar el control de los servomotores que realizan la acción de subir las ruedas de acuerdo con el nivel de la grada.

Considerando los parámetros descritos, procedemos al diseño del circuito de control del robot móvil, el cual se presenta en la figura 76.

Con el circuito del controlador del robot móvil terminado, se lo configura dentro del software PCB Wizard para obtener los diseños de las placas del circuito como se presenta en la figura 77.

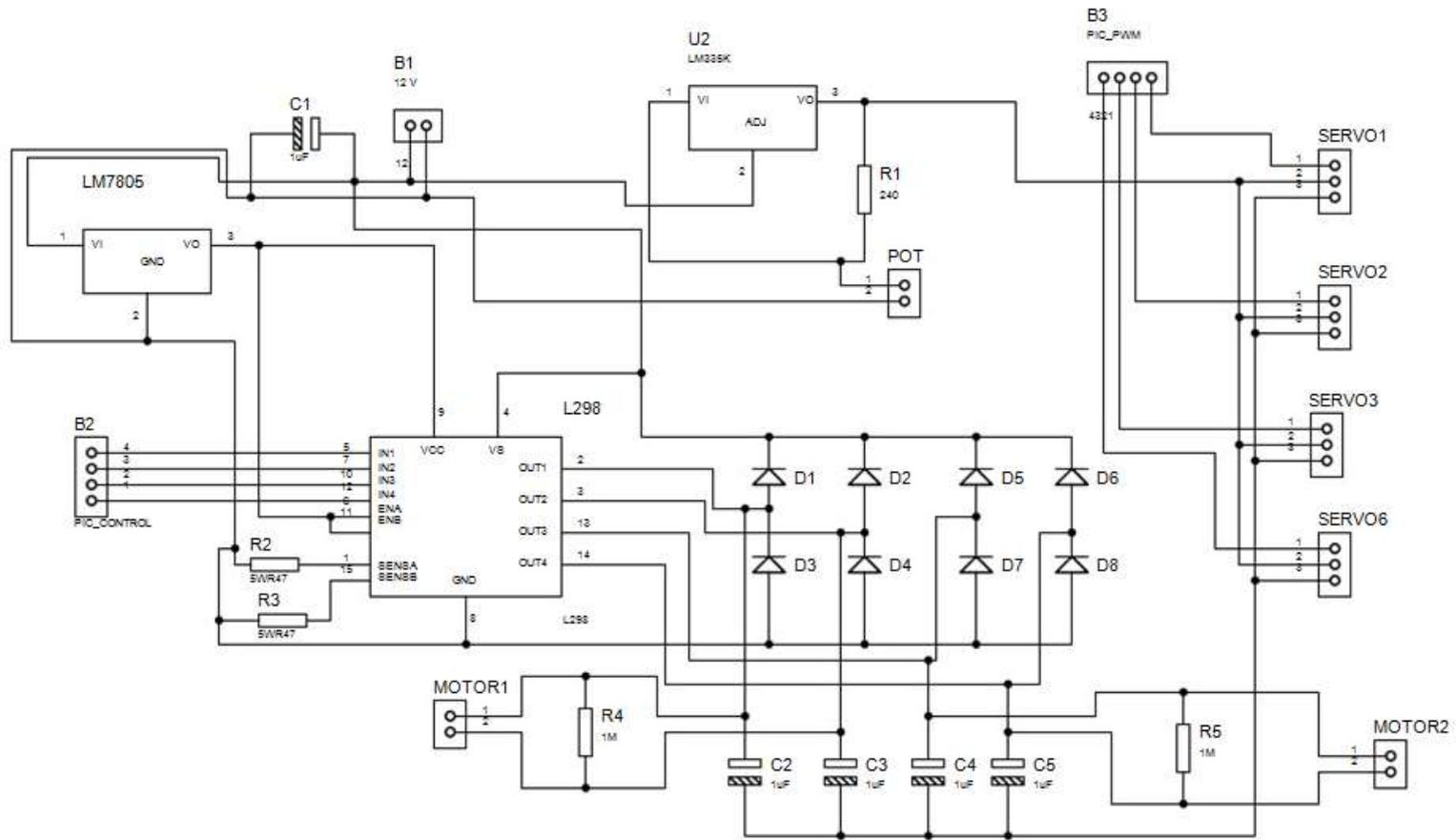


Figura 75. Circuito potencia vagón 1.

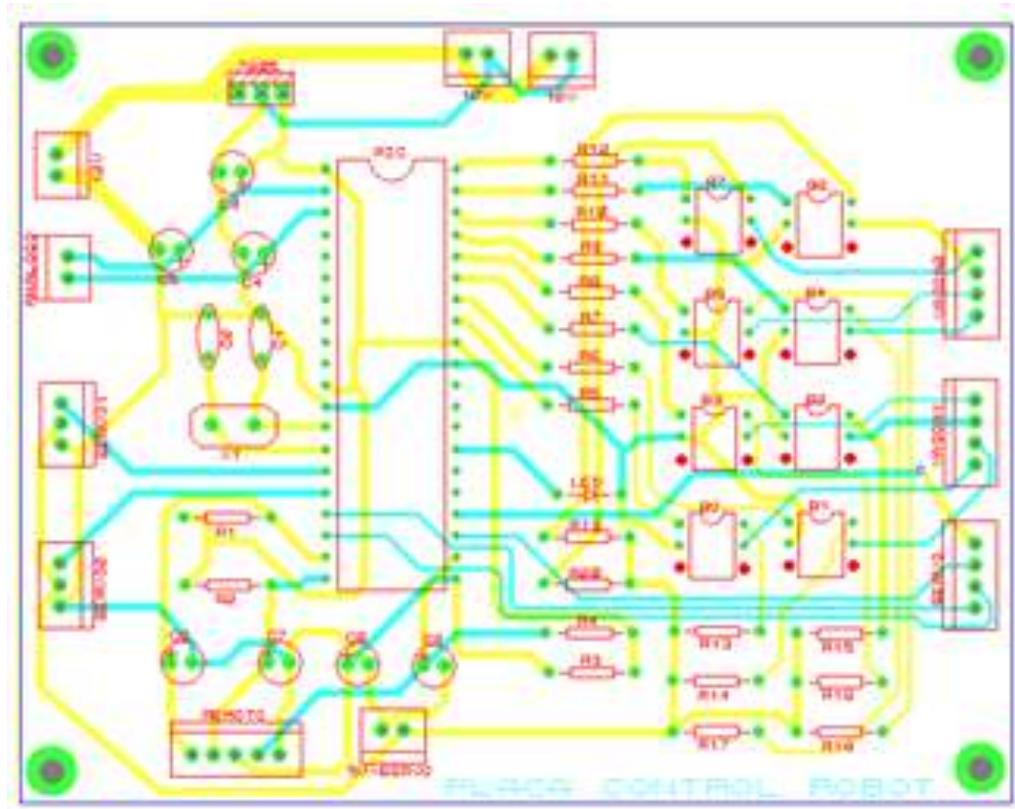


Figura 77. Circuito del controlador del robot con pistas de interconexión.

4.4. CONTROL

4.4.1. DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL CONTROLADOR

Para el robot móvil existe dos tipos de controladores, el controlador del control remoto y el controlador que gobierna las acciones del robot en si, para cada caso se describe a continuación las entradas y salidas de cada controlador:

Señal	Entrada	Salida	Tipo
Sensor movimiento X	√	-	0-5V analógico
Sensor movimiento Y	√	-	0-5V analógico
Interruptor inicio	√	-	0-5V digital
Pulsador manual	√	-	0-5V digital
Indicador de activación	-	√	0-5V digital
Señal 1 control robot	-	√	0-5V digital
Señal 2 control robot	-	√	0-5V digital
Señal 3 control robot	-	√	0-5V digital
Señal 4 control robot	-	√	0-5V digital

Tabla 13. Entradas y salidas para el controlador del control remoto.

