



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL

TÍTULO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO

MÓVIL TELEOPERADO INALÁMBRICAMENTE PARA INSPECCIÓN EN

LUGARES DE ALTO RIESGO”

AUTOR: GALLEGOS CORREA, ALEJANDRO JOSÉ

DIRECTOR: MSC. IBARRA JÁCOME, OSWALDO ALEXANDER

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO MÓVIL TELEOPERADO INALÁMBRICAMENTE PARA INSPECCIÓN EN LUGARES DE ALTO RIESGO**” fue realizado por el señor *Gallegos Correa Alejandro José*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de marzo del 2018

Ing. Alexander Ibarra

DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **GALLEGOS CORREA, ALEJANDRO JOSÉ** con cédula de identidad N° 171911271-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO MÓVIL TELEOPERADO INALÁMBRICAMENTE PARA INSPECCIÓN EN LUGARES DE ALTO RIESGO”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 15 de marzo del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alejandro José Gallegos C.', is written over a horizontal dotted line.

GALLEGOS C. ALEJANDRO JOSÉ

C.C.: 171911271-4



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORIZACIÓN

*Yo, **GALLEGOS CORREA, ALEJANDRO JOSÉ** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO MÓVIL TELEOPERADO INALÁMBRICAMENTE PARA INSPECCIÓN EN LUGARES DE ALTO RIESGO**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Sangolquí, 15 de marzo del 2018

.....
GALLEGOS C. ALEJADRO JOSÉ

C.C.: 171911271-4

DEDICATORIA

A la investigación y Ciencia

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, hermanos y todos mis amigos por su apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
RESUMEN.....	xxvi
ABSTRACT.....	xxvii
CAPÍTULO I	
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3

1.4 Justificación e importancia	4
1.5 Alcance	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Robots móviles	9
2.2 Clasificación de los robots móviles según su locomoción.....	11
2.2.1 Robots Rodantes o con ruedas	11
2.2.2 Robots caminantes.....	11
2.2.3 Robots rulantes	12
2.2.4 Otros.....	12
2.3 Arquitectura de un robot móvil	13
2.4 Métodos de navegación.....	14
2.4.1. Teleoperación.....	15
2.4.2. Navegación por medio de sensores	16
2.4.3. Navegación por mapeo	16
2.5 Componentes de sistemas teleoperados	17
2.6 Métodos de control en sistemas teleoperados.....	18
2.6.1. Control bilateral	18
2.6.1. Control Supervisado y coordinado.....	20

2.8 Telerobótica	21
2.9 Comunicación inalámbrica	24
2.10 Tecnologías existentes del prototipo a desarrollar	26

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA..... 33

3.1 Necesidades o requerimientos.....	33
3.2 Definición de especificaciones	34
3.3 Generación del concepto	35
3.4 Alternativas para el diseño	36
3.4.1. Módulo 1. Sistema de locomoción.....	36
3.4.2. Módulo 2. Estructura mecánica	38
3.4.3 Módulo 3. Accionamientos	40
3.4.4. Módulo 4. Potencia.....	41
3.4.5. Módulo 5. Teleoperación	45
3.4.6. Módulo 6. Control	47
3.4.7 Módulo 7. Energía	50
3.5. Evaluación y selección de las alternativas para el diseño.....	51
3.5.1 Módulo 1. Sistema de locomoción.....	52
3.5.2 Módulo 2. Estructura mecánica	54

3.5.3 Módulo 3. Accionamientos	57
3.5.4 Módulo 4. Potencia.....	60
3.5.5 Módulo 5. Teleoperación	62
3.5.6 Módulo 6. Control	65
3.5.7 Módulo 7. Energía	68
3.6 Definición del diseño	69
3.6.1 Módulo 1 Sistema de locomoción.....	69
3.6.1.1 Diseño de equilibrio y maniobrabilidad	74
3.6.2 Módulo 2. Estructura Mecánica	75
3.6.2.1 Diseño de un sistema que soporte golpes	76
3.6.2.1.1 Tracción.....	85
3.6.2.1.2 Sistema de suspensión	87
6.1.2.2 Armazón y chasis.....	96
3.6.3 Módulo 3. Accionamientos	105
3.6.3.2 Actuadores para el posicionamiento de la cámara	111
3.6.4 Módulo 4. Potencia.....	114
3.6.5 Módulo 5. Teleoperación	116
3.6.5.1 Diseño del sistema de visión.....	116
3.6.5.2 Diseño de la teleoperación de mando.....	122

3.6.6 Módulo 6. Control	124
3.6.7. Módulo 7. Energía	127
3.7 Definición del concepto final	131
3.7.1 Circuito electrónico de la Estación Robot	131
3.7.1 Circuito electrónico de la Estación de mando o local	134
3.8 Implementación del Sistema	141
3.8.1 Implementación electrónica	141
3.8.2 Implementación mecánica	144
3.8.3 Ensamblaje	146
CAPÍTULO IV	
PRUEBAS Y RESULTADOS	153
4.1 Pruebas y resultados de movilidad	153
4.1.1 Pruebas y resultados de Desplazamiento	153
4.1.2 Prueba y resultados en terrenos	154
4.2 Pruebas y resultados de teleoperación	156
4.2.1 Pruebas y resultados de alcance y autonomía	156
4.3. Pruebas y resultados de resistencia a caídas	160
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	162

5.1. Conclusiones	162
5.2 Recomendaciones	163
BIBLIOGRAFÍA.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Subproblemas de navegación</i>	14
Tabla 2	<i>Tipos de sensores en robótica móvil</i>	16
Tabla 3	<i>Funciones de Supervisión</i>	20
Tabla 4	<i>Tecnologías de redes inalámbricas</i>	25
Tabla 5	<i>Características del prototipo robot móvil poliarticulado</i>	26
Tabla 6	<i>Características del robot TMR-1</i>	28
Tabla 7	<i>Especificaciones del robot móvil para asistencia al cuerpo de bomberos</i>	29
Tabla 8	<i>Características del robot Throwbot XT</i>	30
Tabla 9	<i>Necesidades para la matriz QFD</i>	33
Tabla 10	<i>Matriz de necesidades y especificaciones QFD</i>	35
Tabla 11	<i>Módulos para el prototipo robótico móvil</i>	36
Tabla 12	<i>Sistema de locomoción por ruedas</i>	37
Tabla 13	<i>Sistema de locomoción por bandas o cadenas</i>	37
Tabla 14	<i>Sistema de locomoción por patas</i>	37
Tabla 15	<i>Materiales considerados para la construcción del armazón</i>	38
Tabla 16	<i>Clasificación de sistema de aislamiento</i>	39
Tabla 17	<i>Ventajas y desventajas de polímeros</i>	39
Tabla 18	<i>Ventajas y desventajas de Motor paso a paso</i>	40
Tabla 19	<i>Ventajas y desventajas de motoreductor</i>	41

Tabla 20 <i>Ventaja y desventaja de servo motor</i>	41
Tabla 21 <i>Ventajas y desventajas de Puente H con transistores</i>	42
Tabla 22 <i>Ventajas y desventajas de puente H en C.I</i>	43
Tabla 23 <i>Ventajas y desventajas de driver de potencia</i>	44
Tabla 24 <i>Ventajas y desventajas de optoacopladores</i>	45
Tabla 25 <i>Ventajas y desventajas del Bluetooth</i>	46
Tabla 26 <i>Ventajas y desventajas de WIFI</i>	46
Tabla 27 <i>Ventajas y desventajas del sistema FPV</i>	47
Tabla 28 <i>Ventajas y desventajas de módulos de RF</i>	47
Tabla 29 <i>Ventajas y desventajas de Codificadores y Decodificadores</i>	48
Tabla 30 <i>Ventajas y desventajas del Rasperry</i>	49
Tabla 31 <i>Ventajas y desventajas del Arduino</i>	49
Tabla 32 <i>Ventajas y desventajas del control ON/OFF</i>	50
Tabla 33 <i>Ventajas y desventajas del Control PID</i>	50
Tabla 34 <i>Ventajas y desventajas de medios energéticos</i>	51
Tabla 35 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 1</i>	
<i>Sistema de locomoción</i>	52
Tabla 36 <i>Ponderación de control para las alternativas al Módulo 1</i>	52
Tabla 37 <i>Ponderación de implementación para las alternativas al Módulo 1</i>	53
Tabla 38 <i>Ponderación de movilidad para las alternativas al Módulo 1</i>	53
Tabla 39 <i>Ponderación de costo para las alternativas al Módulo 1</i>	53

Tabla 40 <i>Conclusión en la selección alternativa de diseño al Módulo 1.</i>	53
Tabla 41 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 1. Materiales</i> <i>para el almacén</i>	54
Tabla 42 <i>Ponderación de ensamblaje para las alternativas de materiales</i>	54
<i>para el almacén</i>	54
Tabla 43 <i>Ponderación de resistividad en volumen para las alternativas de</i> <i>materiales del almacén</i>	55
Tabla 44 <i>Ponderación de ligero para las alternativas de materiales de almacén</i>	55
Tabla 45 <i>Conclusión en la selección alternativa de materiales para el almacén</i>	55
Tabla 46 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el soporte para golpes</i>	56
Tabla 47 <i>Ponderación de implementación para las alternativas de soporte</i> <i>para golpes</i>	56
Tabla 48 <i>Ponderación de absorber energía para las alternativas de soporte</i> <i>para golpes</i>	56
Tabla 49 <i>Ponderación de ligero para las alternativas de soporte para golpes</i>	56
Tabla 50 <i>Conclusión en la selección alternativa de soporte para golpes</i>	57
Tabla 51 <i>Criterios de evaluación para el Sistema de desplazamiento</i>	57
Tabla 52 <i>Ponderación de velocidad para el Sistema de desplazamiento</i>	58
Tabla 53 <i>Ponderación de potencia para el Sistema de desplazamiento</i>	58
Tabla 54 <i>Ponderación de control para el Sistema de desplazamiento</i>	58
Tabla 55 <i>Conclusión en la selección alternativa del Sistema de desplazamiento</i>	58

Tabla 56. <i>Criterios de evaluación para el Sistema de despliegue</i>	59
Tabla 57 <i>Ponderación de compacto para el Sistema de despliegue</i>	59
Tabla 58 <i>Ponderación de potencia para el Sistema de despliegue</i>	59
Tabla 59 <i>Ponderación de control para el Sistema de despliegue</i>	60
Tabla 60 <i>Conclusión en la selección alternativa del Sistema de despliegue</i>	60
Tabla 61 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 4. Potencia</i>	60
Tabla 62 <i>Ponderación de implementación para las alternativas del Módulo 4</i>	
<i>Potencia</i>	61
Tabla 63 <i>Ponderación de potencia para las alternativas del Módulo 4. Potencia</i>	61
Tabla 64 <i>Ponderación de compacto para las alternativas del Módulo 4. Potencia</i>	61
Tabla 65 <i>Conclusión en la selección alternativa del módulo 4. Potencia</i>	61
Tabla 66 <i>Ponderación de criterios de evaluación para Sistema de visión</i>	62
Tabla 67 <i>Ponderación de implementación para las alternativas de Sistema de visión</i> .	62
Tabla 68 <i>Ponderación de velocidad para las alternativas de Sistema de visión</i>	62
Tabla 69 <i>Ponderación de alcance para las alternativas de Sistema de visión</i>	63
Tabla 70 <i>Conclusión en la selección alternativa de Sistema de visión</i>	63
Tabla 71 <i>Ponderación de criterios de evaluación para Sistema de mando</i>	63
Tabla 72 <i>Ponderación de implementación para las alternativas de Sistema de mando</i>	64
Tabla 73 <i>Ponderación de velocidad para las alternativas de Sistema de mando</i>	64
Tabla 74 <i>Ponderación de alcance para las alternativas de Sistema de mando</i>	64
Tabla 75 <i>Conclusión en la selección alternativa de Sistema de mando</i>	64

Tabla 76 <i>Ponderación de criterios de evaluación para Controlabilidad.....</i>	65
Tabla 77 <i>Ponderación de I/O para las alternativas de controlabilidad</i>	65
Tabla 78 <i>Ponderación de programación para las alternativas de controlabilidad</i>	65
Tabla 79 <i>Ponderación de costo para las alternativas de controlabilidad.....</i>	66
Tabla 80 <i>Conclusión en la selección alternativa para controlabilidad</i>	66
Tabla 81 <i>Ponderación de criterios de evaluación para tipo de control.....</i>	66
Tabla 82 <i>Ponderación de implementación para las alternativas para el tipo de control</i>	67
Tabla 83 <i>Ponderación de accionamiento para las alternativas para el tipo de control..</i>	67
Tabla 84 <i>Ponderación de control para las alternativas para el tipo de control</i>	67
Tabla 85 <i>Conclusión en la selección alternativa para el tipo de control.....</i>	67
Tabla 86 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 7. Energía</i>	68
Tabla 87 <i>Ponderación de capacidad para las alternativas del Módulo 7. Energía</i>	68
Tabla 88 <i>Ponderación de costo para las alternativas del Módulo 7. Energía.....</i>	68
Tabla 89 <i>Ponderación de compacto para las alternativas del Módulo 7.Energía.....</i>	68
Tabla 90 <i>Conclusión en la selección alternativa del Módulo 7.Energía</i>	69
Tabla 91 <i>Alternativas para cada módulo.....</i>	69
Tabla 92 <i>Configuraciones de un sistema de locomoción por ruedas</i>	72
Tabla 93 <i>División de los polímeros en función a su estructura interna y..... comportamiento de calor.....</i>	77
Tabla 94 <i>Siglas de elastómeros comunes</i>	79
Tabla 95 <i>Criterios de evaluación para el elastómero</i>	83

Tabla 96 <i>Ponderación de Elasticidad para las alternativas del elastómero</i>	84
Tabla 97 <i>Ponderación de costo para las alternativas del elastómero</i>	84
Tabla 98 <i>Ponderación de intemperie para las alternativas del elastómero</i>	84
Tabla 99 <i>Ponderación de abrasión para las alternativas del elastómero</i>	84
Tabla 100 <i>Conclusión en la selección alternativa del elastómero</i>	84
Tabla 101 <i>Resultados de simulación de rodaduras</i>	91
Tabla 102 <i>Especificaciones del robot a desarrollar</i>	96
Tabla 103 <i>Tipos de chasis en automóviles</i>	97
Tabla 104 <i>Componentes del robot a construir</i>	99
Tabla 105 <i>Especificaciones de mini motorreductor pololu</i>	110
Tabla 106 <i>Especificaciones de H301</i>	113
Tabla 107 <i>Requerimientos eléctricos de los actuadores</i>	114
Tabla 108 <i>Especificaciones Tx TS5828</i>	118
Tabla 109 <i>Asignación de frecuencia del TS5828</i>	119
Tabla 110 <i>Asignación de frecuencias en canales de ER32</i>	120
Tabla 111 <i>Especificaciones del receptor ER32</i>	120
Tabla 112 <i>Especificaciones mini cámara</i>	121
Tabla 113 <i>Especificaciones de la pantalla TFT LCD</i>	122
Tabla 114. <i>Especificaciones del Transceiver NRF24L01</i>	123
Tabla 115 <i>Especificaciones de las estaciones</i>	124
Tabla 116 <i>Especificaciones técnicas del arduino mini</i>	125

Tabla 117	<i>Controlabilidad de la velocidad de motoredutores vs rango de voltaje.....</i>	126
Tabla 118	<i>Requerimientos energéticos de elementos eléctricos de cada estación</i>	127
Tabla 119	<i>Reguladores de voltaje.....</i>	129
Tabla 120	<i>Reguladores para los elementos electrónicos.....</i>	130
Tabla 121	<i>Funciones del Circuito de alimentación al robot.....</i>	132
Tabla 122	<i>Funciones del circuito controlador.....</i>	133
Tabla 123	<i>Funciones del circuito potencia a motores</i>	134
Tabla 124	<i>Funciones del Circuito recepción de A/V.....</i>	135
Tabla 125	<i>Funciones del circuito de mando.....</i>	136
Tabla 126	<i>Calificación de resultados de desplazamientos.....</i>	154
Tabla 127	<i>Resultados de pruebas de terrenos</i>	155
Tabla 128	<i>Resultados de alcances de transmisión.....</i>	157
Tabla 129	<i>Energía de la batería de cada estación.....</i>	159
Tabla 130	<i>Resultados de pruebas en caída libre.....</i>	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los robots según su arquitectura.....	6
Figura 2. Robot Rover	7
Figura 3. Aplicaciones de seguridad en robots móviles	8
Figura 4. Interacción robot-entorno.....	10
Figura 5. Ejemplo de robot móvil con ruedas.....	11
Figura 6. Robot cuadrúpedo desarrollado.....	12
Figura 7. Ejemplo de robot rulante.....	12
Figura 8. Robot articulado MAKRO	13
Figura 9. Arquitectura de robot móvil.....	13
Figura 10. Sistema teleoperado de un robot.....	15
Figura 11. Diferentes tareas que un robot debe de resolver.....	17
Figura 12. Esquema de maestro-esclavo	18
Figura 13. Esquema de control unilateral de un dispositivo háptico	19
Figura 14. Ejemplo de control bilateral	19
Figura 15. Estación de operación con el operador	21
Figura 16. (Remotec Andros Wolverine).....	22
Figura 17. Interfaz de usuario realizado en un software	22
Figura 18. Tecnologías de medios de comunicación.....	23
Figura 19. Sensores	23

Figura 20. Prototipo robot móvil poliarticulado.....	27
Figura 21. Robot TMR-1	28
Figura 22. Robot para asistencia al cuerpo de bomberos	29
Figura 23. Robot Throwbot XT.....	30
Figura 24. Ruedas del robot Throwbot XT	31
Figura 25. Throwbot XT lanzado hacia el interior de una casa	31
Figura 26. Aplicaciones del Throwbot XT	32
Figura 27. Puente H con transistores	42
Figura 28. Puente H con integrado L293B.....	43
Figura 29. Módulo L298	44
Figura 30. Puente H con optoacopladores	45
Figura 31. Tipos de ruedas. (a) Rueda estándar, 2 grados de libertad (motorizado).....	
(b) Rueda loca, dos grados de libertad. (c) Rueda sueca, 3 grados.....	
de libertad (motorizada). (d) Bola o rueda esférica.....	71
Figura 32. Esquema básico de configuración de ruedas del robot a construir.....	74
Figura 33. Maniobrabilidad del robot móvil a desarrollar	75
Figura 34. Posibles contactos entre la superficie y las ruedas	76
Figura 35. Curvas Esfuerzo vs Deformación para los tipos de polímeros	78
Figura 36. Índice de abrasión vs Resistencia al desgarro de algunos elastómeros.....	80
Figura 37. Grado de resistencia de abrasión en los elastómeros	80
Figura 38. Comparación de elongación a la rotura de elastómeros comunes	81