Señal	Entrada	Salida	Tipo
Señal 1 control robot	√	-	0-5V digital
Señal 2 control robot	√	-	0-5V digital
Señal 3 control robot	√	-	0-5V digital
Señal 4 control robot	√	-	0-5V digital
Señal Infrarrojo	√	-	0-5V analógico
Indicador de activación	-	√	0-5V digital
Señal servomotor 1	-	√	0-5V PWM
Señal servomotor 2	-	√	0-5V PWM
Señal servomotor 3	-	√	0-5V PWM
Señal servomotor 4	-	√	0-5V PWM

Continua →

Señal	Entrada	Salida	Tipo
Señal servomotor 5	-	√	0-5V PWM
Señal servomotor 6	-	√	0-5V PWM
Señal 1 motor DC 1	-	√	0-5V Digital
adelante			
Señal 2 motor DC 1 atrás	-	√	0-5V Digital
Señal 3 motor DC 2	-	√	0-5V Digital
adelante			
Señal 4 motor DC 2 atrás	-	√	0-5V Digital
Señal 5 motor DC 3	-	√	0-5V Digital
adelante			
Señal 6 motor DC 3 atrás	-	√	0-5V Digital
Señal 7 motor DC 4	-	√	0-5V Digital
adelante			
Señal 8 motor DC 4 atrás	-	√	0-5V Digital

Tabla 14. Entradas y salidas para el controlador del robot móvil.

4.4.2. DIAGRAMA ACCIONES – RELACIONES DEL SISTEMA DE CONTROL DE LOCOMOCIÓN

El diagrama acciones - relaciones del sistema de locomoción del robot móvil que describe cada una de la acciones que realiza el robot móvil frente a cualquier comando de control se detalla en la tabla 15.

ETAPAS	ACCIONES	RELACIONES
Activación	Se pulsa el interruptor de activación en el control remoto.	La luz led verde se enciende intermitentemente por 3 segundos en el robot móvil. Los movimientos del robot móvil se habilitan para que este pueda ser operado de forma manual.
Modo Automático	Presionar el botón automático en el control remoto.	Se realiza un escáner del ambiente mientras se explora el lugar, si encuentra un objeto, el robot automáticamente lo detecta y lleva a sus ruedas móviles a su posición final.
Modo Manual	Presionar el botón manual en el control remoto.	El robot levanta las ruedas móviles a su posición final de modo que puede vencer obstáculos en cualquier momento.
Movimiento del Robot móvil	Mover el control remoto hacia adelante, atrás, izquierda y derecha.	El robot móvil realiza el movimiento dependiendo de los comandos del control remoto.

Tabla 15. Acciones y relaciones de las etapas del robot móvil.

4.4.3. DIAGRAMA GRAFCET DE LA LÓGICA DE CONTROL.

El GRAFCET es un grafo o diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones. Inicialmente fue propuesto para documentar la etapa secuencial de los sistemas de control de procesos a eventos discretos. No fue concebido como un lenguaje de programación de autómatas, sino un tipo de Grafo para elaborar el modelo pensando en la ejecución directa del automatismo o programa de autómatas. Varios fabricantes en sus autómatas de gama alta hacen este paso directo, lo que lo ha convertido en un potente lenguaje gráfico de programación para autómatas, adaptado a la resolución de sistemas secuenciales.

El diagrama grafcet es un paso previo y elemental para poder programar la lógica de control de manera adecuada, de forma que el programador vea claramente los caminos más fáciles y adecuados a tomar al momento de introducir las sentencias lógicas que comandaran el sistema.

En el diagrama de la figuras 83 muestra el grafcet que gobierna las sentencias lógicas para el control del robot móvil.

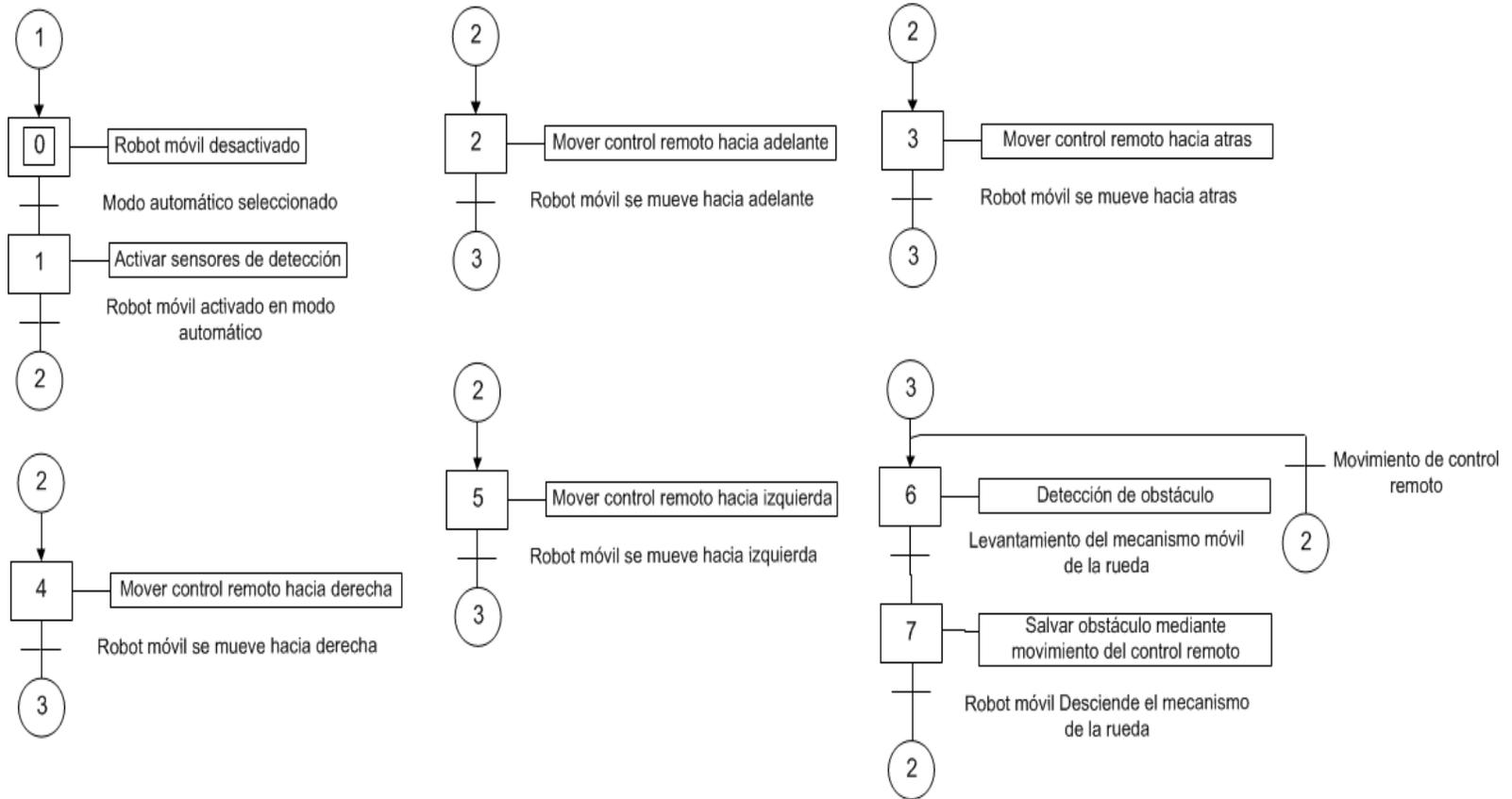


Figura 83. Diagrama Grafcet robot móvil.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN

El presente capítulo trata del procedimiento de construcción que se realizó para la implementación del robot móvil.

5.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para la construcción de la estructura se siguió exactamente las dimensiones y características del diseño propuesto en el capítulo III del presente documento. Para facilitar el corte de la forma compleja del vagón delantero se tuvo que dibujar en una tabla la forma con las medidas del perfil de aluminio, como se muestra en la figura 78.

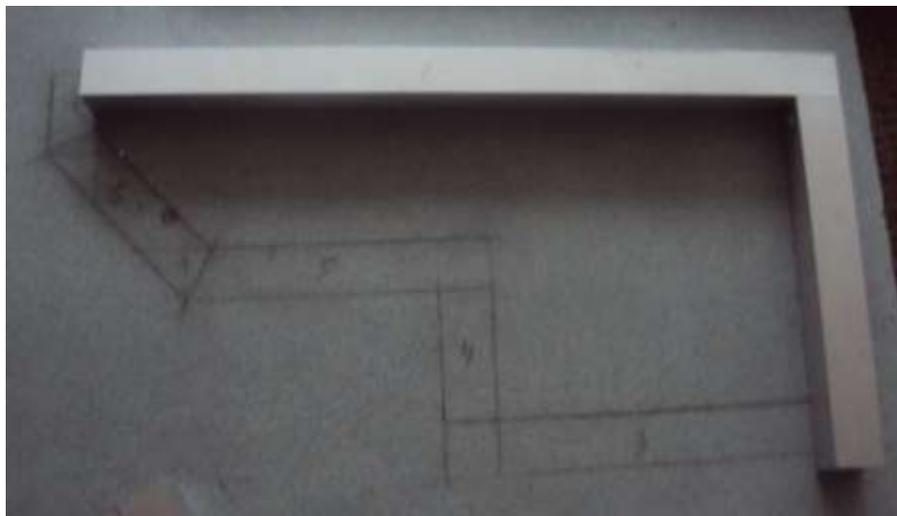


Figura 78. Primer esquema para la construcción de la estructura

Con las dimensiones obtenidas se cortaron cada pieza de perfil de aluminio, con los ángulos necesarios, para ello se utilizó una sierra eléctrica. (Ver figura 79).



Figura 79. Piezas cortadas del perfil de aluminio

Con ángulo de 90° , por interior de los perfiles se realizó la unión de los mismos, remachándolos cada lado a una pieza (ver figura 80).



Figura 80. Unión de los perfiles de aluminio por remache



Figura 81. Estructura formándose a partir del diseño

La estructura final de cada vagón terminado se muestra en las figura 82



Figura 82. Vagón delantero terminado

Cuando la estructura general de los dos vagones fue terminado por completo, se procedió a realizar las piezas de soporte y unión de los motores y vagones.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS PARTES INTERNAS DE LA ESTRUCTURA

Los primeros componentes que fueron colocados eran los motores DC, acoplados a los rodillos. Para esto, se puso una placa en la parte exterior con la forma del ángulo en donde iba ubicado el motor y con los agujeros para unirlo al Motor, ésta placa fue remachada a la estructura para asegurar su fijación. (Ver figura 83).



Figura 83. Placa de sujeción de los motores DC a la estructura



Figura 84. Motor acoplado a la placa de sujeción

Luego de haber instalado los motores DC, las ruedas fijas son colocadas a una distancia de 8,6 cm desde el eje del motor, probando la fricción que existe entre el rodillo y la rueda fija, en caso de ser necesario se ajusta esta distancia (ver figura 85).



Figura 85. Colocación de la rueda fija

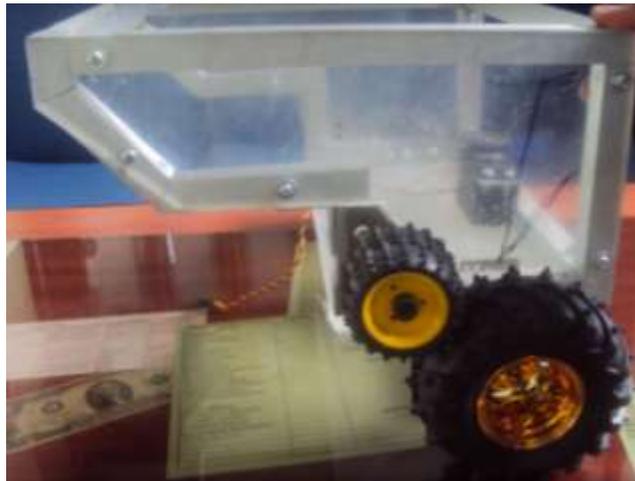


Figura 86. Rueda fija instalada

El siguiente paso es realizar el eje de la rueda que en un extremo está conectado a la rueda y en otro extremo está unido al brazo de acrílico, éste eje para ajustarse a la rueda en su extremo está roscado, pero la rosca llega exactamente hasta el límite donde comienza el aro de la rueda, una tuerca de seguridad ajusta el rueda al eje, de esta manera la rueda tiene la libertad de giro en cualquier sentido y a además el eje se mantiene en la misma posición y

se evita el juego mecánico sobre el eje. En las figuras 87 y 88 se muestran el eje de las ruedas, las ruedas y el tornillo de seguridad.



Figura 87. Eje acoplado a la rueda



Figura 88. Tornillo de seguridad en la rueda

Este mismo proceso se realiza en las cuatro ruedas móviles, verificando que todas cumplan con la característica de girar libremente hacia adelante y hacia atrás, en caso de que alguno se haya quedado muy ajustado y la rueda no gira

con facilidad se debe desajustar el tornillo de seguridad hasta que se logre el libre giro y el ajuste suficiente de la rueda contra el eje.

Ahora para realizar el giro con respecto al eje del motor se coloca el brazo de acrílico, que fue diseñado en el capítulo III, en la figura 89, se muestra el brazo de acrílico, con los agujeros para el motor y para el eje de las ruedas.



Figura 89. Brazo de acrílico

Como se había mencionado en el capítulo III, es muy importante la distancia entre el rodillo y la rueda, ya que define el torque transmitido, para esto se realizó en vez de un agujero para el eje de la rueda, una ranura que permita realizar ajustes de presión entre el rodillo y la rueda, y a la distancia adecuada por medio de una tuerca se ajusta a presión y el eje de la rueda se fija. (ver figura 90)



Figura 90. Ranura para el ajuste en el brazo de acrílico



Figura 91. Ajuste con tornillo de la rueda móvil en la ranura del brazo de acrílico

Se coloca el brazo de acrílico y para evitar que haya juego mecánico entre el brazo y el motor se colocan dos abrazaderas de material nylon blanco, como se muestra en la figura 92.

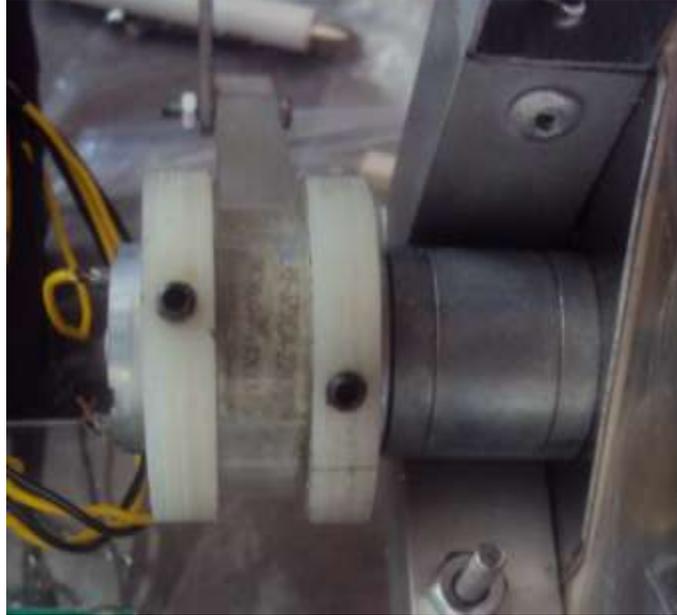


Figura 92. Abrazaderas para el brazo de acrílico en el Motor DC

Para la colocación de los servomotores se ubican las ruedas móviles en posición inicial, es decir la ruedas sobre una superficie recta, luego el acople del servomotor se pone en posición vertical de tal manera que el último agujero del acople del servomotor quede los más cercano posible al agujero de la rueda, ésta distancia vertical es la distancia del eslabón que une el servomotor al brazo de acrílico. Se sujetan los servomotores mediante una plancha de acero, haciendo presión con dos tornillos a los lados contra la estructura de aluminio. En la figura 93, se muestra la sujeción de los servomotores.



Figura 93. Sujeción de los servomotores

El eslabón que une el acople del servomotor y el brazo de acrílico, se sujeta a éstos dos por medio de pasadores que se atornillan con tuerca y contratuerca para que el mecanismo pueda subir y bajar fácilmente, como se muestra en las siguientes figuras.