Figura 39. Comparación de la resistencia a la intemperie de elastómeros comunes. . .	81
Figura 40. Comparación de la resistencia a la compresión de los elastómeros..... comunes	82
Figura 41. Comparación de la resistencia al impacto sobre elastómeros comunes	83
Figura 42. Caucho de silicona con catalizador	85
Figura 43. Fuerza de adhesión (izquierda) y efecto de histéresis (derecha)	86
Figura 44. Componentes del parámetro viscoelástico	88
Figura 45. Modelos de rodaduras	90
Figura 46. Convergencia de malla del modelo 1.....	91
Figura 47. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 1	91
Figura 48. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 2	92
Figura 49. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 3	92
Figura 50. Molde de la rueda a fabricar	93
Figura 51. Aro	94
Figura 52. Sujeción del aro en la rodadura	94
Figura 53. Método de enlazar entre el aro y la rodadura	95
Figura 54. Modo de ensamble Rodadura-aro-motor.....	95
Figura 55. Conjunto de estructuras: casi, carrocería y elementos de soporte	98
Figura 56. Elementos del robot móvil a construir	99
Figura 57. Forma de la caída más crítica del robot.....	100
Figura 58. Parámetros de caída	101

Figura 59. Opciones de resultados	101
Figura 60. Simulación de caída finalizada	102
Figura 61. Esfuerzos en la carrocería	103
Figura 62. Esfuerzos en el refuerzo izquierdo	103
Figura 63. Vista superior e inferior (desmontada la carrocería)	104
Figura 64. Resultante de desplazamiento en la zona con mayor esfuerzo..... de von mises.....	104
Figura 65. Resultado de la Simulación de Fatiga	105
Figura 66. Diagrama de cuerpo libre de la rueda.....	106
Figura 67. Motoreductor pololu	110
Figura 68. Sentidos de posición: (a) posición recta, (b) posición inversa	111
Figura 69. Rotación de cámara por medio del servo motor	112
Figura 70. Micro servo H301.....	113
Figura 71. Giro de cámara.....	114
Figura 72. Conexión de un motor al C.I L293D.....	115
Figura 73. Elementos básicos de un sistema FPV	117
Figura 74. Transmisor audio/video Eachine TX526	118
Figura 75. Mini receptor ER32	119
Figura 76. Mini Cámara con micrófono y visión nocturna	121
Figura 77. Pantalla TFT LCD	122
Figura 78. Transceiver RNF 24L01.....	123

Figura 79. Arduino mini.....	125
Figura 80. Joystick analógico de 2 ejes	126
Figura 81. Voltaje correspondiente a la posición del joystick.....	126
Figura 82. Batería AR.Drone 2.0	128
Figura 83. Batería DC - 12680 [V]	130
Figura 84. Circuito de Alimentación al robot	132
Figura 85. Circuito controlador - robot	133
Figura 86. Circuito potencia a motores	134
Figura 87. Circuito recepción de audio/video y salida amplificada de audio	135
Figura 88. Circuito de mando.....	136
Figura 89. Corriente vs Sección transversal	138
Figura 90. Ancho del conductor vs Sección transversal	138
Figura 91. Placa PCB en 3D del Circuito de alimentación robot.....	139
Figura 92. Placa PCB en 3D del Circuito de potencia a motores.....	139
Figura 93. Placa PCB en 3D del Circuito Controlador	140
Figura 94. Placa PCB en 3D del Receptor A/V.....	140
Figura 95. Placa electrónica en 3D del Circuito de mando	140
Figura 96. Placa electrónica de Mando	142
Figura 97. Placa electrónica Receptor de A/V	142
Figura 98. Placa electrónica del Circuito de potencia a motores	143
Figura 99. Placa electrónica del Circuito controlador.....	143

Figura 100. Placa electrónica de alimentación al robot	144
Figura 101. Corte a medida de placas de aluminio.....	144
Figura 102. Procesos: Doblado, acabado, taladrado	145
Figura 103. Placas de aluminio terminadas	145
Figura 104. Piezas y partes elaborados en impresión 3D	146
Figura 105. Ensamble del control remoto	147
Figura 106. Masa a tierra del control remoto	147
Figura 107. Ensamble final del control de mando.....	148
Figura 108. Aplicación de aceite en el molde	148
Figura 109. (De izquierda a derecha) Mezcla del caucho de silicona y..... mezcla del catalizador.....	149
Figura 110. Ensamble aro y motoreductor, antes de colocar dentro del..... caucho de silicona.....	149
Figura 111. Relleno de caucho de silicona y colocación del aro con el motoreductor	149
Figura 112. Etapa final de curado y desmolde.....	150
Figura 113. Ensamble de placas de aluminio a placa base	150
Figura 114. Ensamble de placas PBC's y batería hacia la placa base	151
Figura 115. Ensamble final en la placa base	151
Figura 116. Ensamble final en la carrocería	152
Figura 117. Ensamble final del robot	152
Figura 118. Modelos de rodaduras	153

Figura 119. Prueba de plano inclinado en cerámica, piso flotante, madera y.....	
alfombra	155
Figura 120. Prueba en plano inclinado en concreto, césped y asfalto	155
Figura 121. Muestra del video durante la prueba.	158
Figura 122. Prueba de visión nocturna en un cuarto oscuro.....	158
Figura 123. Conexión con monitor externo	158
Figura 124. Prueba de altura a 0.5, 1, 1.5 y 2 metros.....	160
Figura 125. Muestra entre el nuevo diseño y el anterior diseño.	161

RESUMEN

El presente trabajo de titulación detallado consiste en el diseño y construcción de un prototipo robótico móvil para la inspección de lugares de alto riesgo enfocado a la seguridad civil. El robot tiene la capacidad de ser maniobrado inalámbricamente por medio de un control remoto y transmitir audio y video en tiempo real. El objetivo del desarrollo de este proyecto es la inspección y reconocimiento del entorno en sitios de posibles reuniones delictivas por medio del robot, mientras que los agentes del orden monitorizan y teledirigen al robot desde un lugar seguro; de esta manera, salvaguardando sus vidas. Además, se ha diseñado e investigado una geometría especial para la rodadura de la rueda a base de un material de alta deformidad y desplazamiento, con la finalidad de absorber los efectos de caída libre de hasta 2 metros. El alcance máximo en línea de vista es de 260 metros y en interiores es de 90 metros con una autonomía máxima de 50 minutos., lo que le hace un robot espía a corta distancia.

PALABRAS CLAVES:

- **ROBOT MÓVIL**
- **TELEDIRIGIR**
- **SISTEMA DE LOCOMOCIÓN**
- **TELEROBÓTICA**

ABSTRACT

The present detailed titling work consists in the design and construction of a mobile robotic prototype for the inspection of high risk places focused on civil security. The robot has the ability to be maneuvered wirelessly by means of a remote control and transmit audio and video in real time. The objective of the development of this project is the inspection and recognition of the environment in sites of possible criminal meetings by means of the robot, while the agents of order monitor and remote-control the robot from a safe place; in this way, safeguarding their lives. In addition, a special geometry has been designed and researched for the rolling of the wheel based on a material of high deformity and displacement, in order to absorb the effects of free fall of up to 2 meters. The maximum line of sight in sight is 260 meters and in interiors it is 90 meters with a maximum autonomy of 50 minutes., Which makes it a spy robot at close range.

KEYWORDS:

- **MOBILE ROBOT**
- **REMOTE CONTROL**
- **LOCOMOTION SYSTEM**
- **TELEROBOTIC**

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

Las nuevas concepciones de seguridad humana tienen como meta garantizar la protección del ser humano, fundamentado en la gobernabilidad y el desarrollo; la aplicación correcta e integral de sus leyes y contenidos asegura la estabilidad y la paz interna y externa (RESDAL, 2006).

La defensa, en la actualidad, integra la prevención de conflictos, el control del establecimiento frente a riesgos de regionalización de conflictos para desarrollar una capacidad de protección efectiva de su población, patrimonio, recursos e intereses enfrentando cualquier tipo de amenaza, con el propósito de garantizar una sociedad de convivencia pacífica.

Muchas veces los delincuentes, pandillas, mafias, carteles de drogas poseen mejor arsenal bélico que las organizaciones de orden público, aumentando la posibilidad de daño físico a los miembros de estas entidades. Al momento de intervenir en reuniones, encuentros o allanamientos de organizaciones delictivas, los miembros del orden tienen un alto riesgo de afectación física e incluso pérdida de vida.

Parte de la solución es que un grupo élite de miembros del orden, pueda monitorear con algún tipo de dispositivo robótico tele operado desde un punto seguro antes de la inserción a dicho lugar; con esto decenas de vidas humanas se pudieran

salvaguardar ya que los agentes sabrían con cierta certeza a qué tipo de arsenal se enfrentan y la posición exacta de los delincuentes.

1.2 Antecedentes

Las manifestaciones del crimen organizado, en término transnacional, ha crecido en el Ecuador; siendo la principal, el narcotráfico. Por lo tanto, se ha implementado una serie de Políticas Públicas para contrarrestar este fenómeno a nivel nacional. Actualmente, el crimen organizado es una de las principales amenazas a la seguridad y a la gobernanza democrática a nivel mundial; por su capacidad para corromper, violencia y aprisionar a las instituciones públicas, por lo general en zonas débiles de seguridad. Históricamente, en los países de Latinoamérica tales como: Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela; aquellas áreas que carecen de atención de servicio público, han sido tomados en algunos casos por organizaciones relacionadas con grupos criminales, adquiriendo una legitimidad entre la población (Sánchez, 2014)

Una de muchas ideas es el diseño y construcción de un robot teledirigido el cual permita a los agentes del orden observar reuniones delictivas, desde un punto seguro y les permita actuar directamente en los puntos de mayor daño evitando de esta manera disparos al azar y sobre todo salvaguardar la vida de los agentes.

Según el Observatorio Interamericano de Seguridad, Ecuador se encuentra por debajo de la tasa promedio de homicidios y asesinatos en Latinoamérica (24.4 casos/100 mil habitantes). Los países con mayor incidencia son: Honduras (81,91), El Salvador (65,09), Jamaica (39,52), Colombia (29,99), República Dominicana (23,47) y México (21,69) (Presidencia República del Ecuador, 2013).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar un prototipo robótico móvil teleoperado inalámbricamente para inspección en lugares de alto riesgo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar e Implementar un sistema de transmisión/recepción de datos de forma inalámbrica desde el mando de control hacia el robot para inspección a partir de un lugar seguro.
- Diseñar e implementar un mecanismo interno anti vibración y contra efectos de inercia de acuerdo a un sistema de amortiguación.
- Diseñar e implantar un sistema teleoperado para la manipulación del robot a larga distancia usando tecnología de telecomunicación.
- Desarrollar un sistema de tracción con capacidad de transmitir movimiento en varios tipos de suelos, soportar y amortiguar efectos físicos de reacción de acuerdo al diseño y material empleado.
- Instalar dispositivos dentro del robot móvil obteniendo audio/video en tiempo real sobre el entorno.

1.4 Justificación e importancia

Se da lugar el cumplimiento de los siguientes objetivos Nacionales para el Buen Vivir:

- Objetivo 3, Mejorar la calidad de vida de la población propiciando condiciones adecuadas para el acceso a un hábitat seguro e incluyente
- Objetivo 6, Consolidar la transformación de la justicia y fortalecer la seguridad integral, en estricto respeto a los derechos humanos previniendo y controlando la delincuencia común y organizada
- Objetivo 11, Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica. Esto permitirá generar riqueza y elevar en forma general el nivel de vida de nuestra población.

Ante una amenaza, es necesario contar con un lugar donde se resguarde la integridad física de las personas, minimizando eventuales pérdidas. Este proyecto es una manera de salvaguardar vidas humanas, tomando medidas o precauciones por adelantado ante un peligro.

Reforzar y equipar de mejor manera a las entidades de orden público, con el apoyo de proyectos nacidos dentro de la universidad; ayudando al bienestar de la sociedad con el aporte del conocimiento adquirido en las aulas. Combatiendo el crimen organizado y salvaguardando la vida humana por medio de la tecnología desarrollada

en las Universidades. Disminuyendo la cantidad de muertes y homicidios de personal de seguridad a mano de organizaciones delictivas.

La Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE es reconocida por tener el mayor número de publicaciones al año que promueve el desarrollo de la ciencia y de la tecnología del país, además de realizar proyectos que ayuden al desarrollo y calidad de vida de la sociedad.

La construcción de este prototipo robótico móvil protegerá la integridad física de las personas que brindan servicios de seguridad, recabando información que éste les proporcione en tiempo real y disponiendo la mejor acción acorde a esta.

1.5 Alcance

Se desarrollará un robot móvil teledirigido comandado por un control remoto con transmisión inalámbrica; además de visualizar el entorno con la ayuda de una cámara implantada en el cuerpo del robot y ser captada en el control remoto. El robot debe tener la capacidad de soportar golpes y vibraciones porque en ocasiones será lanzado desde un lugar seguro para llegar a la zona de riesgo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Los robots han sido creados con el propósito de optimizar el trabajo humano, presentando altas prestaciones en términos de exactitud, rapidez, eficiencia, ser seguros, capacidad de ejercer tareas con alta complejidad, entre otros.

Los robots pueden clasificarse de varias maneras, pero para nuestro caso será la clasificación según su arquitectura (Figura 1).

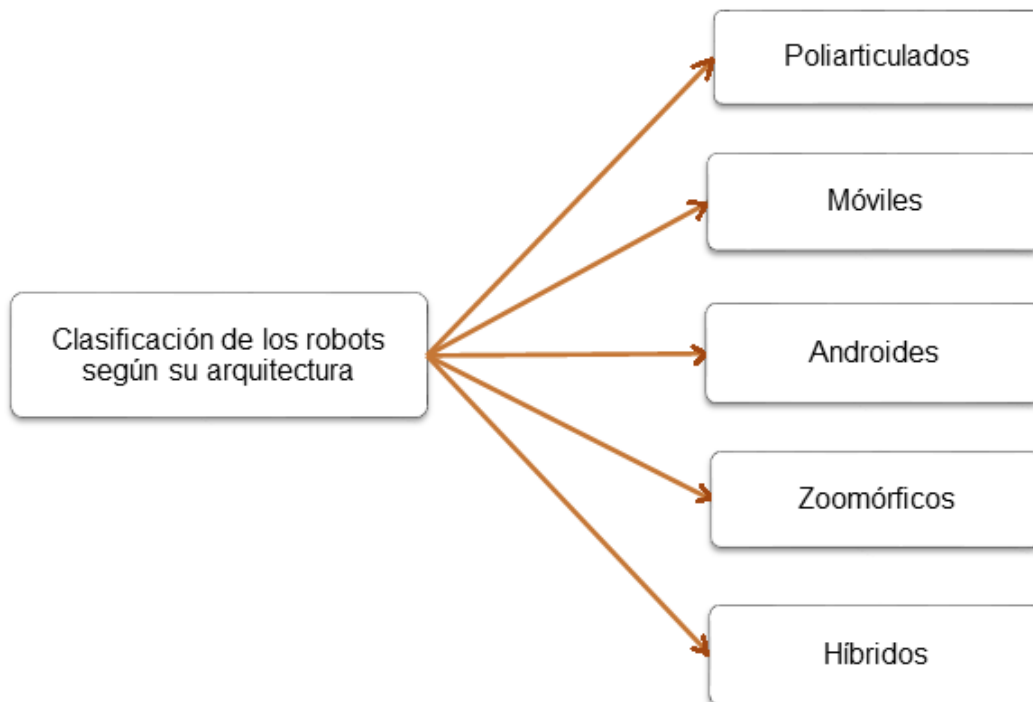


Figura 1. Clasificación de los robots según su arquitectura

Se hará mención de los robots móviles, puesto que es la referencia para el desarrollo de este proyecto. Los robots móviles son robots dotados de un sistema de locomoción para desplazarse por diferentes medios por lo general en tierra. Pueden ser tele operados o guiarse por medio de la información de sus sensores externos.



Figura 2. Robot Rover

Fuente: (NASA, 2008)

Por lo tanto, en la actualidad, los robots móviles han abarcado su aplicación en varios ámbitos. El interés de este proyecto está enfocado al área de seguridad, específicamente en la inspección y reconocimiento del entorno.



Figura 3. Aplicaciones de seguridad en robots móviles

El objetivo de la robótica móvil en inspección y reconocimiento del entorno es brindar una ayuda a las personas para conocer la situación del terreno antes de avanzar o posicionarse en él (Álvaro Arranz, 2006).

Estos robots se empezaron a utilizar al servicio militar, por ejemplo los Estados Unidos durante la guerra de Afganistán utilizaron robots móviles para ser enviados a una determinada zona a comprobar si era seguro, detectando cualquier amenaza o enemigos cercanos (Álvaro Arranz, 2006).

En la actualidad, las aplicaciones se han extendido a más zonas como el servicio público donde las fuerzas del orden utilizan los robots móviles para inspección en zonas de difícil acceso, reconocimiento, localización de víctimas y de delincuentes,

monitorización del entorno con el objetivo de reducir el riesgo personal, aumentando la eficiencia de acción-respuesta y toma de decisiones (Ferrer, 2011)

2.1 Robots móviles

La necesidad de los robots móviles surge por ampliar el campo de aplicación de la robótica para que el dispositivo pueda desplazarse obteniendo mayor alcance. El desarrollo de la tecnología ha permitido que los robots en general tengan autonomía consistiendo principalmente en el sistema de navegación inteligente o automática. Este sistema abarca tareas de planificación, percepción y control.

Un robot móvil se caracteriza por un sistema de locomoción que le permite desplazarse en grandes entornos con diferentes propiedades. Sus aplicaciones son diversas como: exploración, mapeo, reconocimiento de terrenos, búsqueda, etc. Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de medio en el cual se desempeñan, de acuerdo a la dificultad del entorno en el que se desplazan y según su grado de autonomía (Geovanny Argudo, 2013).