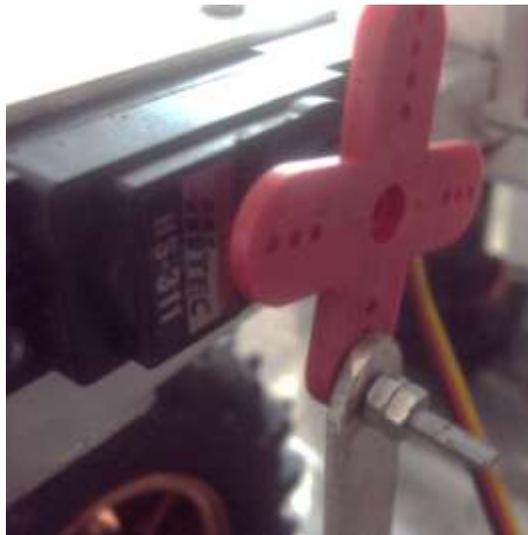


Figura 94. Eslabón sujetado al servomotor



Figura 95. Mecanismo de la rueda móvil

Para la unión de los vagones como se había diseñado, se optó por una unión tipo cilíndrico, esta unión se compone de tres partes, la primera es la pieza que es un cubo que va sujetado el primer vagón y posee un agujero de tamaño del cilindro de giro, la segunda parte es un rectángulo que va sujetado al segundo vagón y también tiene el mismo para el cilindro de giro, y la tercera pieza es el cilindro que gira libremente y permite que los vagones tengan giros independientes.

Fue necesario colocar una pieza tipo “L” con remaches en la parte frontal del vagón posterior, para sujetar la unión a ésta (ver figura 96).



Figura 96. Placa frontal del vagón posterior

El material de la que está hecha la unión, es nylon blanco y va sujetado a los vagones mediante tornillos, por lo que se le ha realizado un roscado interno. (ver figuras 97, 98 y 99)



Figura 97. Unión de los vagones

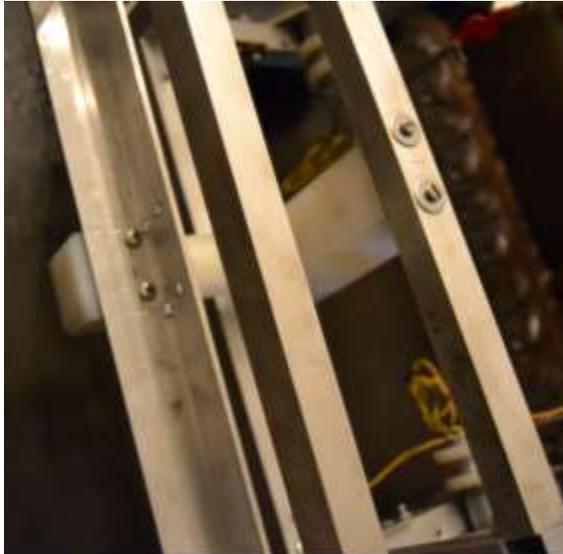


Figura 98. Atornillado de la unión a los vagones



Figura 99. Roscado sobre la unión de nylon

Los sensores infrarrojos deben ser ubicados los más alineados posibles con las ruedas delanteras, de tal forma que si existe algún objeto frente a éstas ruedas, los sensores infrarrojos deben detectarlo, para éste objetivo se debe colocar los sensores fuera de la estructura de aluminio, tomando en cuenta si existe algún choque a la parte lateral del robot, éste tropiezo pueden dañar los

sensores o desconectarlos, para evitar este problema los sensores infrarrojos se los ubicó dentro de un soporte de aluminio de un ancho de dos centímetros hecho con un perfil de aluminio, y por debajo se realizó una ranura para la conexión de los cables de alimentación y dato, como se muestra en la figura 100:



Figura 100. Soporte para el sensor infrarrojo

Para sujetar el soporte, por la parte posterior se le colocó una pieza de acrílico del mismo ancho pero más alargado, y por medio de un tornillo se le sujetó a la estructura de aluminio; éste soporte se realiza para los dos sensores infrarrojos de la parte frontal del robot, como se ilustra en la figura 101.



Figura 101. Sujeción del soporte del sensor infrarrojo.

Para cubrir y proteger el interior del robot móvil del polvo, suciedad y otros factores del medio ambiente, se colocaron plancha del acrílico de 3 mm de espesor en cada uno de sus lados pertenecientes a cada vagón (Ver figura 103). Antes de ubicar las planchas de acrílico, se limpiaron las superficies de aluminio con disolvente de aceites industriales (Ver figura 102).

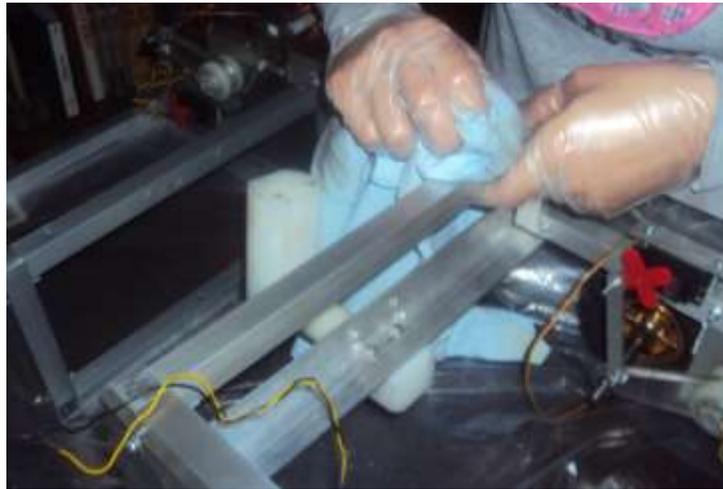


Figura 102. Limpieza de la estructura de aluminio



Figura 103. Colocación de los acrílicos al robot móvil.

5.3. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

Con los diseños realizados en el capítulo IV del presente documento, se realizaron las placas PCB de los circuitos de control remoto, control de motores DC y el circuito de control de robot, éstas placas se presentan en las figuras 104, 105, 106 y 107.

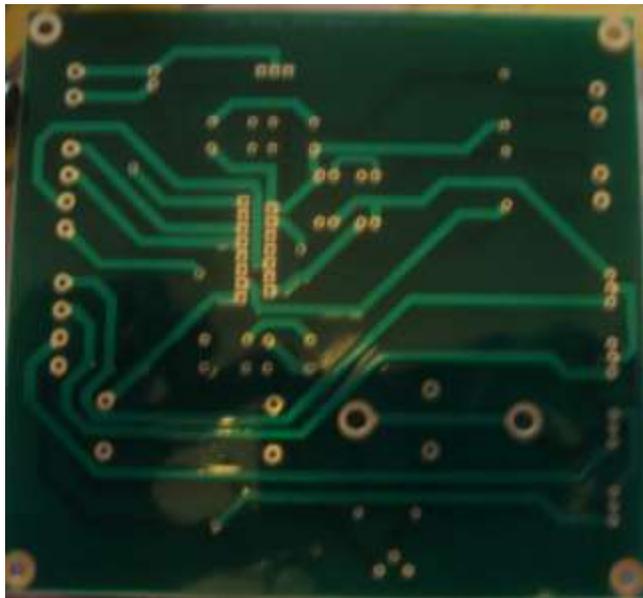


Figura 104. Placa de control de motores DC del vagón delantero

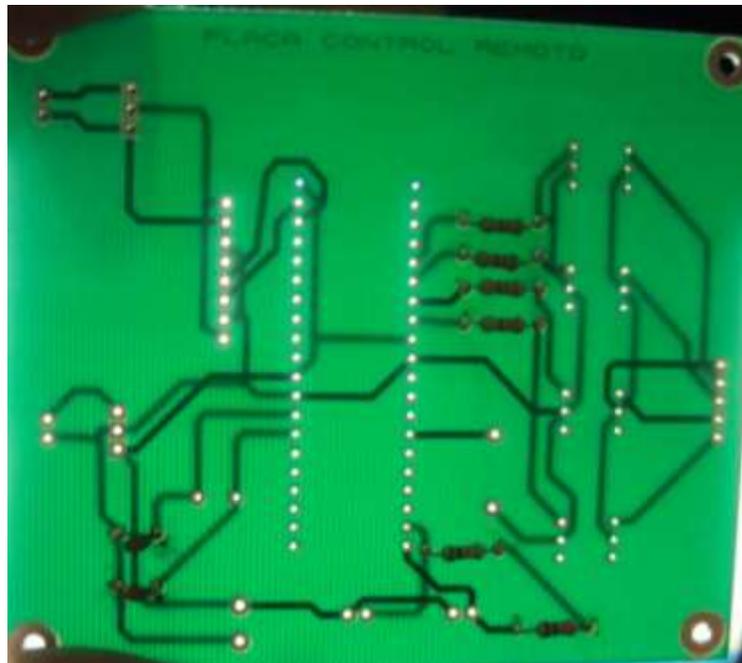


Figura 105. Placa de control remoto

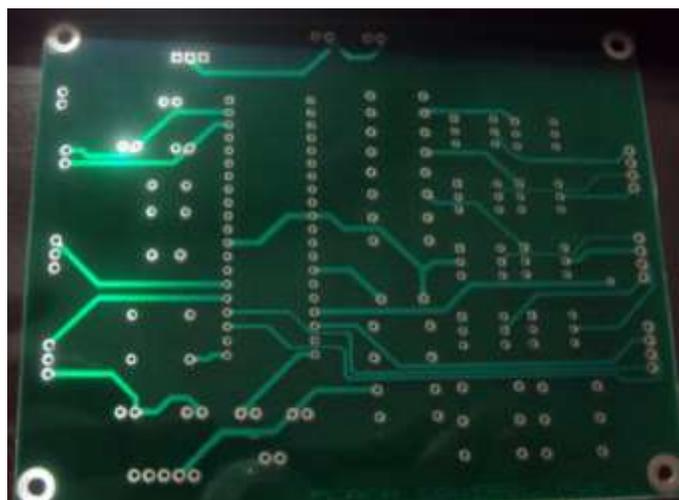


Figura 106. Placa de control de robot

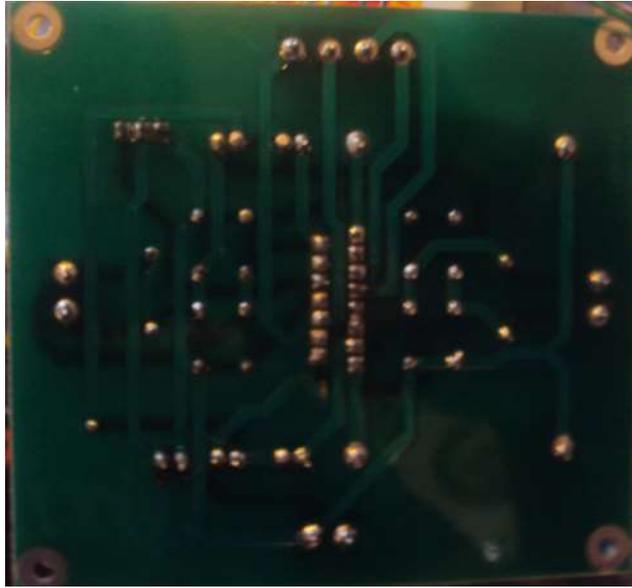


Figura 107. Placa de control de motores DC del vagón posterior

Una vez adquiridos los componentes electrónicos y eléctricos, se realizó la soldadura de éstos a cada uno de las placas PCB, mostradas en la figura 108 y figura 109 y el proceso de soldadura en la figura 110.



Figura 108. Placas PCB con sus componentes soldados (capa frontal)



Figura 109. Placas PCB con sus componentes soldados (capa inferior)

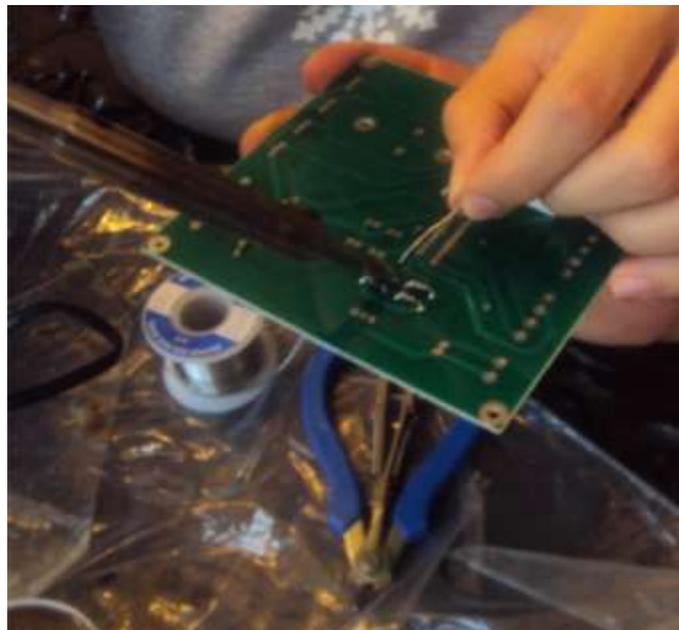


Figura 110. Proceso de soldadura

Al terminar de soldar las placas es necesario limpiar los residuos de grasa que queda producto de la soldadura, con un disolvente y frotando con un cepillo, como se muestra en la figura 111.



Figura 111. Limpieza de las placas PCB's

Para la ubicación de los circuitos PCB (figura 114 y 115) y protegerlos de posibles cortocircuitos, se colocó planchas de acrílico con las mismas dimensiones de cada uno de las placas en su parte inferior, distanciándolos a una distancia de 0.5 cm mediante separadores y tuercas, como se ilustra en las figuras 112 y 113.



Figura 112. Separación de la placa PCB con plancha de acrílico

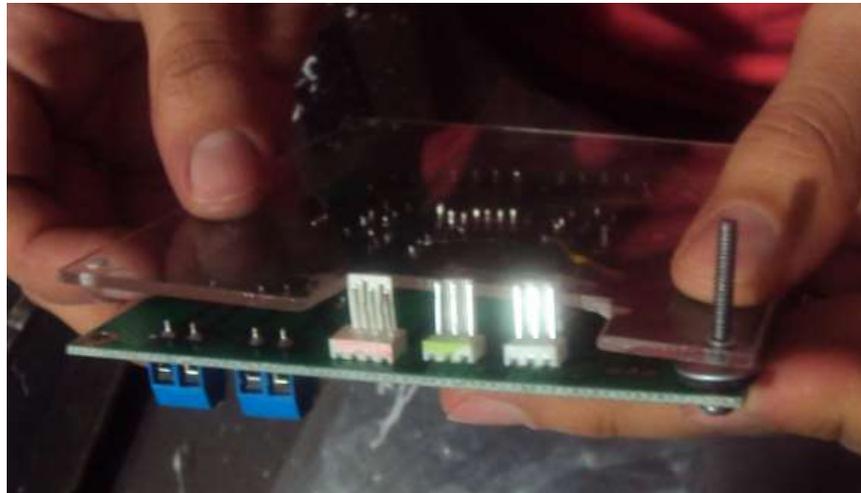


Figura 113. Aislamiento de las placas PCB con acrílico



Figura 114. Ubicación de la placa de control de motores DC en el vagón delantero



Figura 115. Ubicación de la placa de control de motores DC y control del robot en el vagón posterior

Una vez ubicado todas las placas a cada vagón se realizó la conexión entre las placas de control de motores y placa de control remoto con el circuito de control de robot móvil, como se ilustra en la figura 116 y 115.