El esquema básico de un robot según Silva (citando en Ollero 2001) describe un sistema mecánico, actuadores, sensores y el sistema de control; éste último indispensable para cerrar el enlace actuación-medidas-actuación detallando la interacción del robot con el ambiente.

Para el diseño del sistema de percepción de un robot móvil es necesario considerar los siguientes criterios: precisión, velocidad del robot, el alcance, la posibilidad de interpretación errónea de datos y la estructura de la representación del

entorno (Ollero, 2001). El diseño en general para cualquier tipo de partes se debe tomar en cuenta su robustez ante vibraciones y otros efectos causados por el propio vehículo, el medio en que se desenvuelve, tamaño, consumo y desgaste.

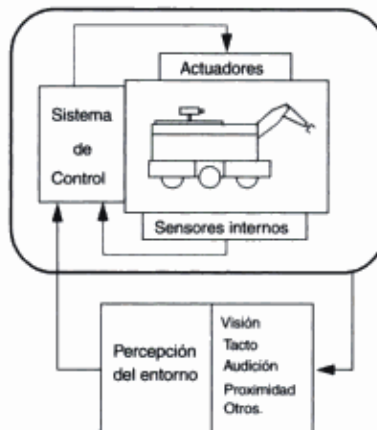


Figura 4. Interacción robot-entorno

FUENTE: (Ollero, 2001)

El Sistema de Control es el cerebro, en el cual, procesa la información suministrada por los sensores internos y externos; posteriormente mandar una señal previamente programada para realizar una tarea.

Los sensores internos se encargan de medir el estado de la estructura mecánica (eslabones, articulaciones y cadena cinemática) como su velocidad, fuerza y desplazamientos.

Los sensores externos dan el sentido de percepción de la realidad haciendo posible que el robot se comporte conforme a las variables del entorno. La percepción no involucra solo la captación de información, sino también en tratarla e interpretarla (Ollero, 2001).

2.2 Clasificación de los robots móviles según su locomoción

2.2.1 Robots Rodantes o con ruedas

Los robots rodantes cuentan con un sistema de locomoción con ruedas, son los más utilizados por su simpleza. Eficientes en terrenos considerablemente regulares, estables y libres de obstáculos. Sus limitantes son el deslizamiento que puede ser causado por un terreno blando carente de fricción para la tracción o en la propia impulsión. Este tipo de robots son propicios a obtener grandes velocidades.



Figura 5. Ejemplo de robot móvil con ruedas
FUENTE: (Hernández, 2007)

2.2.2 Robots caminantes

Se desplazan por medio de sus extremidades, conformadas por un conjunto de mecanismos que además son puntos de anclaje con el terreno. Se desplazan eficientemente en terrenos irregulares. Son más complejos por el diseño del mecanismo y el sistema de control de estabilidad. Entre menos extremidades, aumenta la complejidad del sistema de control del equilibrio.

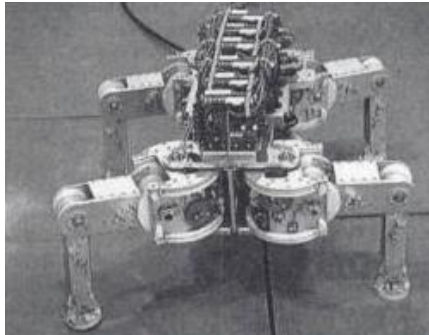


Figura 6. Robot cuadrúpedo desarrollado
FUENTE: (Ollero, 2001)

2.2.3 Robots rulantes

Son de tipo oruga o de cadenas, equipados con pistas de deslizamientos para el desplazamiento. Tiene buena adaptabilidad sobre cualquier terreno.



Figura 7. Ejemplo de robot rulante
FUENTE: (Robotikka, 2012)

2.2.4 Otros

Tienen diferentes mecanismos para su desplazamiento. Usualmente para que el robot se adapte a terrenos muy complicados o para ofrecerles un movimiento especial.



Figura 8. Robot articulado MAKRO
FUENTE: (Ollero, 2001)

2.3 Arquitectura de un robot móvil

Todas aquellas descripciones que caracterizan la estructura de un sistema en función de todos los elementos y las interacciones existentes entre ellos (Bermeo, 2003). Las arquitecturas sirven para representar y detallar el comportamiento global del sistema. La Figura 9 muestra la arquitectura de un robot móvil.

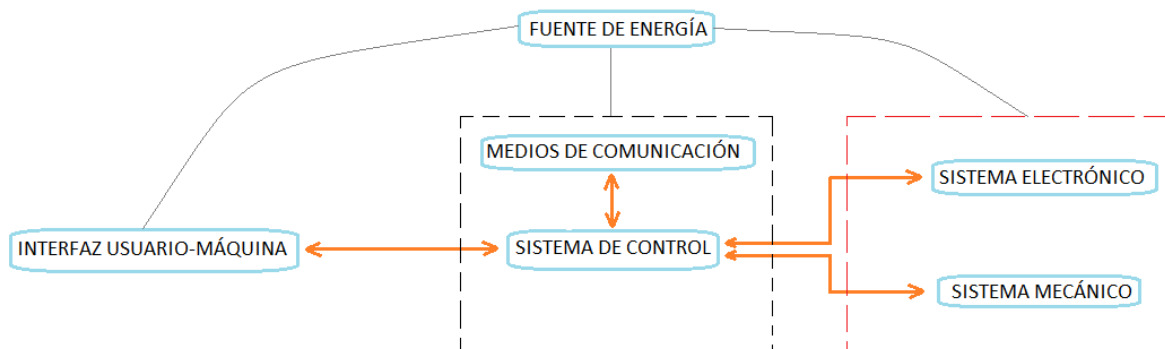


Figura 9. Arquitectura de robot móvil.

2.4 Métodos de navegación

La Navegación es una metodología aplicada a los robots móviles con el fin de permitirles una guía segura en la trayectoria dentro de su entorno de trabajo (Martinez, 1995). La navegación surgió con la solución de este problema “Dado un punto de partida A alcanzar el (los) punto(s) de destino B (B_1, B_2, \dots)” (Ortíz, 2008).

El problema principal de la navegación es el reconocimiento del ambiente (sea lugares cerrados o exteriores) y tener capacidad en detectar obstáculos estáticos o dinámicos. Otro objetivo importante de la navegación es ofrecer autonomía al robot. El nivel de incertidumbre es alto en comparación con robots manipuladores o fijos. A la vez, la navegación implica resolver subproblemas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Subproblemas de navegación

Percepción		interpretar los datos que le suministra sus sensores para extraer información útil
Localización	... el robot debe ser	determinar su posición en el entorno
Planificación	capaz de ...	decidir cómo actuar para alcanzar el objetivo
Control de movimiento		gestionar sus actuadores para conseguir la trayectoria deseada

FUENTE: (Ortíz, 2008)

De acuerdo a la solución de los subproblemas se pueden especificar los tipos de navegación:

2.4.1. Teleoperación

Los problemas de percepción, planificación y control de movimiento se los soluciona por la asistencia de la inteligencia humana. La Teleoperación es controlar al robot a distancia por un humano desde una estación remota. En sistemas evolucionados proporcionan al operador sistemas sensoriales de captación de imágenes, con la ventaja de que el humano no se inmiscuya dentro del entorno. La telerrobótica fue un término surgido por la implantación de la teleoperación en la robótica. La teleoperación es muy utilizada donde se presenten situaciones con gran diversidad de variables generando altos costos computacionales o de sistemas de control porque aún son limitados; y también para exploración de sitios de acceso difícil o que sean peligrosos para el humano (Ollero, 2001).

La velocidad de transmisión es un parámetro importante y determina la reacción del sistema de control. Las limitaciones humanas son la precisión y la reacción al actuar ante una situación. La adaptabilidad entre hombre y robot es una limitación temporal que lleva tiempo para que el operador, por medio de la práctica, pueda adaptarse y mejorar la coordinación.

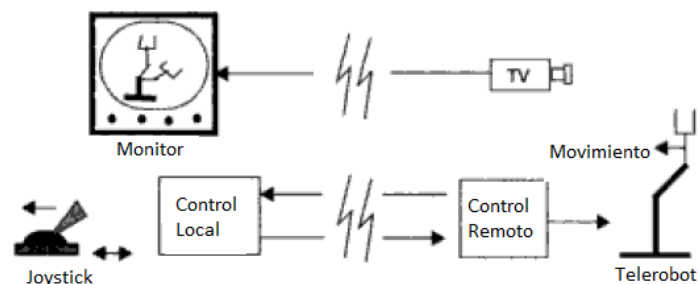


Figura 10. Sistema teleoperado de un robot

Fuente: (Ollero, 2001)

2.4.2. Navegación por medio de sensores

Estos tipos de robots tienen un sistema sensorial determinado por sensores los cuales ofrecen información del entorno, el estado interno de posicionamiento y la localización en el medio para poder crear un modelo de el mismo. Los sensores más populares en robótica son sensores de visión, el sonar y el láser. Muy utilizado en robots autómatas. En robótica móvil a los sensores se clasifican como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Tipos de sensores en robótica móvil

Tipo de sensor	Característica	Ejemplos
Sensores Exteroceptivos	Miden señales del estado del entorno o exterior del robot.	Sensores ultrasónicos Sensores láser Infrarrojos
Sensores propioceptivos	Miden señales originadas internamente en el robot	Encoder Giroscopio Tacogeneratriz

Fuente: (Carlos restrepo, 2005)

2.4.3. Navegación por mapeo

El mapeo es una técnica de exploración para modelar y construir un mapa del entorno a base de la información obtenida. La precisión y la velocidad son los dos criterios principales para la generación de mapas. Las tareas básicas para la generación de mapas son explorar el medio ambiente y enumerar todos los obstáculos encontrados. (Bräunl, 2006).

Hay varias características de robots móviles dedicados para resolver cada sub problema de navegación. Por ejemplo el SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), un robot que tiene la habilidad de construir un mapa de su entorno, reconociendo las características de ello con el fin de poder ubicarse en el espacio. La Figura 11. Muestra las tareas de mapeo, localización y planificación de rutas. El SLAM está dedicado a construir mapas, al mismo tiempo de localizarse dentro de ese mapa.



Figura 11. Diferentes tareas que un robot debe de resolver
FUENTE: (Stachniss, 2009)

2.5 Componentes de sistemas teleoperados

En ciertas ocasiones se deben realizar trabajos en entornos hostiles o insalubres para el ser humano como es el caso de zonas nucleares, lugares de escaso oxígeno, desactivación de bombas, etc. En estas circunstancias el hombre ha creado máquinas, para que hagan el trabajo en lugar del hombre protegiendo su integridad física. Por lo

tanto, los robots móviles han sido un medio de moderación ante factores de riesgo contra confrontaciones delincuenciales; aumentando las posibilidades de integración personal de los agentes del orden durante el operativo.

Los sistemas teleoperados en robótica móvil están compuestos por dos estaciones: El maestro, es el sector de operaciones controlado por el hombre en conjunto con un dispositivo de mando; y el esclavo que corresponde al robot a teleoperar. Un esquema simplificado se muestra en la Figura 12.

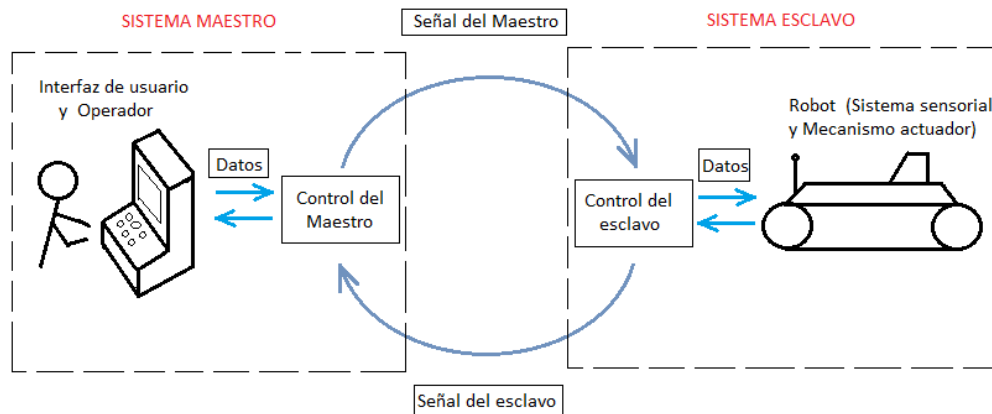


Figura 12. Esquema de maestro-esclavo

2.6 Métodos de control en sistemas teleoperados

2.6.1. Control bilateral

El control es retroalimentado por parte del operador. Las señales retroalimentadas son por medio de un dispositivo, en la cual el operador percibe las magnitudes físicas captadas por el robot. Esta aplicación se la realiza en circunstancias donde los actuadores requieran un control por parte de las sensaciones humanas.

En el control unilateral no existe realimentación de los actuadores hacia el maestro. Un ejemplo es un dispositivo háptico, una representación física parcial o completa del robot, manipulado por el operador.

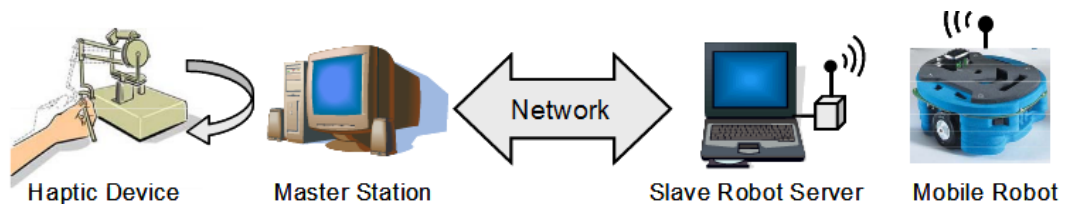


Figura 13. Esquema de control unilateral de un dispositivo háptico

FUENTE: (Nikos C. Mitsou)

Ejemplo de robots que funcionan con control bilateral es TELESAR V, Robot teledirigido, desarrollado por la Universidad KEIO, capaz de reproducir los movimientos del operador, además de ofrecer un alto grado de sensibilidad del entorno como audio, visión de realidad virtual y texturas. El usuario podrá detectar la temperatura, textura y la fuerza del agarre de este robot por medio de sus extremidades.



Figura 14. Ejemplo de control bilateral

FUENTE: (Charith Lasantha Fernando, 2012)

2.6.1. Control Supervisado y coordinado

Como su nombre lo indica, el control supervisado consiste en el que el operador supervisa el proceso o tarea, mientras tanto el esclavo se desenvuelve de manera autónoma. Este tipo de control engloba métodos de simulación, planificación y toma de decisiones a base de sistemas informáticos para ayudar a simplificar el manejo del operador. Según Ollero (2001) las funciones de supervisión se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3
Funciones de Supervisión

Funciones de supervisión	
Función	Característica
Funciones fuera de línea	Sistema de interacción del Teleoperador con realimentación de esfuerzo y visual en tiempo real. Se requiere grandes costos computacionales.
Funciones de simulación en línea	Destinado para prever maniobras y asignación de control autónomo o manual.
Funciones de simulación en línea para compensación de retardos temporales	El operador prevé los retardos para poder compensarlos en forma oportuna.
Funciones de medida, estimación y visualización de estado	Se muestra una visualización más comprensible del estado de operación.
Funciones de procesamiento de órdenes del operador	Es la unión entre las entradas de tipo análogas simbólicas de acorde a lenguajes específicos.
Funciones de ajuste del sistema de control	Son funciones como ajuste de ganancia y otros parámetros del sistema de control automatizado. También incluye ajustes del sistema sensorial de orientación.
Ayudas para detección de fallos, identificación y respuesta de emergencia	Implica detección e identificación de fallos, funciones de prevención, respuestas ante fallas, y recomendaciones para restauraciones en condiciones normales del dota.
Monitorización de rendimiento	Medidas de interés para el sistema de aprendizaje monitorizado como por ejemplo medidas de velocidad, precisión, rendimiento, etc.

En el control coordinado, el operador controla directamente los actuadores por lo tanto no existe autonomía. Los lazos de control cerrado son activados cuando existen altos grados de retardo de la señal y el operador no puede controlar al esclavo.

2.8 Telerobótica

La Telerobótica es la comunicación a distancia hacia el robot desde una estación remota controlado por la destreza humana, especialmente en entornos de percepción y planificación automáticas muy complejas. El operador es quien cierra el bucle de control del sistema teleoperado. Los componentes del sistema de teleoperación constan de los siguientes elementos:

Operador o Teleoperador

El ser humano es el componente de control encargado de monitorizar y planificar; su reacción es crítica en toma de decisiones. El control puede ser continuo o una intervención intermitente.



Figura 15. Estación de operación con el operador
Fuente: (Wood, 2001)

Dispositivo teleoperado

Refiriéndose en telerrobótica, el dispositivo es el robot y miembros extras incluidos en el, los cuales son controlados por el operador.



Figura 16. (Remotec Andros Wolverine)
Fuente: (Wood, 2001)

Interfaz

Conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador con el sistema de teleoperación. Es el área que permite al operador enviar y recibir información de todo el sistema.

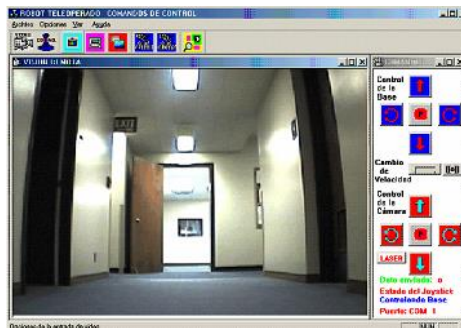


Figura 17. Interfaz de usuario realizado en un software
Fuente: (Correa, 2005)

Control y canales de comunicación

Conjuntos de elementos que envían, transmiten, modulan y tratan la información para ser procesada.



Figura 18. Tecnologías de medios de comunicación

Fuente: (Tovar, 2015)

Sensores

Conjunto de dispositivos electrónicos que toman señales físicas y las transforman en señales eléctricas.



Figura 19. Sensores

Fuente: (ceiisa, 2015)

2.9 Comunicación inalámbrica






El desarrollo de nuevas tecnologías, ha permitido ampliar las aplicaciones para resolver diferentes tareas en la robótica. La comunicación inalámbrica es útil para las siguientes características:

- Para controlar a distancia a los robots; dar comandos de control de bajo y alto nivel.
- Comunicación entre robots. Por ejemplo, usado en robótica cooperativa.
- Para controlar los datos de los sensores del robot. Por ejemplo, mostrar información hacia la estación remota como una cámara.
- Crear una consola de monitoreo para un solo o varios robots. Por ejemplo, monitorear el estado y localización de cada robot y mostrarlo en un panel multi-robot (Bräunl, 2006).
- Para ejecutar un robot con procesamiento fuera de línea. Por ejemplo, los datos enviados de los sensores llegan al host donde realiza todo el cómputo y luego envía los comandos de conducción hacia el robot.