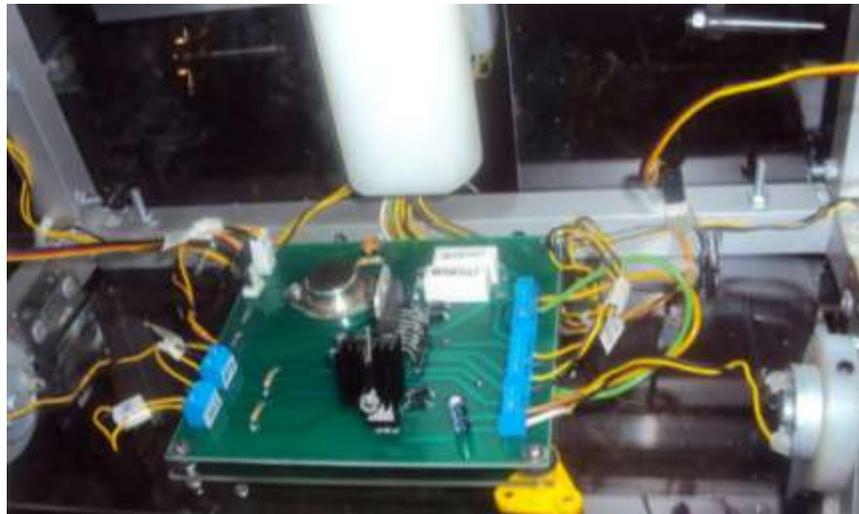


Figura 116. Cableado del circuito del primer vagón

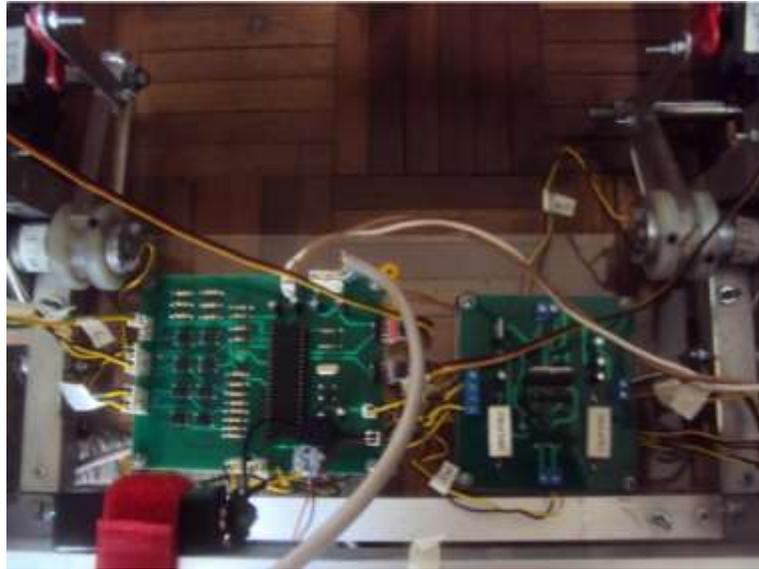


Figura 117. Cableado del circuito del segundo vagón

Para evitar enredos y confusiones en conexión se organizaron los cables con amarras (Figura 118) luego se etiquetaron los cables y los terminales de conexión, como se presenta en la figura 119.



Figura 118. Organización de los cables

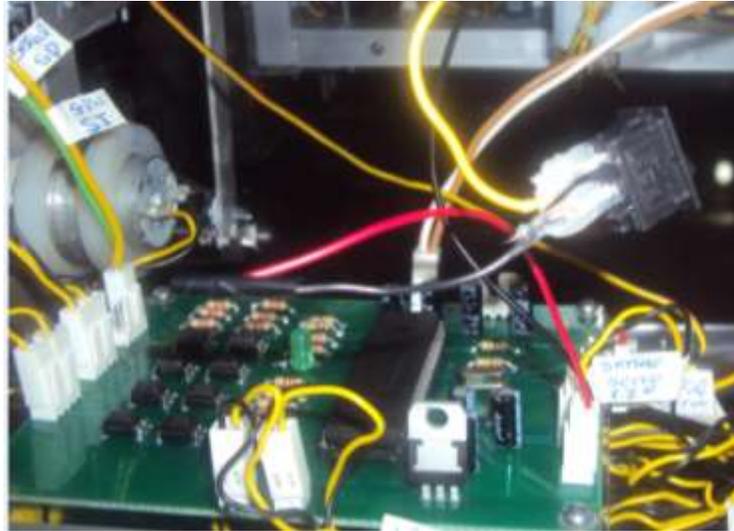


Figura 119. Etiquetado de los cables

Al finalizar el conexionado interno se conectan los cables de alimentación que vienen desde una fuente DC externa (Ver figura 120).

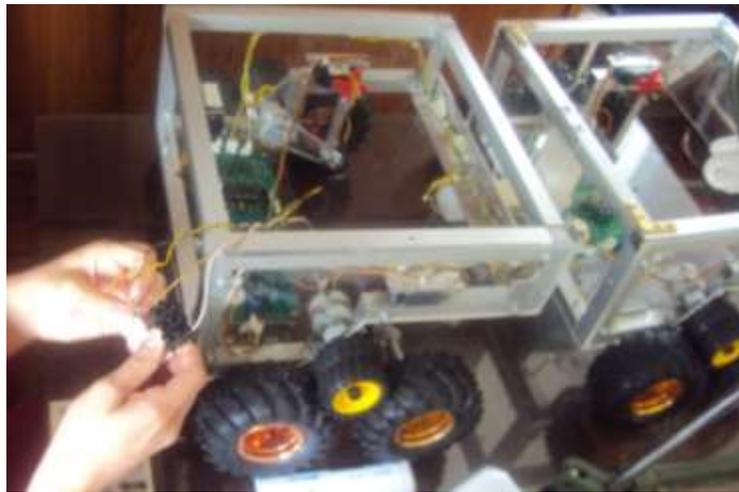


Figura 120. Conexionado de la fuente de alimentación externa

CAPÍTULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1. PRUEBA DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO

En el control remoto se requiere verificar si el movimiento realizado físicamente sobre el acelerómetro corresponde a las salidas del puerto B del microcontrolador como se detalla en la tabla 16:

B3	B2	B1	B0	Acción
0	0	0	0	Nada
0	0	0	1	Adelante
0	0	1	0	Atrás
0	0	1	1	Derecha
0	1	0	0	Izquierda
0	1	0	1	Modo automático
0	1	1	0	Modo manual

Tabla 16. Tabla de verdad de la salida del control remoto.

Para esta prueba se necesita realizar los siguientes pasos:

- 1) Energizar el control remoto mediante el accionamiento del interruptor principal en el control y la conexión de la batería auxiliar ubicado en la parte externa del control.
- 2) Colocar el control remoto en una superficie horizontal y mantenerlo en esta posición.
- 3) Medir los niveles de voltaje a la salida del microcontrolador (B3, B2, B1 y B0).
- 4) Mover el control remoto hacia adelante.
- 5) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 6) Mover el control remoto hacia atrás.

- 7) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 8) Mover el control remoto hacia la derecha.
- 9) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 10) Mover el control remoto hacia la izquierda.
- 11) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 12) Presionar el botón automático en el control remoto.
- 13) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 14) Presionar el botón manual en el control remoto.
- 15) Realizar el paso 3 de la prueba de circuito del control remoto.
- 16) Anotar los resultados obtenidos en cada paso y comparar con la tabla 17.

6.2. RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL CIRCUITO DEL CONTROL REMOTO

Los resultados obtenidos de la prueba del circuito del control remoto se presentan en la tabla 17:

B3	B2	B1	B0	Acción	Medición
0	0	0	0	Nada	✓
0	0	0	1	Adelante	✓
0	0	1	0	Atrás	✓
0	0	1	1	Derecha	✓
0	1	0	0	Izquierda	✓
0	1	0	1	Modo automático	✓
0	1	1	0	Modo manual	✓

Tabla 17. Tabla de resultados de las salidas del control remoto.

Comparando la tabla de resultados se pudo determinar que el control remoto envía de forma correcta los datos hacia el controlador del robot, por lo que se concluye que el controlador recibe valores analógicos adecuados para su procesamiento.

6.3. PRUEBAS A LOS SENSORES INFRARROJOS Y SERVOMOTORES

La finalidad de esta prueba es obtener información acerca de las respuestas de los servomotores al aplicar señales de ancho de pulso para controlarlos en dos posiciones inicial y final además de obtener respuestas de los sensores infrarrojos a una distancia determinada.