Una red inalámbrica es una red totalmente conectada, los envíos de datos se transmiten directamente, sin terceros; en el cual, cada nodo se conecta a otro nodo en un salto (Bräunl, 2006).

Una consola multi-robot permite monitorear el estado del robot, las mediciones de los sensores sea estados internos y estados de navegación.

Tabla 4
Tecnologías de redes inalámbricas

Redes inalámbricas		
Tipo	Características	Imagen
Infrarrojo	<ul style="list-style-type: none"> • La comunicación es a base de ondas de espectro infrarrojo. • Corta distancia para que los emisores y receptores tengan detección y no debe existir obstáculos. • Velocidades que oscilan entre los 9.600 bps y los 4 Mbps. 	
WIFI	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia media. • Acceder a cualquier información siempre y cuando existan redes WLAN. • Conexión con varios dispositivos a la vez. • Usa ondas de radio con un alcance de 150 metros. • WIFI es una de las tecnologías más usadas y extensas. • Usado mayormente, para establecer conexión a internet. 	
Bluetooth	<ul style="list-style-type: none"> • Conecta a varios tipos dispositivos de diferentes y de mismas características. • Red de área personal (PAN) con alcance de 10 a 15 metros. • Menor consumo de energía • Actualmente, es la tecnología más usada por varios dispositivos • Conexión rápida y sencilla 	
ZigBee	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza el estándar IEEE 802.15.4. • Entorno de transmisión oscila entre 10 y 75 metros. • Para baja tasa de transmisión de datos y consumo de energía (estado dormido cuando no es utilizado). • Variedad de topología de red • Comunicación segura. • Sencillez de integración 	
3G	<ul style="list-style-type: none"> • Usado para la red de telefonía móvil • Transmisión de gran variedad de tipos de datos (voz, mensajes, video llamada, etc.). • Operando velocidades entre 3.6 Mbps a 7.2 Mbps 	

2.10 Tecnologías existentes del prototipo a desarrollar

En la actualidad existen varios prototipos de robots móviles teleoperados que cumplen diferentes funciones, de los cuales algunos se enfocan en inspección de lugares hostiles como los siguientes:

Robot móvil teleoperado poliarticulado

Empleado para actividades de inspección (figura 20) y ayuda en tareas de vigilancia. Este robot se compone de 4 patas constituidos por 12 barras para movilizarse en terrenos regulares. Contiene una cámara montada sobre el robot transmitiendo señal de video hacia la estación de control. Desde la estación, el usuario puede ver el entorno en tiempo real y guardar la información.

Tabla 5

Características del prototipo robot móvil poliarticulado

Descripción	Especificación
Altura	75 cm
Ancho	39 cm
Peso	14.5 kg
Velocidad de traslación	12 m/min
Velocidad de rotación	15 RPM
Batería	12 V y 7 A
Tiempo de operación	1.52 h
Frecuencia de operación	2.4 Ghz
Distancia máx. de operación	100 m
Número de canales	4
Definición de la Cámara	720 x 480 pixeles



Figura 20. Prototipo robot móvil poliarticulado

Fuente: (González, 2012)

Robot TMR-1

Robot móvil teleoperado destinado para la atención de situaciones de alto riesgo (Figura 21) en ambientes hostiles con ruedas de tracción. Controlado a distancia segura, tiene incorporado una cámara y dos brazos manipuladores con pinzas de agarre. Tiene un sistema de ruedas con tracción diferencial. Este Robot podría realizar tareas como transportar, manipular, empujar y arrastrar objetos, también de realizar reconocimiento de terrenos y desactivación de artefactos explosivos. Este robot móvil tiene las siguientes características:

Tabla 6**Características del robot TMR-1**

Característica	Descripción
Configuración de brazos	2 brazos manipuladores intercambiables
Tipo de partes	Modulares y desarmables
Peso	70 kg
Carga adicional	100 kg
Velocidad de recorrido	2 km/h
Grados de libertad de la cámara	300° horizontal y 90° vertical
Sistema de tracción	Sistema de oruga intercambiable con el sistema de ruedas.
Suministro de energía	Batería de 12v y 17.5 Ah y otra de 12v y 1.3 Ah.
Sistema de cámaras	Una delante del chasis para navegación, atrás para evitar choques, dos cámaras montadas en cada uno de los brazos manipuladores y una cámara móvil que da visión alrededor del robot. Cada cámara brinda imágenes a color y la posibilidad de cambiar a visión nocturna.
Iluminación	2 luces en la torre de cámaras.
Alcance máximo	500 metros en ambientes abiertos y 200 metros en ambientes con obstáculos.
Autonomía	1 hora consecutiva de trabajo.

**Figura 21.** Robot TMR-1

Fuente: (Melvin Andrés González Pino, 2009)

Prototipo robot móvil teleoperado para asistencia al cuerpo de bomberos

Realizando exploración de incendios (figura 22), recopilar información del lugar afectado y detectar víctimas. Capaz de funcionar en ambientes hostiles y ser resistentes al

maltratado de este; este robot es un prototipo realizado para el manejo del cuerpo de bomberos de la localidad soportando temperaturas hasta los 500 °C.

Tabla 7

Especificaciones del robot móvil para asistencia al cuerpo de bomberos

Especificación	Valor
Largo	100 cm
Ancho	70 cm
Alto	30 cm
Peso	40 kg
Carga adicional	20 kg
Velocidad	8 km/h
Distancia de operación máx. en exteriores	400 m
Distancia de operación máx. en interiores	200 m
Cuadros por segundo	30 fps
Temperatura ambiente máx. resistible	500 °C
Temperatura máx. interna admisible	40 °C
Caída mínima resistible	3 m
Tiempo de funcionamiento	1 hora



Figura 22. Robot para asistencia al cuerpo de bomberos

Fuente: (Geovanny Argudo, 2013)

Modelo Throwbot XT

Desarrollado por la compañía ReconRobotics, líder mundial en sistemas tácticos con micro-robots. Un robot versátil teleoperado con transmisión de video/audio con el

propósito de localizar sujetos armados y escuchar conversaciones. Diseñado para ser lanzado hasta 36 metros, desplazarse por lugares angostos y monitorizar lugares muy peligrosos durante operaciones militares, intervenciones policiales y supervisar con operarios bomberos; confirmando la presencia del estado del ambiente y los integrantes dentro de este. Hoy en día, militares de EE.UU ocupan esta clase de micro robots para sus operaciones de seguridad. Este dispositivo es una referencia para el proyecto a desarrollar puesto que cumple con la mayoría de las características y objetivos en el campo a desarrollarse.

Tabla 8
Características del robot Throwbot XT

Características	Descripción
Resistencia al agua	hasta 30 cm de profundidad en 5 minutos
Rango de transmisión	Interior 30 m y exterior 90 m
Autonomía	Robot-60minutos y control-120minutos
Resistencia a golpes	Hasta 9 metros
Medidas	longitud 20.9cm y anchura 19.3 cm
Peso	1.2 libras
Sonido	Monofónico
Cámara de video	blanco y negro, iluminación infrarroja
Velocidad	0.46 m/s



Figura 23. Robot Throwbot XT
FUENTE: (ReconRobotics, 2012)

El diseño de las ruedas (Figura 24) tiene el propósito de absorber las fuerzas de impacto cuando el robot es lanzado y choca contra una pared o el piso.



Figura 24. Ruedas del robot Throwbot XT
Fuente: (Reconrobotics, Reconrobotics, 2013)

Su tamaño compacto y portátil, otorga facilidades para llevar e implementar por los agentes del orden para extraerlos y dejarlos activos en menor tiempo posible. Los agentes del orden pueden lanzar el robot Throwbot XT sobre una pared, ventana u otro acceso del sitio a inspeccionar (Figura 25), brindando visualización del entorno, presencia y ubicación de rehenes y delincuentes.



Figura 25. Throwbot XT lanzado hacia el interior de una casa
Fuente: (Reconrobotics, Reconrobotics, 2015)

Con la información captada por el robot hacia el agente del orden (Figura 26), servirá de apoyo para aumentar las posibilidades de éxitos de una intervención de estas organizaciones que se exponen a situaciones de alto riesgo delincriminal.



Figura 26. Aplicaciones del Throwbot XT

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El proceso de diseño del robot móvil teleoperado será realizado por la metodología llamada Función de Desarrollo de Calidad (QFD), también conocida como casa de la calidad. QFD identifica las necesidades del cliente, los cuales serán satisfechos por características técnicas del producto. Se buscará diversas alternativas para cada especificación de los módulos y por medio de método ordinal corregido de criterios ponderados se escogerá la solución más acertada.

3.1 Necesidades o requerimientos

Las necesidades son los atributos que el cliente y/o diseñador desea y quiere del producto a desarrollar. Los requerimientos permitirán establecer el conjunto de especificaciones del producto. Para este proyecto se realizó la tabla 9 mostrando las necesidades.

Tabla 9

Necesidades para la matriz QFD

Concepto	N°	Necesidad
Función	1	Teleoperado
	2	Visión y audio en tiempo real
	3	Mediana autonomía
	4	Comandado inalámbricamente
Manufactura	5	Desplazarse en terrenos regulares
	6	Resistente a fuerzas dinámicas

CONTINÚA 

	7	Ser compacto
	8	Sistema atenuadora de energía
Control	9	Fácil de operar
	10	Control remoto
	11	Sistema de rotación
	12	Velocidad regulable
Costos	13	Bajo costo

3.2 Definición de especificaciones

Se establecerá un conjunto de especificaciones que son las características técnicas satisfaciendo las necesidades y otorgando posibles soluciones alternativas. Para ello se establece una tabla de necesidades y especificaciones QFD (ver Tabla 10) que relaciona que especificaciones van a satisfacer a las necesidades propuestas anteriormente.

Tabla 10*Matriz de necesidades y especificaciones QFD*

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Sistema de potencia										
	Motores con potencia adecuada										
	Tipo de materiales										
	Sistema amortiguadora de energía										
	Sistema de Transmisión recepción										
	Controlabilidad										
	Consumo energético										
	Distancia mínima operable										
	Sistema de locomoción										
	Sistema de percepción en tiempo real										
1	Teleoperado	x	x			x	x	x			x
2	Sistema de exploración					x			x		x
3	Mediana autonomía					x		x		x	
4	Comandado inalámbricamente					x			x		x
5	Desplazarse en terrenos regulares		x	x							x
6	Resistente a fuerzas dinámicas			x	x						x
7	Ser compacto		x	x				x	x		x
8	Soportar caídas			x	x						x
9	Fácil de operar		x			x	x		x		x
10	Control remoto	x				x	x		x		
11	Sistema de rotación		x	x							
12	Velocidad regulable		x				x				
13	Bajo costo			x				x		x	x

3.3 Generación del concepto

EL diseño del concepto surge a partir de las especificaciones del producto que servirá para la generación de soluciones alternativas que posteriormente serán evaluadas y probadas. Para la generación de conceptos se usará la herramienta de la estructura funcional.

La estructura funcional es una representación de las funciones que debe cumplir el producto, facilitando la búsqueda de soluciones y creando una estructura modular. Cada módulo es una característica principal del producto que tendrá una o varias funciones como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Módulos para el prototipo robótico móvil

N°	Módulo	Funciones
1	Sistema de locomoción	Medio de desplazamiento
2	Estructura mecánica	Materiales para el armazón y para soportar caídas (diseño CAD)
3	Control	Controlabilidad Tipo de control al movimiento de los actuadores
4	Teleoperación	Transmisión en tiempo real en audio y video
5	Potencia	Sistema de acople del Sistema de control con suministro de mayor energía
6	Energía	Elementos de suministro de energía a todos los dispositivos y circuitos electrónicos
7	Accionamientos	Actuadores para la movilidad del robot

3.4 Alternativas para el diseño

En este punto se detallará la solución en forma simplificada para cada módulo con respecto a sus respectivas funciones mostrada en la Tabla 11.

3.4.1. Módulo 1. Sistema de locomoción

En el capítulo II se explicó la clasificación de los robots móviles según su sistema de locomoción, a base de ello se establecerá la descripción de sus ventajas y

desventajas en forma simplificada para su mejor análisis mostrada en las tablas 12,13 y 14.

Tabla 12

Sistema de locomoción por ruedas

Sistema de locomoción por ruedas	
Ventajas	Desventajas
Implementación simple	Patinan en terrenos blandos
Eficientes en terrenos regulares	Dificultad de desplazamiento en terrenos irregulares
Son veloces	Necesita implementos para su control
Bajo costo	
Fácil mantenimiento	
Fácil de controlar	

Tabla 13

Sistema de locomoción por bandas o cadenas

Sistema de locomoción por bandas o cadenas	
Ventajas	Desventajas
Mejor adaptabilidad del terreno que las ruedas.	Necesita graduar la holgura de la banda para que no ajuste o no pueda soltarse
Costo medio por el tren de rodaje	Baja velocidad.
Efectiva tracción.	Dificultad media de implementación.
Fácil de controlar	Más costoso que los rodantes
	Consume mucha potencia al cambiar de posición

Tabla 14

Sistema de locomoción por patas

Sistema de locomoción por patas	
Ventajas	Desventajas
Capacidad de moverse en terrenos irregulares	Más complejos
Pueden subir escalones	Más costosos
	Mayor consumo energético
	Menor velocidad de desplazamiento
	Requieren de mayor control para la estabilidad

3.4.2. Módulo 2. Estructura mecánica

Este módulo comprende materiales e implementos del armazón y del sistema que absorberán la energía de impacto.

Materiales del armazón

Los materiales deben ser resistentes y soportar los impactos, además de albergar los implementos o dispositivos electrónicos montados en el armazón. En la tabla 15 se muestran algunos materiales considerados.

Tabla 15

Materiales considerados para la construcción del armazón

Material	Ventajas	Desventajas
Acero	<ul style="list-style-type: none">• Alta resistencia en poco volumen• Capacidad de absorber energía antes de alcanzar la rotura en un impacto.• Variedad de aleaciones para diferentes aplicaciones.• Capaz de deformarse.• Fácil adquisición• Es corrosivo al medio ambiente	<ul style="list-style-type: none">• Alta densidad• Costo elevado para aleaciones especiales como el acero inoxidable• Deformaciones no reversibles
Aluminio	<ul style="list-style-type: none">• Muy ligero que otros metales• Reciclable• Mediana resistencia mecánica• Fácil en trabajos de forja• Muy poca corrosión al ambiente• Fácil adquisición• Bajo costo	<ul style="list-style-type: none">• Susceptible a rayones• Corrosiones galvánicas en contacto con otros metales• Deformaciones no reversibles
Acrílico	<ul style="list-style-type: none">• No es corrosivo a la intemperie• Duro• Resistencia química• Menos denso• Fácil para manejar con corte laser	<ul style="list-style-type: none">• Frágil• Baja resistencia a la abrasión
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	<ul style="list-style-type: none">• Se usa en máquinas que facilitan la creación de piezas de alta complejidad geométrica.• Baja densidad• Resistente a la corrosión	<ul style="list-style-type: none">• Fácil desgaste a la abrasión• Alto costo• Soporta bajo rango de temperaturas -20 a 80 °C

Aislamiento de vibraciones

Estos dispositivos permiten reducir los efectos asociados de la vibración por transmisibilidad. Existen dos sistemas de aislamiento de vibraciones: activos y pasivos.

Tabla 16

Clasificación de sistema de aislamiento

Sistema de aislamiento	Ventajas	Desventajas
Activo	<ul style="list-style-type: none">• Control exacto• Mayor efectividad	<ul style="list-style-type: none">• Costoso• Requiere de varios elementos• Complejo al implementarlo
Pasivo	<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo• Fácil de implementar• No requiere energía adicional	<ul style="list-style-type: none">• Corto rango de frecuencias de trabajo

Material con alta deformidad y desplazamiento

Existen gran variedad de polímeros que se obtienen en procesos biológicos naturales o sintéticamente por reacciones químicas. Los resultados de hoy en día, se tiene varias clases de polímeros con diversidad de características físicas para un amplio campo de utilización. Por lo tanto, solo se hará mención de aquellos que tienen la propiedad de deformarse extensamente y regresar a su estado original.

Tabla 17

Ventajas y desventajas de polímeros

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Gran variedad de polímeros• Costo moderado• Fácil maleabilidad• Resistencia a la corrosión ambiental• Fácil de maquinar• Baja densidad	<ul style="list-style-type: none">• Algunos son costosos cuando presentan mejores condiciones moleculares• Baja resistencia a la abrasión• Baja resistencia a altas temperaturas.• La mayoría son inflamables

3.4.3 Módulo 3. Accionamientos

Son los actuadores con el objetivo es proporcionar desplazamiento al robot móvil y además permitir el despliegue de sus partes. Se mencionará solo motores DC ya que han sido de gran utilización en la robótica móvil.

Motor paso a paso

El motor paso a paso es un componente electromecánico que gira gracias a entradas de pulsos digitales.

Tabla 18

Ventajas y desventajas de Motor paso a paso

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Muy precisos y exactos en giro• Alta resolución• Excelente respuesta• Variedad de control• Se puede conocer su posición sin necesidad de sensores• Capáz de mantenerse en una posición	<ul style="list-style-type: none">• Tiene varias entradas para su control• Sufre calentamiento en el bobinado del motor• Complicado implementación• No es veloz

Motor DC con caja reductora

También llamado como motoreductor que es un motor DC acoplado una caja reductora para reducir la velocidad y aumentar el torque.

Tabla 19*Ventajas y desventajas de motoreductor*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Fácil control• Se puede llevar a tener varias velocidades• Gran rango de voltaje para su operatividad• Fácil implementación	<ul style="list-style-type: none">• No exactos ni precisos• Necesidad de sensores para conocer su posición• Difícil mantener en una posición.

Servo motor

Es un motor capaz de posicionarse a un ángulo dentro de su intervalo de operación. Está compuesto por: un motor DC, caja reductora y circuito de control del ángulo.

Tabla 20*Ventaja y desventaja de servo motor*

Ventaja	Desventaja
<ul style="list-style-type: none">• Fácil control• Fácil implementación• Variedad de tamaño• No requiere de sensores para establecer una posición• Capacidad de mantener una posición	<ul style="list-style-type: none">• No puede girar totalmente• Es preciso• Medio costoso• En algunos modelos es difícil de conseguir

3.4.4. Módulo 4. Potencia

El módulo de potencia es un conjunto de dispositivos electrónicos con el fin de proporcionar el abastecimiento energético a los actuadores del robot móvil. Se utilizará motores DC por lo tanto se buscará soluciones para el control de giro de estos.

Puente H con elementos electrónicos

Un puente H conformado por un grupo de elementos discretos como transistores, resistencias, diodos, etc. Los transistores son quienes harán el proceso de conmutación y por medio de un microcontrolador activara a cada transistor como se muestra en la figura

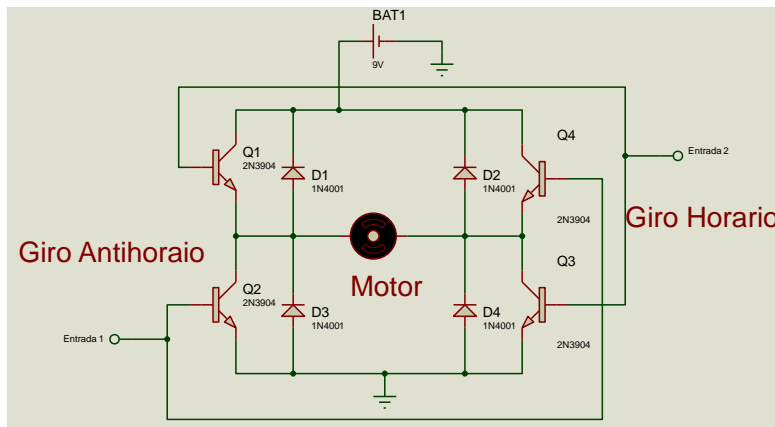


Figura 27. Puente H con transistores

Tabla 21

Ventajas y desventajas de Puente H con transistores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Se puede diseñar para cualquier potencia ya sea alta• Robusto• Costo moderado	<ul style="list-style-type: none">• Requiere una placa para cada motor• No es compacto• Difícil implementación• No apto para alta velocidad de conmutación

Puente H en circuito integrado

Es un puente H contenido en un circuito integrado con todos los componentes discretos.

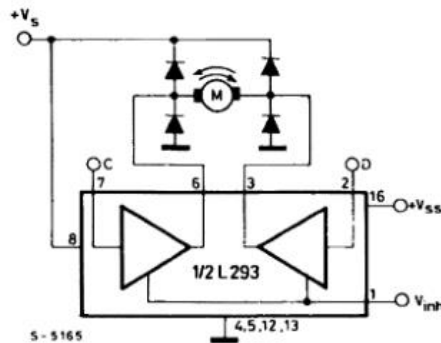


Figura 28. Puente H con integrado L293B
Fuente: (SGS-Thomson, 1994)

Tabla 22

Ventajas y desventajas de puente H en C.I

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Muy compacto• Un integrado puede controlar varios motores• Fácil implementación• Óptimo para altas velocidades de conmutaciones	<ul style="list-style-type: none">• Baja potencia• No posee un medio óptimo para disipar el calor

Driver de potencia

Son módulos con todos los componentes discretos montados en una tarjeta electrónica por lo cual contiene borneras para su conexión directo y rápido uso.

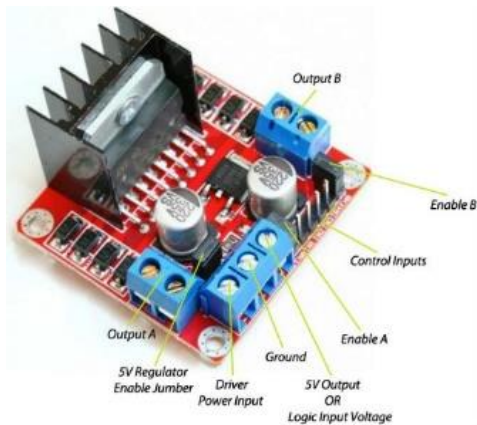


Figura 29. Módulo L298

Fuente: (electrontools, 2000)

Tabla 23

Ventajas y desventajas de driver de potencia

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Control para motores de altas corrientes • Bajo tiempo de retrasos (nano segundos) • Pueden tener protección ante descargas • Fácil implementación 	<ul style="list-style-type: none"> • Costosos • Se requiere de otros implementos para cumplir su función • Dificil adquisición

Optoacopladores

Un optoacoplador es un circuito integrado compuesto por un diodo led y un fototransistor. El funcionamiento consiste en que el diodo led emitirá luz por media una señal eléctrica y a su vez aquella luz es receptada por el fototransistor, actuando como saturación dejará pasar corriente eléctrica en el fototransistor.

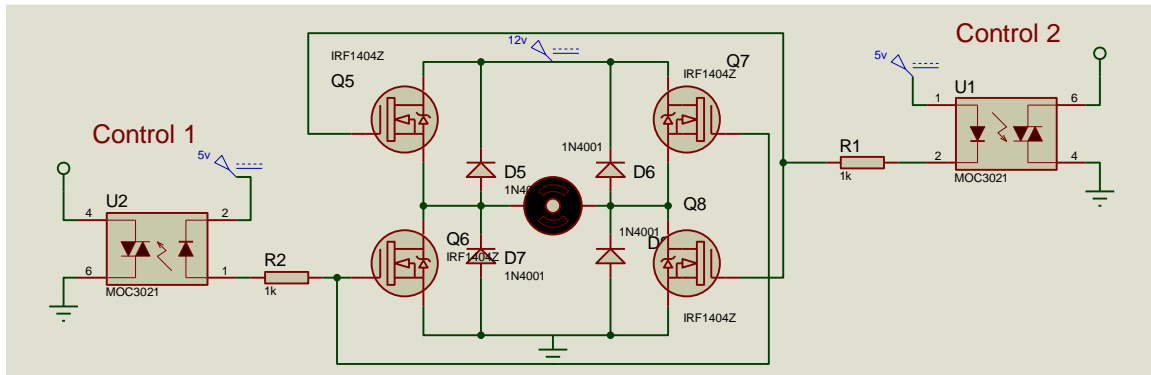


Figura 30. Puente H con optoacopladores
Fuente: (Diagram, 2013)

Tabla 24

Ventajas y desventajas de optoacopladores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Divide los circuitos • Para altas potencias • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo moderado del propio dispositivo • Requiere dos optoacopladores para cada motor

3.4.5. Módulo 5. Teleoperación

El módulo Teleoperación comprenderán las tecnologías del sistema de transmisión de audio y video en tiempo real desde el robot hacia el control local. Y también este módulo comprenderá el control del mando desde la estación local hacia el robot y controlar sus actuadores. La teleoperación será comandada inalámbricamente por lo que se mencionará tecnologías de transmisión que no utilicen cables. En forma general, se ha mencionado algunos dispositivos de tecnología inalámbrica en el apartado 2.9 que pueden servir como solución para este módulo.

Bluetooth

Tabla 25

Ventajas y desventajas del Bluetooth

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Compatible con muchos dispositivos en el mercado• Fácil de implementarlo• Velocidad de transmisión de datos es mediana• Bajo costo• Compacto	<ul style="list-style-type: none">• Corto alcance hasta 30 metros• Sensible a interferencias• Velocidad de transmisión de datos es baja, aunque actualmente existen versiones un poco más rápidas.

WIFI

Tabla 26

Ventajas y desventajas de WIFI

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Diversidad de compatibilidad• Bandas de frecuencias altas 2.4 y 5 GHZ• Banda ancha extensa para transmisión de datos pesados• Alcance moderado	<ul style="list-style-type: none">• Requiere dispositivos de tamaño amplio• Costoso• Complicada implementación

Sistema FPV

El sistema First Person View (FPV), traducida como vista en primera persona es una tendencia de radio frecuencia para la visualización de video usado en cuadricópteros, drones o cualquier dispositivo móvil y teniendo la perspectiva visual de ellos.

Tabla 27*Ventajas y desventajas del sistema FPV*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Altas frecuencias desde 1Ghz a 5 Ghz • Banda de ancha extensa para transmitir muchos datos como video y audio • Entre semi compacto y muy compacto • Largo alcance hasta los 2000 metros • Contiene varios canales de frecuencia de selección en un dispositivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Los dispositivos requiere magnitudes medianas de voltaje y corriente para su funcionamiento • Costo intermedio • Poco frágiles

Módulos de radio frecuencia

Son elementos electrónicos para diseñar sistemas radiocontrolados, pueden ser simplex (transmisor-receptor) o dúplex (transceptores). Se usan especialmente para control por medio de microcontroladores o elementos digitales de control por vía serial.

Tabla 28*Ventajas y desventajas de módulos de RF*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Variedad de frecuencias de trabajo • Compacto • Variedad de alcance entre 50 a 2000 m • Fácil de implementarlo 	<ul style="list-style-type: none"> • Para utilizar en dispositivos electrónicos como smartphone y PC's, se requiere de otros implementos. • Interferencia entre módulos que trabajen en la misma frecuencia. • No tiene seguridad y privacidad de intercambio de datos.

3.4.6. Módulo 6. Control

Este módulo comprende el sistema de control como por ejemplo la Controlabilidad y el tipo de control.

Controlabilidad

Este apartado hace referencia a los dispositivos electrónicos de control para el interfaz destinado al comando de los actuadores desde el mando de control local

Codificadores y decodificadores

Son circuitos integrados encargados de transformar la información en una señal en códigos. El codificador acepta una señal de entrada digital y lo convierte en una señal de tren de pulsos. El decodificador recepta la señal de tren de pulsos y lo convierte en activación de salidas digitales. Estos implementos son usados para aplicaciones de radio control para controlar varios dispositivos a distancia.

Tabla 29

Ventajas y desventajas de Codificadores y Decodificadores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Fácil de uso• Tiene direcciones y canales para datos digitales y análogos• Muy bajo consumo de energía• Bajo costo• Hay modelos que contienen circuitos de transmisión y recepción• Mínimos elementos externos para su configuración	<ul style="list-style-type: none">• Limitante para uso de aplicaciones más complejas• Pocas entradas y salidas• No procesa señales.

Raspberry

Raspberry es un mini ordenador de bajo costo y tamaño reducido.

Tabla 30

Ventajas y desventajas del Raspverry

ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Consumo eléctrico 5v• Ejecutar sistemas operativos• Velocidad de procesamiento de datos moderado• Alta memoria	<ul style="list-style-type: none">• Requiere tiempo de ejecución para su utilización• Costo medio alto

Arduino

Es una placa electrónica de código abierto incorporado un microcontrolador y circuitos de interfaz.

Tabla 31

Ventajas y desventajas del Arduino

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo• Fácil adquisición• Variedad de placas• Tarjeta compacta• Fácil entorno de programación	<ul style="list-style-type: none">• Velocidad de procesamiento medianamente bajo• Baja memoria

Tipo de control

Control ON/OFF

También llamado control Todo o Nada, que contiene solo dos estados de activación: encendido y apagado. Muy utilizado en procesos de poca precisión.

Tabla 32*Ventajas y desventajas del control ON/OFF*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Simple de implementarlo y mantenimiento• Funcionamiento óptimo en procesos de retardos bajos• Bajo precio de implementación	<ul style="list-style-type: none">• Variación cíclica dentro del valor de referencia• Mínima precisión• No es recomendable para procesos muy inestables

Control PID

El controlador PID (proporcional, integral, derivativo) es un controlador realimentado que permite regular el error en estado estacionario a un valor nulo en el tiempo.

Tabla 33*Ventajas y desventajas del Control PID*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Mayor estabilidad• Óptimo para sistemas dinámicos• Son robustos	<ul style="list-style-type: none">• El Costo de implementación es alto• Son limitantes para ciertas plantas inestables

3.4.7 Módulo 7. Energía

A continuación, se presentarán variedad de fuentes energéticas para cubrir el abastecimiento para los dispositivos electrónicos.

Tabla 34*Ventajas y desventajas de medios energéticos*

Medio energético	Ventaja	Desventaja
Panel solar	<ul style="list-style-type: none">• Ecológico• Gratuita• Fácil implementación• Fácil adquisición	<ul style="list-style-type: none">• Costoso• Depende del clima• Baja efectividad• Riguroso montaje
Batería	<ul style="list-style-type: none">• Tamaño compacto• Fácil implementación• Gran variedad de potencia en el mercado• Fácil montaje	<ul style="list-style-type: none">• Tienen tiempo de vida limitado• Necesita cargarse• Peso considerable• Media o baja autonomía por unidad

3.5. Evaluación y selección de las alternativas para el diseño

Para evaluar entre todas las opciones propuestas anteriormente para cada módulo y seleccionar la más adecuada al proyecto, se usará el método ordinal corregido de criterios ponderados (Romeva, 2002). Hay que establecer criterios en los cuales, las alternativas de los módulos deberán ser evaluadas relativamente entre ellos con una ponderación. Se realiza tablas en donde cada criterio o solución se evalúa con otro criterio o solución y se asignan las siguientes ponderaciones:

- 1 Si el criterio o solución de la fila es superior al otro criterio o solución de la columna.
- 0.5 Si el criterio o solución de la fila es igual al otro criterio o solución de la columna.
- 0 Si el criterio o solución de la fila es inferior al otro criterio o solución de la columna.

La primera tabla es sobre criterios relacionados al módulo, después se evalúan las posibles soluciones entre ellos a base de cada criterio anteriormente. Y al final se multiplica el valor de las ponderaciones de cada solución obtenida por la ponderación de cada criterio. La sumatoria final de estos valores indicará la mejor opción o solución de las demás.

3.5.1 Módulo 1. Sistema de locomoción

Tabla 35

Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 1. Sistema de locomoción

Criterio	Contro l	Implementación	Movilidad	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Control	-	0	0	0	1	0.1
Implementación	1	-	0.5	0	2.5	0.25
Movilidad	1	0.5	-	1	3.5	0.35
Costo	1	1	0	-	3	0.3
				Suma	10	1

- Solución 1: Sistema de locomoción por ruedas
- Solución 2: Sistema de locomoción por banda
- Solución 3: Sistema de locomoción por patas

Tabla 36

Ponderación de control para las alternativas al Módulo 1.

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	3	0.5
Solución 2	0	-	1	2	0.33
Solución 3	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 37*Ponderación de implementación para las alternativas al Módulo 1.*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	3	0.5
Solución 2	0	-	1	2	0.33
Solución 3	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 38*Ponderación de movilidad para las alternativas al Módulo 1.*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	3	0.5
Solución 2	0	-	1	2	0.33
Solución 3	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 39*Ponderación de costo para las alternativas al Módulo 1.*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	3	0.5
Solución 2	0	-	1	2	0.33
Solución 3	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 40*Conclusión en la selección alternativa de diseño al Módulo 1.*

	Control	Implementación	Movilidad	Costo	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.05	0.12	0.17	0.15	0.49	1
Solución 2	0.03	0.08	0.11	0.1	0.32	2
Solución 3	0.01	0.04	0.06	0.05	0.16	3

De acuerdo a la Tabla 40, la solución seleccionada para el sistema de locomoción es la alternativa del sistema de locomoción por ruedas.

3.5.2 Módulo 2. Estructura mecánica

Materiales para el armazón y chasis

Tabla 41

Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 1. Materiales para el armazón

Criterio	Ensamblaje	Resistividad en volumen	Ligero	$\Sigma + 1$	Ponderación
Ensamblaje	-	0	0.5	1.5	0.25
Resistividad	1	-	1	3	0.5
Ligero	0.5	0	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

- Solución 1: Acero
- Solución 2: Aluminio
- Solución 3: Acrílico
- Solución 4: ABS

Tabla 42

Ponderación de ensamblaje para las alternativas de materiales para el armazón

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	0	1	0.1
Solución 2	1	-	1	0.5	3.5	0.35
Solución 3	1	0	-	0.5	2.5	0.25
Solución 4	1	0.5	0.5	-	3	0.3
				Suma	10	1

Tabla 43*Ponderación de resistividad en volumen para las alternativas de materiales del armazón*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	1	4	0.4
Solución 2	0	-	1	1	3	0.3
Solución 3	0	0	-	1	2	0.2
Solución 4	0	0	0	-	1	0.1
				Suma	10	1

Tabla 44*Ponderación de ligero para las alternativas de materiales de armazón*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	0	1	0.1
Solución 2	1	-	0.5	0	2.5	0.25
Solución 3	1	0.5	-	0.5	3	0.3
Solución 4	1	1	0.5	-	3.5	0.35
				Suma	10	1

Tabla 45*Conclusión en la selección alternativa de materiales para el armazón*

	Ensamblaje	Resistividad	Ligero	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.025	0.2	0.025	0.25	2
Solución 2	0.087	0.15	0.062	0.29	1
Solución 3	0.062	0.1	0.075	0.23	3
Solución 4	0.075	0.05	0.087	0.21	4

De acuerdo a la Tabla 45, la solución seleccionada para el material para el armazón y chasis es realizarlo con aluminio.

Soporte para golpes

Tabla 46

Ponderación de criterios de evaluación para el soporte para golpes

Criterio	Implementación	Absorber energía	Ligero	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	0.5	0	1.5	0.25
Absorber energía	0.5	-	0.5	2	0.33
Ligero	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

- Solución 1: Sistema de aislamiento de vibraciones
- Solución 2: Material con alta deformidad y desplazamiento

Tabla 47

Ponderación de implementación para las alternativas de soporte para golpes

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 48

Ponderación de absorber energía para las alternativas de soporte para golpes

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	1.5	0.5
Solución 2	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

Tabla 49

Ponderación de ligero para las alternativas de soporte para golpes

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 50*Conclusión en la selección alternativa de soporte para golpes*

	implementación	absorber energía	ligero	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.08	0.16	0.14	0.38	2
Solución 2	0.1	0.16	0.28	0.54	1

De acuerdo a la Tabla 50, la solución seleccionada del soporte para golpes es utilizar un material con alta deformidad y desplazamiento.

3.5.3 Módulo 3. Accionamientos

Sistema de desplazamiento

Son los actuadores que permiten que las ruedas giren y el robot pueda desplazarse por el terreno.