Los pasos para la realización de la prueba son los siguientes:

- 1) Verificar las conexiones de las señales desde la placa de control hacia las placas de control de servomotores.
- 2) Modificar en el programa del microcontrolador, para que se realice el movimiento (arriba o abajo) en solamente un servomotor.
- 3) Energizar las fuentes de alimentación y de las placas de control principal.
- 4) Observar el movimiento del servomotor y cómo se comporta a un ancho de pulso determinado.
- 5) Anotar el resultado.
- 6) Repetir el procedimiento para el segundo servomotor del mismo vagón.
- 7) Repetir el procedimiento para los servomotores del segundo vagón.

- 8) Modificar en el programa del microcontrolador, para que se realice el movimiento (arriba o abajo) de todos los servomotores.
- 9) Una vez configurado el ancho de pulso de cada servomotor, se modifica nuevamente el programa del microcontrolador con el objetivo de que este obtenga y procese datos de los sensores infrarrojos (izquierdo y derecho) para programarlo a una distancia determinada.
- 10) Anotar el resultado.

6.4. RESULTADO DE LAS PRUEBAS A LOS SENSORES INFRARROJOS Y SERVOMOTORES

El resultado obtenido de la prueba realizada a los sensores infrarrojos y servomotores se presenta en la tabla 18 y 19:

Servomotor				
Posición	S1I	S1D	S2I	S2D
	[%]	[%]	[%]	[%]
Inicial	60	15	60	20
Final	15	60	20	60

Tabla 18. Porcentajes de ancho de pulso de los servomotores.

Distancia (cm)	Voltaje Analógico (V)
4	2,72
6	1,97
8	1,53
10	1,24
12	1,06
14	0,93
16	0,81
Continua →	

Distancia (cm)	Voltaje Analógico (V)
20	0,67
22	0,6
24	0,56
26	0,52
28	0,5
30	0,48

Tabla 19. Voltajes analógicos con respecto a la distancia del sensor infrarrojo.

Los resultados de la tabla 18 porcentajes de ancho de pulso de los servomotores, muestra el porcentaje del ancho de pulso en el cual se envía la señal al puerto de control del servomotor (20 milisegundos de periodo), los cuales serán procesados en el microcontrolador para su respectivo control.

La tabla 19 voltajes analógicos con respecto a la distancia del sensor infrarrojo, muestra el resultado del estudio realizado en el sensor infrarrojo para determinar en qué rango de valores de voltaje se puede procesar para determinar una acción en el controlador.

6.5. PRUEBA DEL CIRCUITO Y ARRANQUE DE MOTORES DC

Esta prueba tiene como objetivo verificar el funcionamiento correcto y el conexionado adecuado que se requiere de los motores DC, los cuales son encargados de los principales movimientos del Robot sobre el terreno.

La prueba consiste en conectar cada motor hacia la placa del circuito impreso de potencia de su respectivo vagón, los motores se conectan cada uno por separado para determinar el sentido de giro y luego se conectan en conjunto para probar si el circuito diseñado soporta la potencia real.

Los pasos a realizar para la ejecución de la prueba de arranque de motores DC son los descritos a continuación:

- 1) Verificar las conexiones de las señales desde la placa de control (en donde está ubicado el microprocesador) hacia las placas de potencia de los vagones, que son a donde se van a conectar los motores DC.
- 2) Verificar las conexiones de las señales que llegan desde el control remoto hacia la placa de control principal.
- 3) Verificar que las líneas que alimentan a cada placa sean los adecuados.
- 4) Modificar en el programa del microcontrolador, para que se realice el movimiento (adelante o atrás) en solamente un motor.
- 5) Energizar las fuentes de alimentación, de las placas de control principal y la placa de control remoto, (las placas de potencia se energizan al prender la fuente de alimentación de la placa de control.)
- 6) Realizar la prueba mediante el movimiento del control remoto hacia adelante y atrás.
- 7) Anotar el resultado
- 8) Repetir el procedimiento para el segundo motor del mismo vagón.
- 9) Repetir el procedimiento para los motores del segundo vagón.
- 10) Modificar en el programa del microcontrolador, para que se realice el movimiento (adelante o atrás) de todos los motores DC.

6.6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ARRANQUE DE MOTORES DC

Para verificar el sentido de giro de los motores, se debe tener en cuenta la condición de diseño mecánico, en la cual si el motor gira en el sentido horario el movimiento es hacia atrás y a su vez si éste gira en sentido anti-horario el movimiento del robot se efectúa hacia adelante.

MOTOR 1	CONTROL REMOTO	
	ADELANTE	ATRÁS
HORARIO	X	
ANTIHORARIO		X

Tabla 20. Resultado de la prueba de arranque del primer motor DC.

Como se puede observar en la tabla 20 el giro del primer motor DC no fue correspondido por el movimiento del control remoto, por lo que se tuvo que intercambiar la conexión del motor para que se realice el cambio de giro.

Los resultados de las pruebas del segundo, tercer y cuarto motor se presentan en las tablas 21, 22 y 23:

MOTOR 2	CONTROL REMOTO	
	ADELANTE	ATRÁS
HORARIO		X
ANTIHORARIO	X	

Tabla 21. Resultado de la prueba de arranque del segundo motor DC.

MOTOR 3	CONTROL REMOTO	
	ADELANTE	ATRÁS
HORARIO		X
ANTIHORARIO	X	

Tabla 22. Resultado de la prueba de arranque del tercer motor DC.

MOTOR 4	CONTROL REMOTO	
	ADELANTE	ATRÁS
HORARIO		X
ANTIHORARIO	X	

Tabla 23. Resultado de la prueba de arranque del cuarto motor DC.

En las tablas 21, 22 y 23 se pudo apreciar que los sentidos de giro del segundo, tercer y cuarto motor sí corresponden al movimiento ejercido por el control remoto.

6.7. PRUEBA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL ROBOT MÓVIL

La prueba del circuito de control del robot móvil consiste en verificar las señales de entrada y salida del microcontrolador con el fin de garantizar el funcionamiento de la placa de control.

Los pasos a seguir para realizar esta prueba se describen a continuación:

- 1) Verificar las líneas de alimentación que se requiere en cada bornera.
- 2) Verificar la conexión de las señales del control remoto.

- 3) Energizar el circuito mediante la activación del interruptor ubicado sobre el robot móvil.
- 4) Verificar que el indicador de luz de funcionamiento (diodo led) se encienda y apague tres veces consecutivas.
- 5) Constatar que los servomotores se posicionen de tal forma que las ruedas móviles se encuentren ubicados en su posición inicial (abajo).
- 6) Verificar que al acercar un objeto a los sensores infrarrojos las ruedas móviles se posicionen arriba y al quitar después de unos segundos se vuelvan a bajar.
- 7) Mover el control remoto en todos los sentidos y observar el comportamiento del robot móvil.

6.8. RESULTADO DE LA PRUEBA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL ROBOT MÓVIL

A partir de la prueba planteada, se obtuvo los siguientes resultados:

	S1D inicial	S1I inicial	S2D inicial	S2I inicial
Encendido	✓	✓	✓	✓
Sensor Izquierda				
Sensor Derecha				

Tabla 24. Tabla de resultados del control posiciones iniciales

	S1D	S1I	S2D	S2I
	arriba	arriba	arriba	arriba
Sensor Izquierda	✓		✓	
Sensor Derecha		✓		✓

Tabla 25. Tabla de resultados del control posiciones finales

En donde:

S: Servomotor

1: vagón delantero

2: vagón posterior

D: Derecha

I: Izquierda

Analizando las tablas 24 y 25 se puede concluir que el funcionamiento del robot está completo y acorde a los requerimientos que se propuso con el objetivo.

6.9. PRUEBAS MECÁNICAS DE LOS MECANISMOS

En esta prueba se comprueban que los mecanismos durante el funcionamiento cumplan con su objetivo de diseño y no presenten complicaciones. Entre los mecanismos que serán parte de la prueba son los mecanismos de las ruedas móviles, el sistema de transmisión de los rodillos.