Tabla 51*Criterios de evaluación para el Sistema de desplazamiento*

Criterio	Velocidad	Potencia	Control	$\Sigma + 1$	Ponderación
Velocidad	-	1	0.5	2.5	0.42
Potencia	0	-	0	1	0.16
Control	0.5	1	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

- Solución 1: Motor paso a paso
- Solución 2: Motor DC con caja reductora
- Solución 3: Servo motor

Tabla 52*Ponderación de velocidad para el Sistema de desplazamiento*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.17
Solución 2	1	-	1	3	0.5
Solución 3	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 53*Ponderación de potencia para el Sistema de desplazamiento*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.16
Solución 2	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución 3	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 54*Ponderación de control para el Sistema de desplazamiento*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	0.5	2	0.33
Solución 2	0.5	-	0.5	2	0.33
Solución 3	0.5	0.5	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 55*Conclusión en la selección alternativa del Sistema de desplazamiento*

	Velocidad	Potencia	Control	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.07	0.02	0.14	0.23	3
Solución 2	0.21	0.07	0.14	0.42	1
Solución 3	0.14	0.07	0.14	0.35	2

De acuerdo a la Tabla 55, la solución seleccionada para el sistema de desplazamiento es utilizar Motor Dc con caja reductora.

Posicionamiento

Es el actuador o actuadores que permitirán al robot colocarse o trasladar la cámara en la posición correcta para capturar video.

Tabla 56.
Criterios de evaluación para el Sistema de despliegue

Criterio	Compacto	Potencia	Control	$\Sigma + 1$	Ponderación
Compacto	-	0.5	0	1.5	0.25
Potencia	0.5	-	0.5	2	0.33
Control	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

- Solución 1: Motor paso a paso
- Solución 2: Motor DC con caja reductora
- Solución 3: Servo motor

Tabla 57
Ponderación de compacto para el Sistema de despliegue

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0	2	0.33
Solución 2	0	-	0	1	0.17
Solución 3	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

Tabla 58
Ponderación de potencia para el Sistema de despliegue

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución 2	0	-	0	1	0.16
Solución 3	0.5	1	0	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 59*Ponderación de control para el Sistema de despliegue*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución 2	0	-	0	1	0.16
Solución 3	1	1	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 60*Conclusión en la selección alternativa del Sistema de despliegue*

	Compacto	Potencia	Control	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.08	0.14	0.17	0.39	2
Solución 2	0.04	0.05	0.07	0.16	3
Solución 3	0.12	0.14	0.17	0.43	1

De acuerdo a la Tabla 60, la solución seleccionada para el posicionamiento es utilizar servo motores.

3.5.4 Módulo 4. Potencia

Tabla 61*Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 4. Potencia*

Criterio	Implementación	Potencia	Compacto	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	0.5	0	1.5	0.25
Potencia	0.5	-	0	1.5	0.25
Compacto	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

- Solución 1: Puente H con elementos electrónicos
- Solución 2: Puente H en C.I.
- Solución 3: Driver de potencia
- Solución 4: Optoacopladores

Tabla 62*Ponderación de implementación para las alternativas del Módulo 4. Potencia*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	0.5	1.5	0.15
Solución 2	1	-	0.5	1	3.5	0.35
Solución 3	1	0.5	-	1	3.5	0.35
Solución 4	0.5	0	0	-	1.5	0.15
				Suma	10	1

Tabla 63*Ponderación de potencia para las alternativas del Módulo 4. Potencia*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0.5	0.5	3	0.3
Solución 2	0	-	0	0.5	1.5	0.15
Solución 3	0.5	1	-	1	3.5	0.35
Solución 4	0.5	0.5	0	-	2	0.2
				Suma	10	1

Tabla 64*Ponderación de compacto para las alternativas del Módulo 4. Potencia*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.5	2.5	0.25
Solución 2	1	-	1	1	4	0.4
Solución 3	0	0	-	0	1	0.1
Solución 4	0.5	0	1	-	2.5	0.25
				Suma	10	1

Tabla 65*Conclusión en la selección alternativa del módulo 4. Potencia*

	Implementación	Potencia	Compacto	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.04	0.08	0.12	0.24	2
Solución 2	0.09	0.04	0.2	0.33	1
Solución 3	0.09	0.09	0.05	0.23	3
Solución 4	0.04	0.05	0.12	0.21	4

De acuerdo a la Tabla 65, la solución seleccionada de la potencia es utilizar puente H en C.I.

3.5.5 Módulo 5. Teleoperación

Sistema de visión

Tabla 66

Ponderación de criterios de evaluación para Sistema de visión

Criterio	Implementación	Velocidad	Alcance	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	0	0	1	0.17
Velocidad	1	-	1	3	0.5
Alcance	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

- Solución 1: Bluetooth
- Solución 2: Wifi
- Solución 3: Sistema FPV

Tabla 67

Ponderación de implementación para las alternativas de Sistema de visión

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución 2	0	-	0	1	0.16
Solución 3	0.5	1	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 68

Ponderación de velocidad para las alternativas de Sistema de visión

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.16
Solución 2	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución 3	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 69*Ponderación de alcance para las alternativas de Sistema de visión*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.17
Solución 2	1	-	0	2	0.33
Solución 3	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

Tabla 70*Conclusión en la selección alternativa de Sistema de visión*

	Implementación	Velocidad	Alcance	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.07	0.08	0.05	0.2	3
Solución 2	0.03	0.21	0.11	0.35	2
Solución 3	0.07	0.21	0.16	0.45	1

De acuerdo a la Tabla 70, la solución seleccionada para el sistema de visión es implementar un sistema FPV.

Teleoperación de mando

Tabla 71*Ponderación de criterios de evaluación para Sistema de mando*

Criterio	Implementación	Velocidad	Alcance	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	0	1	2	0.33
Velocidad	1	-	0.5	2.5	0.42
Alcance	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

- Solución 1: Bluetooth
- Solución 2: Wifi
- Solución 3: Módulo RF

Tabla 72*Ponderación de implementación para las alternativas de Sistema de mando*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	0	2	0.33
Solución 2	0	-	0	1	0.17
Solución 3	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

Tabla 73*Ponderación de velocidad para las alternativas de Sistema de mando*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.17
Solución 2	1	-	1	3	0.5
Solución 3	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 74*Ponderación de alcance para las alternativas de Sistema de mando*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.16
Solución 2	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución 3	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 75*Conclusión en la selección alternativa de Sistema de mando*

	Implementación	Velocidad	Alcance	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.11	0.07	0.04	0.22	3
Solución 2	0.05	0.21	0.1	0.36	2
Solución 3	0.16	0.14	0.1	0.4	1

De acuerdo a la Tabla 75, la solución seleccionada para la teleoperación de mando es efectuar módulos de RF.

3.5.6 Módulo 6. Control

Controlabilidad

Tabla 76

Ponderación de criterios de evaluación para Controlabilidad

Criterio	I/O	Programación	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
I/O	-	0	0.5	1.5	0.25
Programación	1	-	1	3	0.5
Costo	0.5	0	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

- Solución 1: Codificadores y decodificadores
- Solución 2: Raspberry
- Solución 3: Arduino

Tabla 77

Ponderación de I/O para las alternativas de controlabilidad

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	0	1.5	0.25
Solución 2	0.5	-	0.5	2	0.33
Solución 3	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 78

Ponderación de programación para las alternativas de controlabilidad

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	0	1	0.17
Solución 2	1	-	0	2	0.33
Solución 3	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

Tabla 79*Ponderación de costo para las alternativas de controlabilidad*

Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	1	3	0.5
Solución 2	0	-	0	1	0.17
Solución 3	0	1	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 80*Conclusión en la selección alternativa para controlabilidad*

	I/O	Programación	Costo	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.06	0.08	0.12	0.27	3
Solución 2	0.08	0.16	0.04	0.28	2
Solución 3	0.1	0.25	0.08	0.43	1

De acuerdo a la Tabla 80, la solución seleccionada para la controlabilidad es emplear tarjetas arduino.

Tipo de control

Tabla 81*Ponderación de criterios de evaluación para tipo de control*

Criterio	Implementación	Accionamiento	Control	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	0	1	2	0.33
Accionamiento	1	-	1	3	0.5
Control	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución 1: On/Off
- Solución 2: PID

Tabla 82*Ponderación de implementación para las alternativas para el tipo de control*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	2	0.67
Solución 2	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 83*Ponderación de accionamiento para las alternativas para el tipo de control*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	1.5	0.5
Solución 2	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

Tabla 84*Ponderación de control para las alternativas para el tipo de control*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 85*Conclusión en la selección alternativa para el tipo de control*

	Implementación	Accionamiento	Control	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.22	0.25	0.05	0.52	1
Solución 2	0.11	0.25	0.11	0.48	2

De acuerdo a la Tabla 85, la solución seleccionada para el tipo de control es realizarlo con método de ON/OFF.

3.5.7 Módulo 7. Energía

Tabla 86

Ponderación de criterios de evaluación para el Módulo 7. Energía

Criterio	Capacidad	Costo	Compacto	$\Sigma + 1$	Ponderación
Capacidad	-	1	0.5	2.5	0.42
Costo	0	-	0	1	0.16
Compacto	0.5	1	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

- Solución 1: Panel solar
- Solución 2: Baterías

Tabla 87

Ponderación de capacidad para las alternativas del Módulo 7. Energía

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 88

Ponderación de costo para las alternativas del Módulo 7. Energía

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	1.5	0.5
Solución 2	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

Tabla 89

Ponderación de compacto para las alternativas del Módulo 7. Energía

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 90*Conclusión en la selección alternativa del Módulo 7.Energía*

	Capacidad	Costo	Compacto	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.14	0.08	0.13	0.35	2
Solución 2	0.28	0.08	0.28	0.65	1

De acuerdo a la Tabla 90, la solución seleccionada de energía es utilizar baterías para el abastecimiento energético.

3.6 Definición del diseño

Con las alternativas seleccionadas, mostrada en la Tabla 68, se procede a realizar el diseño correspondiente para cada uno de los módulos.

Tabla 91*Alternativas para cada módulo*

Módulo	Definición	Alternativa
Módulo 1	Sistema de locomoción	Sistema de locomoción por ruedas
Módulo 2	Estructura mecánica	Armazón y chasis hecho con aluminio. Material con alta deformidad y desplazamiento
Módulo 3	Accionamientos	Movilidad: Motor con caja reductora Posicionamiento: Servo motor
Módulo 4	Potencia	Puente H en C.I
Módulo 5	Teleoperación	Visión por Sistema FPV Teleoperación de mando por módulo de RF
Módulo 6	Control	Tarjeta Arduino con tipo de control On/Off
Módulo 7	Energía	Suministro de energía por Batería

3.6.1 Módulo 1 Sistema de locomoción

La alternativa de diseño para el Módulo 1 (Tabla 40) consiste en la selección del sistema de locomoción; puesto que el objetivo principal de un sistema de locomoción es

otorgar los medios móviles al robot en el terreno que va a trabajar. El terreno de trabajo del robot a desarrollar es uniforme o plano, característico de las superficies de plantas de pisos de las edificaciones.

El sistema de locomoción con patas queda sobre dimensionado para el medio en que el robot trabajará. El robot requeriría por lo menos 4 patas para una estabilidad idónea y cada pata requerirá por lo menos 2 actuadores para cada articulación. Actuadores adicionales necesitarán más elementos para su funcionamiento y por ende más costo en el proyecto de manera innecesaria. Del mismo modo del sistema de locomoción por bandas o cadenas es similar con el sistema de locomoción con patas, sobre dimensionado para la aplicación destinada.

Por lo tanto, se ha escogido el sistema de locomoción por ruedas (ver tabla 40) por ser la solución exacta, ni más ni menos, para acatar las características mencionadas.

Para el diseño del robot móvil con ruedas se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- **El equilibrio** propone la estabilidad del robot sobre el terreno, se lo lleva por medio de las ruedas. Aunque la estabilidad se lo puede obtener con 3 ruedas para el punto de apoyo con el suelo, se considera configuraciones que solo es necesario 2 ruedas con otros elementos de apoyos.

- **El Sistema de suspensión** equivale a diseñar un mecanismo o elemento para garantizar que todas las ruedas estén en contacto con el terreno.
- **La maniobrabilidad** dispone la libre movilidad del robot de acuerdo a los suficientes grados de libertad y la disposición y tipo de ruedas.
- **La Tracción** es la capacidad de la rueda en tener adherencia con el suelo.

En robótica móvil se encuentran varios tipos de ruedas, que tienen características diferentes de movimiento debido a los grados de libertad y a su cinemática, como se muestra en la Figura 31.

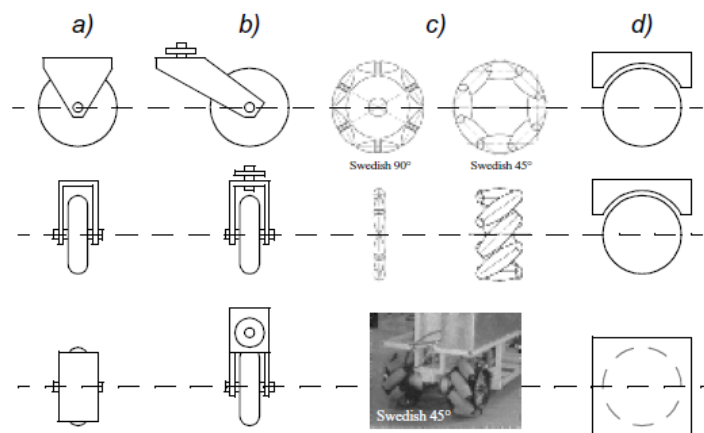



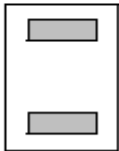
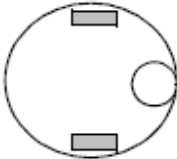
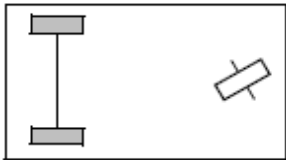
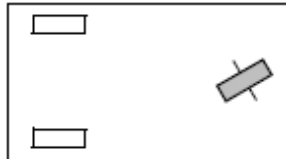
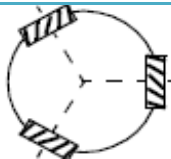
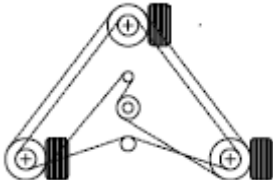
Figura 31. Tipos de ruedas. (a) Rueda estándar, 2 grados de libertad (motorizado). (b) Rueda loca, dos grados de libertad. (c) Rueda sueca, 3 grados de libertad (motorizada). (d) Bola o rueda esférica

Fuente: (Siegwart, 2004)

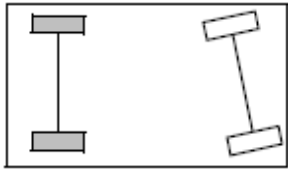
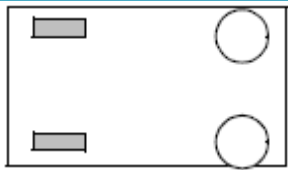
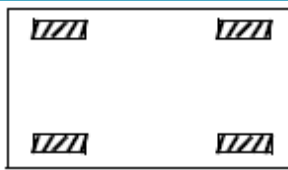
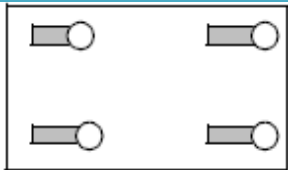
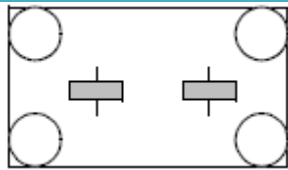
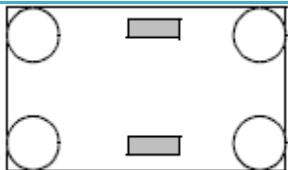






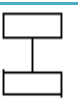
Existe un amplio rango de posibilidades sobre configuraciones en un sistema de locomoción por ruedas que ofrecen diversas soluciones para las características de

diseño. En la tabla 92 se muestra las configuraciones dependiendo las posibles combinaciones del tipo y número de ruedas.

Tabla 92
Configuraciones de un sistema de locomoción por ruedas

Número de ruedas	Disposición	Descripción	Ejemplos
2		Un volante en la parte delantera, una rueda de tracción en la parte trasera	Bicicleta, motocicleta
		Impulsión diferencial de dos ruedas con el centro de masa (COM) por debajo del eje	Cye personal robot
3		Impulsión diferencial centrada en dos ruedas con un tercer punto de contacto	Nomad Scout, smartRob EPFL
		Dos ruedas de tracción conectadas (diferencial) en la parte trasera, 1 rueda libre dirigida en la parte delantera	Mini camiones Piaggio
		Dos ruedas libres en la parte trasera, 1 rueda de tracción orientada en la parte delantera	Neptune (Carnegie Mellon University), Hero-1
		Tres ruedas motorizadas suecas o esféricas dispuestas en un triángulo; El movimiento omnidireccional es posible	Stanford wheel Tribolo EPFL, Palm Pilot Robot Kit (CMU)
		Tres ruedas motorizadas y dirigidas sincrónicamente; La orientación no es controlable	“Synchro drive” La Denning MRV-2, Georgia Institute of Technology.

CONTINÚA 

4		<p>Dos ruedas motorizadas en la parte trasera, 2 ruedas dirigidas en la parte delantera; La dirección tiene que ser diferente para las 2 ruedas para evitar deslizamiento / patinaje.</p>	<p>Automóvil con tracción trasera</p>
		<p>Dos ruedas de tracción (diferencial) en la parte trasera / delantera, 2 ruedas omnidireccionales en la parte delantera / trasera</p>	<p>Charlie (DMT-EPFL)</p>
		<p>Cuatro ruedas omnidireccionales</p>	<p>Carnegie Mellon Uranus</p>
		<p>4 ruedas motorizadas y giratorias</p>	<p>Nomad XR4000</p>
6		<p>Dos ruedas motorizadas y dirigidas alineadas en el centro, 1 rueda omnidireccional en cada esquina</p>	<p>First</p>
		<p>Dos ruedas de tracción (diferencial) en el centro, 1 rueda omnidireccional en cada esquina</p>	<p>Terregator (Carnegie Mellon University)</p>
<p>Los iconos para cada tipo de rueda son los siguientes:</p>			
	<p>Rueda omnidireccional no motorizada (esférico, castor, sueco)</p>		
	<p>Rueda sueca motorizada (rueda de Stanford)</p>		
	<p>Rueda estándar sin motor</p>		
	<p>Rueda estándar motorizada</p>		
	<p>Rueda motorizada y giratoria dirigida</p>		
	<p>Rueda estándar dirigida</p>		
	<p>Ruedas conectadas.</p>		

Fuente: (Siegwart, 2004)

3.6.1.1 Diseño de equilibrio y maniobrabilidad

La selección del tipo de ruedas y la disposición entre ellos, tienen un gran efecto sobre la cinemática total del robot móvil. La disposición de las ruedas satisface el diseño del equilibrio y maniobrabilidad del robot. En la tabla 92. se muestran algunas configuraciones de ruedas más populares sobre robótica móvil con sistema de locomoción por ruedas; no obstante, en la actualidad se puede hallar más configuraciones de prototipos robóticos móviles.

La configuración del robot móvil a construir será con 4 ruedas estándar motorizadas no conectadas, así tendrá 4 puntos de apoyos que cumplirá con la estabilidad. La disposición entre ellas será como se muestra en el esquema básico de la Figura 32.

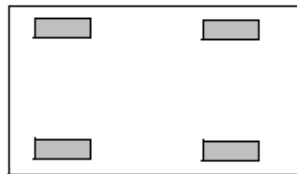


Figura 32. Esquema básico de configuración de ruedas del robot a construir

Para satisfacer con el diseño de maniobrabilidad se explicará las siguientes características:

- La rueda delantera izquierda tendrá la misma velocidad y sentido de giro que la rueda trasera izquierda. La rueda delantera derecha tendrá la misma velocidad y sentido de giro que la rueda trasera derecha.

- El cambio de dirección del robot se lo hará por diferencia de velocidad o de giro entre las ruedas izquierdas con las ruedas derechas.

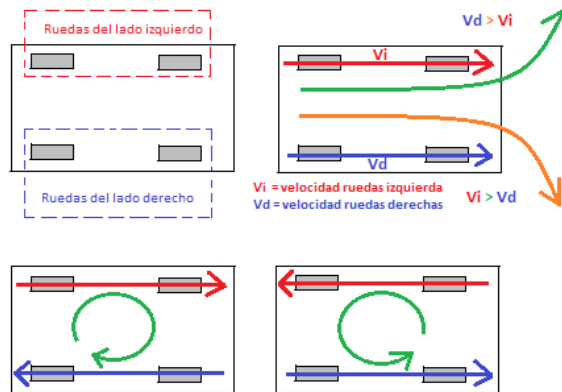


Figura 33. Maniobrabilidad del robot móvil a desarrollar

En el diseño del sistema de suspensión y tracción se lo realizará en la explicación del módulo 2. Estructura mecánica, prácticamente es el desarrollo geométrico de las ruedas.

3.6.2 Módulo 2. Estructura Mecánica

La alternativa de diseño para el Módulo 2 es la estructura mecánica que se divide en dos: diseño del armazón y diseño de un sistema que soporte golpes.

3.6.2.1 Diseño de un sistema que soporte golpes

La alternativa seleccionada para el soporte de golpes es utilizar un material con alta capacidad de deformación y desplazamiento para la construcción de las ruedas (ver tabla 50). Estos materiales tienen la capacidad de recuperar sus dimensiones o forma original, una vez terminado el esfuerzo mecánico que previamente lo ha deformado.

Las ruedas serán los encargados de recibir el impacto por lo que las dimensiones de estos deberán sobresalir de la estructura base del robot. En la Figura 34 se muestra algunos ejemplos de posibles impactos entre las ruedas y la superficie; en cualquier orientación del robot que pueda caer, las ruedas siempre deberán hacer contacto con la superficie más no la estructura de la base.

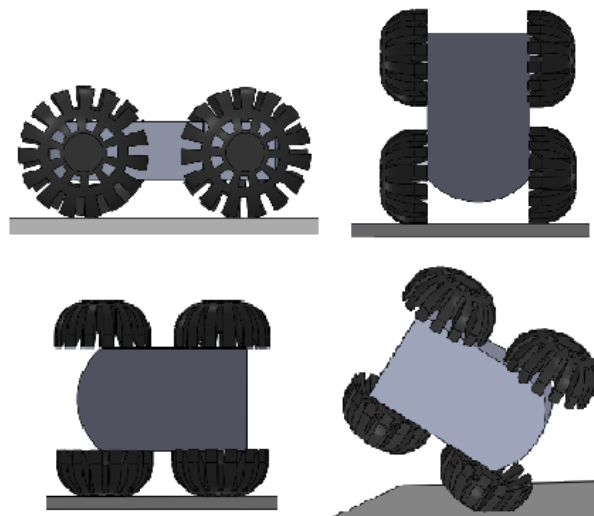


Figura 34. Posibles contactos entre la superficie y las ruedas

El material con alta capacidad de deformación y desplazamiento a utilizar será un polímero. Los polímeros están formados por macromoléculas (moléculas grandes) por la unión de pequeñas moléculas (monómeros) en un proceso llamado polimerización. La estructura final es un conjunto de largas cadenas de moléculas, ofreciendo propiedades de mayor resistencia, flexibilidad, elasticidad, aislante térmico y tener una alta relación resistencia/densidad. Hoy en día, los polímeros han dado lugar a materiales como plásticos, cauchos y otras fibras de las cuales, la mayoría son sintéticos. Los polímeros se pueden dividir en función a la estructura interna y el comportamiento a la temperatura (Tabla 93).

Tabla 93

División de los polímeros en función a su estructura interna y comportamiento de calor

Tipo de polímero	Características	Aplicaciones
Termoestables	<ul style="list-style-type: none"> • Se endurecen al aplicarles calor. • Son más duros, resistentes y frágiles que los demás tipos de polímeros. • Soportan mayor temperatura que los demás polímeros • No pueden cambiar su forma a pesar de suministrar calor y presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Accesorios eléctricos como aislante. • Cascos de motos. • Adhesivo Resina epoxi.
Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Se suavizan al calentarse por lo que la elaboración de productos se lo hace aplicando calor y presión para dar forma. • Son blandos y dúctiles • Químicamente resistentes • Baja resistencia mecánica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tuberías de PVC • nylon • Envases de alimentos
Elastómeros	<ul style="list-style-type: none"> • Es el tipo de polímero que posee mayor elasticidad. • Son blandos. • Temperatura de trabajo cercano a la temperatura de ambiente • Se puede aumentar la resistencia sometiéndolos al proceso de vulcanización 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación de gomas. • Neumáticos. • Guantes de hule. • Suelas de zapatos

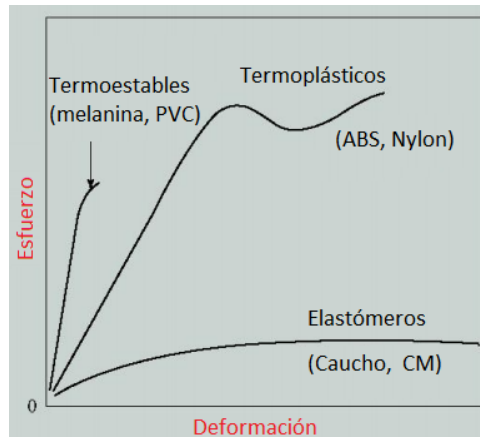


Figura 35. Curvas Esfuerzo vs Deformación para los tipos de polímeros
Fuente: (Álvarez, 2010)

De acuerdo a la tabla 93 y Figura 35, se escogerá un polímero de tipo elastómero por tener la propiedad de ser más elástico al aplicarse una fuerza y recuperar su forma inicial cuando cesa dicha fuerza: por tal motivo los neumáticos y las bandas de rodaduras de algunas ruedas están realizadas por elastómeros además de su adherencia con el suelo.

El mercado de polímeros ofrece una gama de elastómeros con variedad de propiedades para una aplicación determinada. Los elastómeros son materiales con diferentes características que los metales y por ello se han hecho estudios de ensayos físicos, químicos y mecánicos exclusivamente para estos materiales. Existen varios métodos realizados por diferentes organizaciones, pero en este documento se detallará las propiedades de los elastómeros normalizada por la Asociación Americana de Ensayos y Materiales (ASTM).

A continuación, se describirán las propiedades de los elastómeros según el propósito del desarrollo de este proyecto. En primer lugar, se agruparán los elastómeros en principales grupos de acuerdo a su composición, ya que existen una enorme cantidad individual en el mercado. Los grupos se asignan con siglas (Tabla 94) y se hará una comparación de propiedades sobre los elastómeros comunes porque cada grupo tiene elastómeros con amplias características.

Tabla 94

Siglas de elastómeros comunes

Siglas	Elastómero
CR	Neopreno
EP	Caucho de etileno propileno
FKM	Fluoroelastómero
SBR	caucho estireno-butadieno
IR	Caucho de Poliisopreno
NBR	Caucho nitrilo
IIR	Caucho butílico
VMQ	Caucho de silicona
CO	Caucho de epiclohidrina
AU	Caucho de poliuretano
NR	Caucho natural

La resistencia de abrasión es una resistencia mecánica producido por el frotamiento por contacto con otras superficies, eliminando gradualmente el material superficial por micro desgarramiento; la medición es la relación del material desprendido con el peso del material original (Adamiak, 2012). Nos ofrece una medida de la durabilidad del material durante su tiempo útil en trabajos con elementos en

contacto y en movimiento. Se hacen estos estudios de resistencia a la abrasión ya que son compuestos blandos que tienden a ser más susceptibles al desgaste abrasivo.

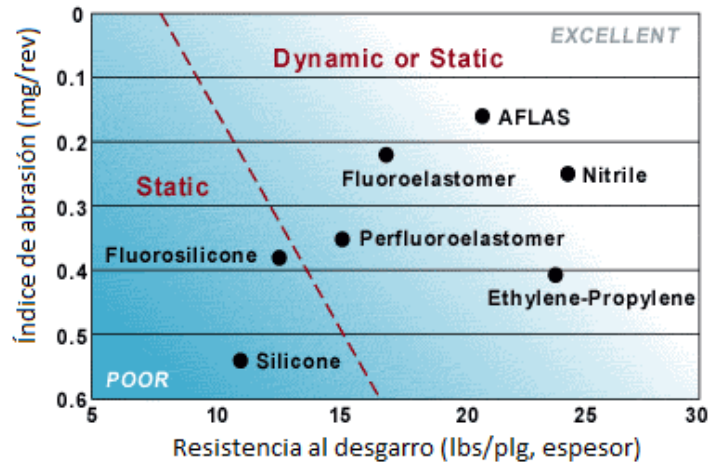


Figura 36. Índice de abrasión vs Resistencia al desgarro de algunos elastómeros
Fuente: (Catalog, 2013)

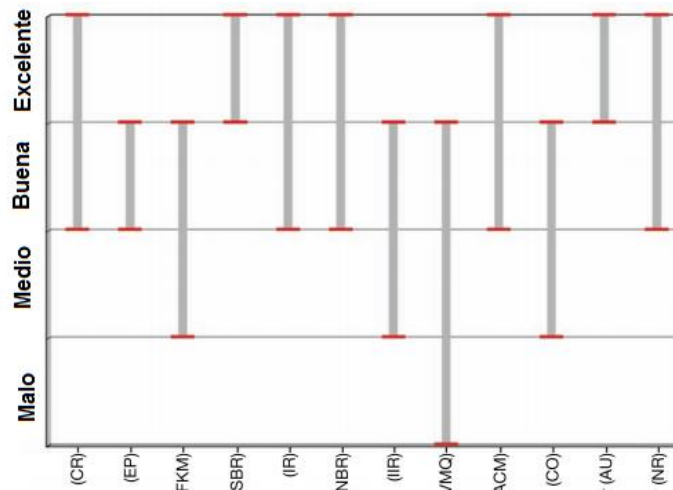


Figura 37. Grado de resistencia de abrasión en los elastómeros
Fuente: (EPRI, 2006)

El ensayo de tensión-deformación sirve para medir la calidad del elastómero conforme a su composición, diseminación de sus ingredientes, el curado de fabricación

y la degradación. La propiedad de interés en este documento es el ensayo del alargamiento a la rotura a temperatura ambiente como se muestra en la Figura 38.

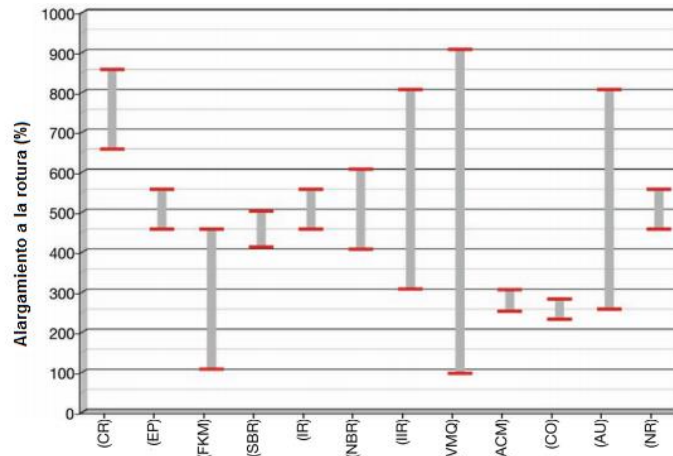


Figura 38. Comparación de elongación a la rotura de elastómeros comunes
Fuente: (EPRI, 2006)

El ensayo de resistencia (Figura 39) a la intemperie mide los efectos de los elastómeros frente a las variables del ambiente como luz solar, humedad, ozono, oxígeno y altas temperaturas. Todas estas variables causan deterioro del material en forma de decoloración, grietas, fragilidad y otras fallas.

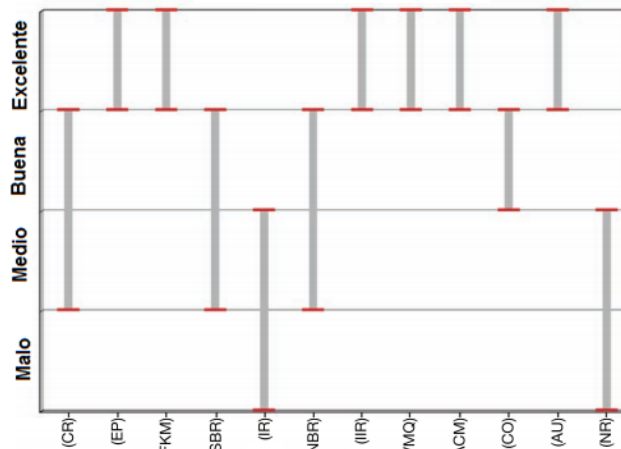


Figura 39. Comparación de la resistencia a la intemperie de elastómeros comunes.
Fuente: (EPRI, 2006)

Cuando un elastómero está sometido a una carga estática, se produce una deformación progresiva a lo largo del tiempo. Y si se mantiene la carga estática por un largo tiempo, el elastómero pierde su capacidad de ejercer fuerza para mantener su forma inicial.

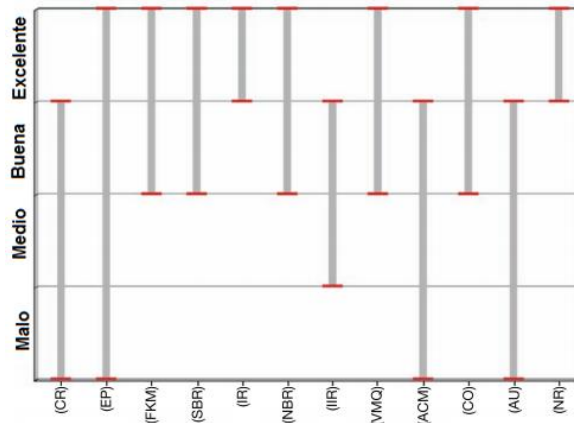


Figura 40. Comparación de la resistencia a la compresión de los elastómeros comunes
Fuente: (EPRI, 2006)

En el ensayo de impacto en los elastómeros, cada muestra o probeta de prueba se lo enfría cerca o por debajo de su temperatura de fragilidad. Existen dos métodos para este tipo de ensayo que son: la prueba de impacto Izod y la prueba de impacto Charpy. Ambos métodos consisten en realizar una fuerza impacto a la muestra de prueba.

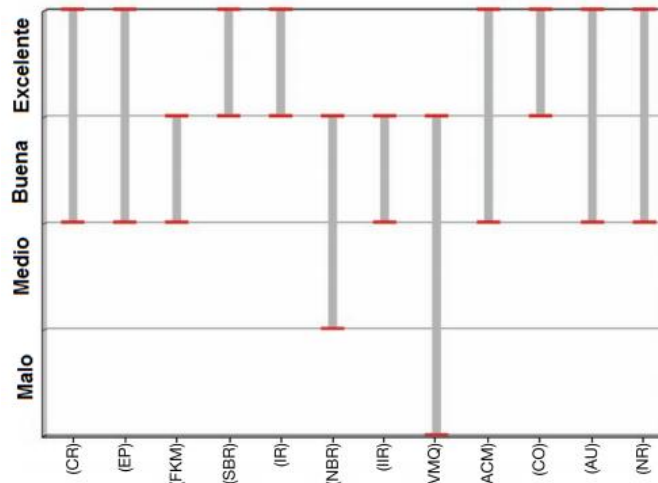


Figura 41. Comparación de la resistencia al impacto sobre elastómeros comunes
Fuente: (EPRI, 2006)

Se hará el proceso de QFD para seleccionar el elastómero adecuado. Los elastómeros escogidos para hacer la selección son el caucho de silicona y el poliuretano que son los más accesibles y la fabricación es relativamente fácil. Los criterios a evaluar a estos dos elastómeros se indican en la tabla 95.

Tabla 95
Criterios de evaluación para el elastómero

Criterio	Elasticidad	Costo	Intemperie	Abrasión	$\Sigma + 1$	Ponderación
Elasticidad	-	1	1	1	4	0.4
Costo	0	-	0	0.5	1.5	0.15
intemperie	0	1	-	1	3	0.3
Abrasión	0	0.5	0	-	1.5	0.15
Suma					10	1

- Solución 1: Caucho de silicona
- Solución 2. Poliuretano

Tabla 96*Ponderación de Elasticidad para las alternativas del elastómero*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	2	0.67
Solución 2	0	-	1	0.33
			3	1

Tabla 97*Ponderación de costo para las alternativas del elastómero*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	1	2	0.67
Solución 2	0	-	1	0.33
			3	1

Tabla 98*Ponderación de intemperie para las alternativas del elastómero*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0.5	1.5	0.5
Solución 2	0.5	-	1.5	0.5
			3	1

Tabla 99*Ponderación de abrasión para las alternativas del elastómero*

Criterio	Solución 1	Solución 2	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1	-	0	1	0.33
Solución 2	1	-	2	0.67
			3	1

Tabla 100*Conclusión en la selección alternativa del elastómero*

	Elasticidad	Costo	Intemperie	Abrasión	Σ	Orden de selección
Solución 1	0.268	0.1	0.15	0.05	0.568	1
Solución 2	0.132	0.05	0.15	0.1	0.432	2

La alternativa de solución seleccionada para el elastómero (Tabla 100) es utilizar caucho de silicona para el sistema amortiguadora de impacto. El caucho de silicona a

utilizar (Figura 42) será con agente catalizador para el curado a temperatura ambiente, lo que significa que es un caucho de silicona vulcanizado que le brinda mayor dureza, índices altos de resistencia de tracción, módulo de Young, resistencia a la abrasión y desgarre. Este caucho de silicona es de presentación líquida de color blanco por lo tanto es denominado como caucho de silicona líquida (LSR).