Los pasos para realizar las pruebas mecánicas:

- 1) Ubicar el robot móvil a un nivel más alto de la superficie sobre su base inferior, dejando las ruedas en el aire
- 2) Energizar las fuentes de alimentación del circuito de control y control remoto.
- 3) Realizar movimientos hacia adelante y atrás y verificar que las ruedas fijas y móviles de cada rodillo, se muevan a la misma velocidad, lo que significa que las ruedas ejercen la misma presión sobre el rodillo.
- 4) Realizar la misma prueba pero dejando al robot móvil sobre diferentes superficies, después de un tiempo verificar las uniones de las ruedas móviles que no se hayan aflojado.
- 5) Detener el robot móvil y acercar un objeto a los sensores infrarrojos y comprobar que los motores fácilmente y sin interrupciones puedan subir y bajar varias veces las ruedas.
- 6) Poner en marcha al robot móvil y acercarle a obstáculos desde hasta 10 cm. Observar el comportamiento del robot y anotar cada resultado.

6.10. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS

Como resultado de las pruebas mecánica se obtuvo lo siguiente:

	Vel. Iguales	Vel. Diferentes
R1D	✓	
R1I	✓	
R2D	✓	
R2I	✓	

Tabla 26. Tabla de resultados de prueba de los rodillos

En donde:

R: Rodillo

1: vagón delantero

2: vagón posterior

D: Derecha

I: Izquierda

Las pruebas mostraron resultados muy positivos y adecuados, como se esperaba. Todas las ruedas giraban a la misma velocidad de tal forma que el robot pudo realizar un recorrido sobre una línea completamente recta, de forma mucho más eficiente que el diseño anterior, ya que el contacto entre las ruedas en ningún momento se pierde.

Para la prueba de salvar los obstáculos, también los resultados fueron muy diferentes del anterior diseño, el robot móvil sin ninguna dificultad pasó por todos los obstáculos de diferentes tamaños. En la siguiente tabla se muestran los obstáculos que fueron probados:

ALTURA DE LA GRADA	PASÓ(✓) NO PASÓ(X)
1 cm	✓
2 cm	✓
3 cm	✓
4 cm	✓
5 cm	✓
6 cm	✓
7 cm	✓
8 cm	✓
9 cm	✓
10 cm	✓

Tabla 27. Tabla de resultado de la prueba de salvar obstáculos

En esta tabla se puede notar que el robot móvil supera los obstáculos para los cuales fue diseñado.

Además las ruedas móviles se levantaron correctamente, firmes y sin dificultad, pudiendo mantener arriba las ruedas sin exigir mucho a los servomotores.

El se realiza con el concepto de un robot tipo diferencial, es decir que las ruedas de cada lado giran en sentidos diferentes pero en este caso a velocidades iguales, por lo tanto el robot gira en su propio eje.

En el mecanismo tiene la característica de que cada vagón gire con respecto a su propio eje, se realizó una unión tipo par cilíndrico con un solo grado de libertad para otorgar esa característica a los vagones, con un diseño robusto y confiable, en la prueba se puede notar que la unión soporta perfectamente el peso de cada vagón y al pasar por los obstáculos cada vagón mantiene su posición sin ser afectado por la inclinación del otro vagón.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Una vez culminado el diseño e implementación del proyecto dentro de los plazos establecidos, se han cumplido todos los objetivos planteados, cubriendo todas las necesidades inherentes al funcionamiento del robot móvil experimental 8x8 articulado capaz de salvar obstáculos.
- Los programas para el diseño y simulación de los mecanismos mecánicos, nos ayudan a verificar el funcionamiento y comportamiento de los materiales de forma ideal a un nivel casi real, pero existen muchos factores más, que en la simulación no son tomados en cuenta y hacen que el comportamiento no sea ideal y la simulación y la realidad sean dos funcionamientos distintos.
- Debido a que los materiales que se utilizan para la construcción son existentes o son más económicos, la construcción mecánica tienen distintos tamaños y pesos con respecto al diseño original. Lo que varía el comportamiento final del robot móvil, y hace el funcionamiento real sea menos eficiente que el diseño ideal.
- La deformación en las ruedas es uno de los factores más importantes en el funcionamiento del Robot móvil 8X8, ya que

debido a esta característica la rueda se adhiere más a la superficie irregular y con mayor tracción supera los obstáculos.

- Existen diversos software para el diseño de placas electrónicas en el mercado, se debe seleccionar el más adecuado teniendo en cuenta los componentes a implementar, facilidad de ruteo de pistas, normas que integra para un diseño adecuado y la facilidad de impresión de la placa para su posterior construcción.
- Se debe considerar las normas en el diseño de placas electrónicas donde se describen literales los cuales permiten la selección del ancho de pistas, distancias entre componentes y la distancia entre componentes y el borde de la placa entre otras, que aseguran el funcionamiento de la placa implementada.
- La separación de sentencias de ejecución en frecuencias de trabajo permite separar posibles interrupciones entre sentencias.
- Para la selección adecuada de actuadores es necesario realizar un sobre dimensionamiento de las capacidades y características de los mismos con la finalidad de garantizar un correcto funcionamiento a lo largo del tiempo.
- Es importante separar las fuentes de alimentación entre los circuitos de potencia y circuitos de control, debido al ruido que puede generar al compartir la misma fuente y la consecuencia será el mal funcionamiento de los actuadores, lenta respuesta de los sensores o recibir datos erróneos de parte de éstos.

- El control remoto por radiofrecuencia también es otro componente externo al robot contribuye a aumentar el ruido dentro de los circuitos, por lo que este control se realizó por cable.
- La estructura de los vagones es vulnerable frente a condiciones ambientales, como el polvo, la humedad, y suciedades que pueden perjudicar el funcionamiento de los actuadores y afectar a los circuitos internos del robot móvil.

7.2. RECOMENDACIONES

- EL Robot actual tiene una fuente externa alimentándolo por cable, esta fuente se puede mejorar optando por una batería de 16AH como mínimo y con un peso y tamaño adecuado para que pueda ir a bordo, y de esta manera evitar la alimentación por cable.
- Realizar un circuito de filtro de ruido, para que el control remoto sea por radio frecuencia.
- Mejorar la eficiencia del robot, construyéndolo con materiales más livianos y realizando la estructura más pequeña, de esta forma los motores tienen un mejor desempeño.
- La selección de los servomotores que articulan las ruedas móviles, es importante ya que son el principal elemento que sufre cuando el robot choca contra un obstáculo, por lo que se debe seleccionar un servomotor con características físicas más robustas.

- La selección adecuada de motores facilita el control de los mismos ya que reduce el número de entradas o señales para realizar un control extra a cada componente.
- Es preferible separar las señales de alimentación con las señales de control debido a las interferencias que están causando haciendo que las señales presenten distorsiones por lo que se obtienen lecturas erróneas.
- Es recomendable colocar fuentes de alimentación lo más ligera posible debido al peso que influye en el movimiento del robot móvil.
- La separación eléctrica mediante opto acopladores de las señales de control hacia los actuadores es importante debido al ruido que generan los motores por motivos de corriente en el arranque.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laeza. (2001). *Aspects on path planning for mobile robots*. Reporte interno de Technical university of Cluj-Napoca.
- [2] Martha, A. H. (s.f.). *Diseño y Control de robot Móviles*. Nuevo Laredo: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.
- [3] Estudio de Robots Móviles con rueda. (s.f.). *Capitulo I*.
- [4] Telefónica, E. F. (s.f.). *Pontificia universidad JAVERIANA*. Bogotá: Departamento de Electrónica.
- [5] UTN-FICA-EISIC. (s.f.). *Locomoción de sistemas robóticos*. Capitulo II.
- [6] Valencia, J. H. (s.f.). *Mantenimiento de los sistemas de transmisión y frenado, Mecánica Automotriz*. Atacama: Fundación universidades de Atacama.
- [7] Mauricio, I. R. (s.f.). *Sistemas de transmisión*.
- [8] Máquinas, T. d. (2001). *Capitulo 5: engranajes*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [9] (España), I. N. (1984). *UNE 20 621-84. Parte 3, Circuitos impresos. Diseño y utilización de placas impresas*. IRANOR.