Figura 42. Caucho de silicona con catalizador

El caucho de silicona se lo utiliza en varias aplicaciones por ser muy flexible, elástico y resistente a bajas y altas temperaturas. En el mercado se puede conseguir varios productos de caucho de silicona con amplio rango de propiedades. En Anexos se explica el procedimiento que se realizó para determinar el módulo de Young que servirá para simular en un software CAE.

3.6.2.1.1 Tracción

La cualidad de tracción en una rueda está determinada por la fuerza de fricción estática entre la superficie de la rueda y la superficie donde se desplazará, cuando están en contacto. Por lo tanto, se describirá la naturaleza de la fricción en los elastómeros.

El coeficiente de fricción en los cauchos está descrito en términos de la adherencia, deformación, viscosidad y cohesión (efecto de desgarro), medido sobre una superficie. Adhesión son los relieves y uniones a nivel molecular. La fricción de histéresis es una pérdida de energía cuando el material intenta recuperar su forma, asociado con amortiguación interna dentro del cuerpo viscoelástico. El componente viscoso es la resistencia al desgarro (Mofidi, 2007).

El componente de la adherencia es muy significativo en las superficies de los cauchos debido a la atracción por contacto entre las moléculas superficiales del caucho y la superficie del otro material causado por las fuerzas Van der Waals.



Figura 43. Fuerza de adhesión (izquierda) y efecto de histéresis (derecha)

Fuente: (Moore, 1974)

El coeficiente de fricción en los elastómeros tiene relación con la dureza, cuanto mayor es la dureza, el coeficiente de fricción es menor y viceversa. La abrasión y la fricción están interrelacionadas de una manera compleja. La abrasión es causada por una falla mecánica bajo el esfuerzo de tracción producido por las fuerzas de fricción contra una abrasiva dura. Simplificadamente, en los elastómeros se presentan dos fuerzas (Figura 43) que intervienen en la fricción, la fuerza de adhesión (F_{ADHL}) entre el

elastómero y la otra superficie, y la fuerza de histéresis (F_{HYST}) por las pérdidas de deformación (Liang, 2007).

El caucho de silicona tiene la característica de ser pegajoso a varias superficies, llegando a que cualquier partícula de polvo o fragmento de material se aferre en su superficie. El coeficiente de fricción del caucho de silicona se encuentra entre menos de 0,25 y más de 0,75; mientras que el coeficiente del acero es aproximadamente 0.10.

Con la información propuesta se garantiza que el caucho de silicona tendrá buena tracción por las características innatas de los elastómeros. Se considera necesario que la rueda no tenga huellas porque las texturas disminuyen el coeficiente de fricción.

3.6.2.1.2 Sistema de suspensión

Las ruedas serán el sistema de suspensión por estar hecho de un material viscoelástico como lo es el caucho de silicona y que simulará el sistema de amortiguación. Un material viscoelástico combina las características de comportamiento elástico y viscoso donde la relación tensión-deformación es dependiente del tiempo (Good, 2016).

La amortiguación en elastómeros, es causada por el efecto de histéresis (llamada también amortiguación interna) cuando el material regresa a su estado inicial pierde una pequeña parte de la energía, transformándose en calor por fricción molecular. El comportamiento viscoelástico se puede modelar utilizando el modelo de

Maxwell (Figura 44) compuesto por un resorte lineal (con K_v constante del resorte) acoplado con un amortiguador (η coeficiente de amortiguamiento). La pérdida de histéresis de los cauchos depende bastante de la temperatura y la amplitud de carga, y es típicamente del orden de 5 - 40%. (Kalle Hanhi, 2007).

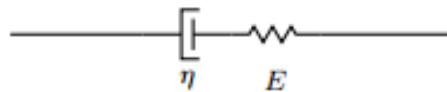


Figura 44. Componentes del parámetro viscoelástico
Fuente: (Good, 2016)

El componente elástico de un elastómero queda descrito como

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3. 1)$$

Donde σ es el esfuerzo, E es el módulo elástico y ε es la deformación.

El componente de viscosidad corresponde a:

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad 3. 2)$$

Donde η es la viscosidad del caucho de silicona y t el tiempo.

Para el modelo de Maxwell, la deformación total está comprendida por la suma de las aportaciones de deformación elástica y viscosa, de modo que resulta la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3. 3)$$

La viscosidad en los LSR está en el orden de los 1.000 [Pa.s] (Tim A. Osswald, 2011). Por lo tanto el modelo de viscosidad para un LSR queda como se muestra en la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\sigma}{1000} + \frac{1}{8 \cdot 10^6} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3. 4)$$

La ecuación (3.4) es la representación matemática del modelo visco elástico del LSR.

En complementación del sistema de suspensión en robots móviles se lo puede simplificar con el diseño geométrico de las ruedas de tal forma que la flexibilidad de estas, otorguen y mantengan el contacto continuo de las demás ruedas con el suelo. Se diseñó 3 modelos de rodadura: el modelo 1 con diámetro de 8 cm, es el modelo más sólido y presenta con varios bultos pequeños alrededor de la periferia, el modelo 2 tiene 10 cm de diámetro y con conexiones con dos lazos para cada masa saliente en forma

de T, el modelo 3 tiene 11cm de diámetro y con forma similar que el modelo 2 pero con más conexiones al final de la masa saliente (ver Figura 45).

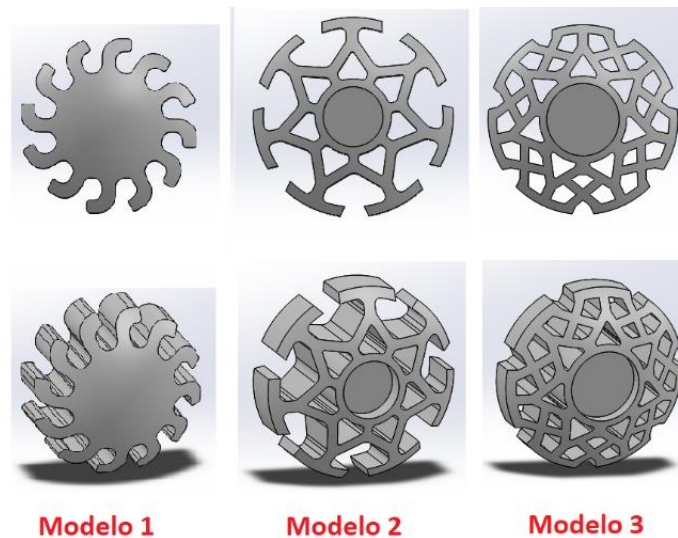


Figura 45. Modelos de rodaduras

A cada modelo de rodadura se los somete a una simulación de impacto con velocidad de 10 m/s, con restricción sin penetración de caras y con un tiempo de solución de 3000 [us] después del impacto. La finalidad es observar la transmisión de la fuerza del impacto en toda la masa del caucho de silicona, analizando los resultados justo en el momento que la rodadura empieza a rebotar.

Para tener veracidad en la simulación, se tuvo que realizar 4 simulaciones y analizar la convergencia de mallado que interviene en el resultado (ver figura 46). Como se muestra en la figura 46, la malla desde 3 hacia una malla más pequeña converge a un resultado similar, por lo que se recomienda hacer un tamaño de malla menor de 3.

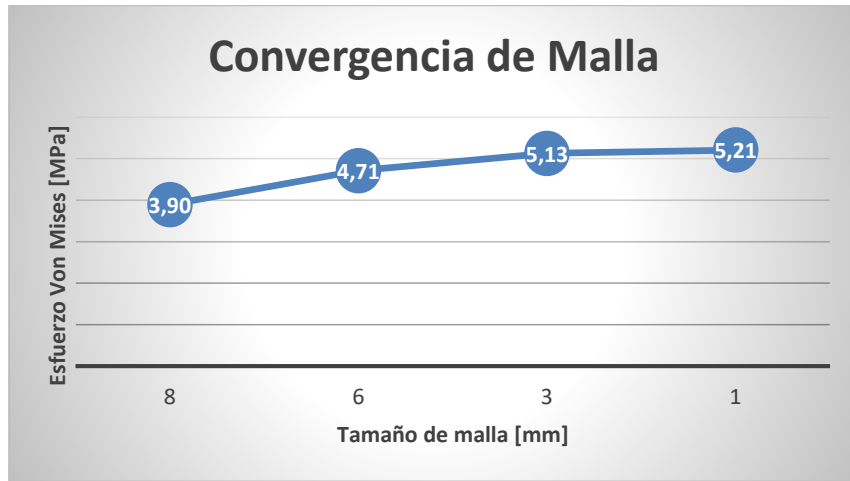


Figura 46. Convergencia de malla del modelo 1

Tabla 101

Resultados de simulación de rodaduras

Modelo	Esfuerzo Von Mises (MPa)	Deformación unitaria
1	4.750	0.31
2	4.193	0.59
3	3.466	0.47

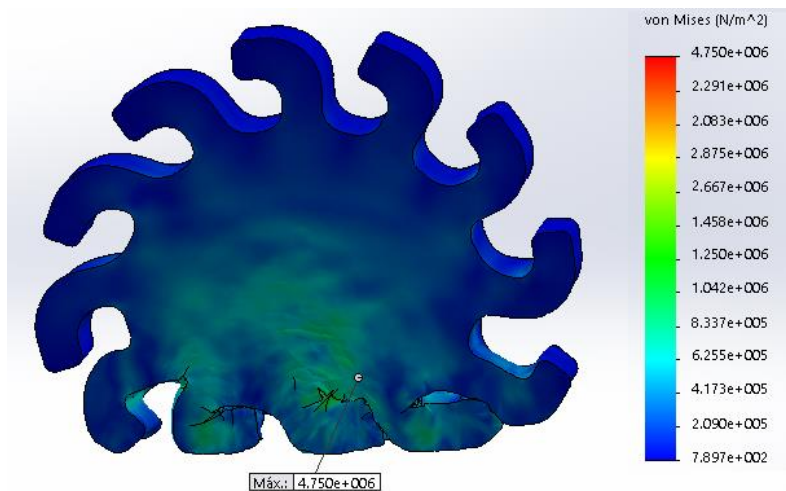


Figura 47. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 1

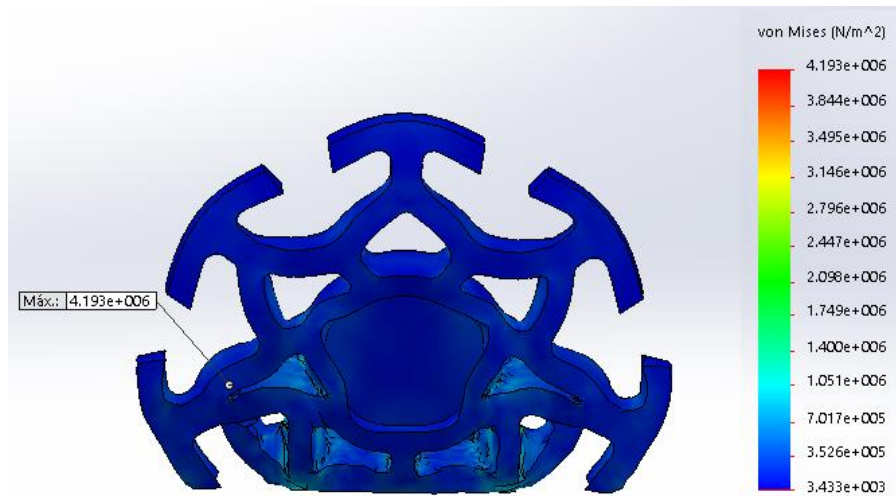


Figura 48. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 2

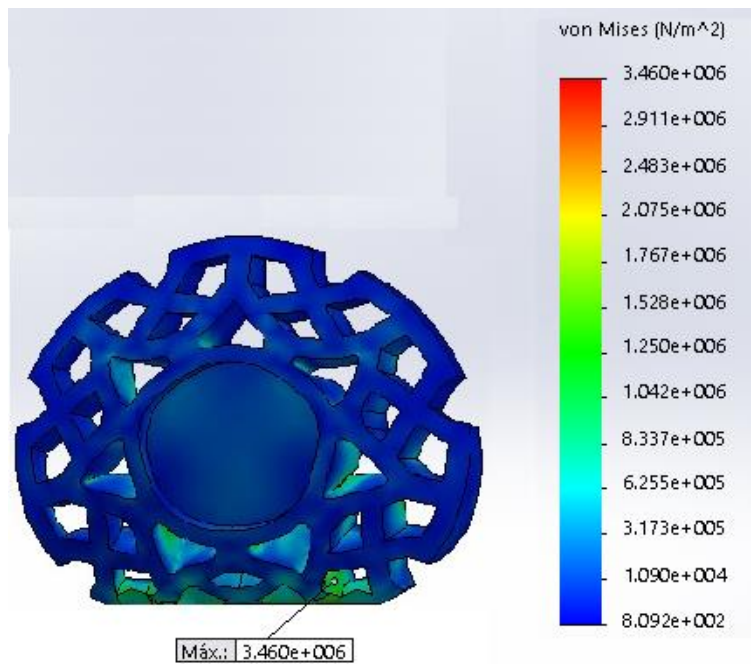


Figura 49. Resultado de esfuerzo Von Mises del impacto en el Modelo 3

Resultados: Como se muestra en la Figura 47, el modelo 1 presenta gran esfuerzo en el diente que toma primer contacto con el suelo y la deformación unitaria máxima fue de 4.4, el menor de los 3 modelos y el tiempo antes de comenzar el rebote

es el más pequeño ya que este modelo no es capaz de absorber mucho el impacto. El modelo 2 tiene la mayor deformación unitaria (ver Figura 48), pero es muy flexible y después de ser deformado, la reacción del impacto llega de inmediato al centro de la rodadura; el esfuerzo de Von Mises se concentra en la mitad del material sobresaliente en forma de T. El modelo 3 (ver Figura 49) se presentó el menor esfuerzo de Von Mises según la tabla 102, porque el esfuerzo se esparce hacia las conexiones extras y no se concentra gran parte en alguna zona o geometría del modelo.

Conclusión: Según los resultados en la simulación, el modelo 3 es el mejor diseño de los 3 modelos ya que por ser semi hueco y poseer conexiones hacia otras zonas del material, otorga una red o lazos de transmisión de esfuerzos desde el primer punto de impacto hacia los demás lazos.

La construcción de estas ruedas se lo realizará por medio de un molde fabricado en una impresora 3D (Figura 50). La preparación del caucho de silicona es un líquido espeso con un catalizador para que cure en algunas horas a temperatura ambiente, perfecta para la elaboración de objetos en moldes.

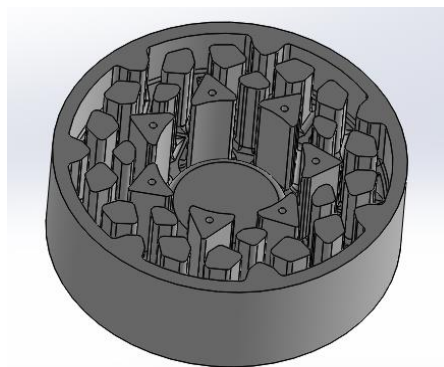


Figura 50. Molde de la rueda a fabricar

La unión entre el motor y la rueda se lo hará por medio de un elemento, llamado aro. En el diseño del aro (Figura 51), se ha tomado en cuenta el material de la rueda que es muy flexible y con esta forma del aro se tiene la ventaja de obtener mejor agarre en el interior de la rueda. Por la geometría compleja del aro se considera realizar su construcción en una impresora 3D a base del material ABS con un mínimo de 80% de relleno para que sea lo más sólido posible.

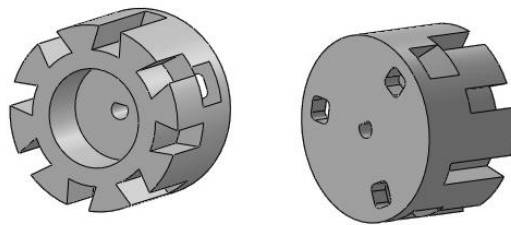


Figura 51. Aro

El diseño del aro debe ser tal para que pueda sujetarse y permita transmitir el torque del motor hacia el aro y del aro hacia la rodadura, sin que pueda desprenderse. En la figura 52 se muestra el diseño para la sujeción de rotación y de desprendimiento rotacional para que exista una fuerza de bloquea del caucho con el aro.

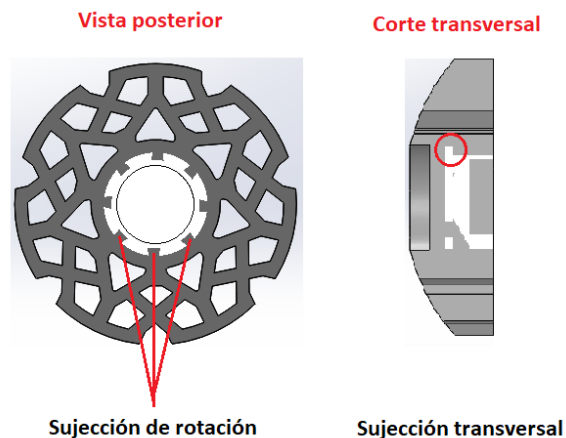


Figura 52. Sujeción del aro en la rodadura

Adicionalmente, el aro tiene 3 orificios que entrará el caucho de silicona durante el proceso de curado. Este método ofrece mayor transmisión de movimiento rotacional del aro a la rodadura ya que el caucho de silicona atraviesa el aro en 3 zonas (ver Figura 53) y se ata para que no se desacoplen lateralmente.

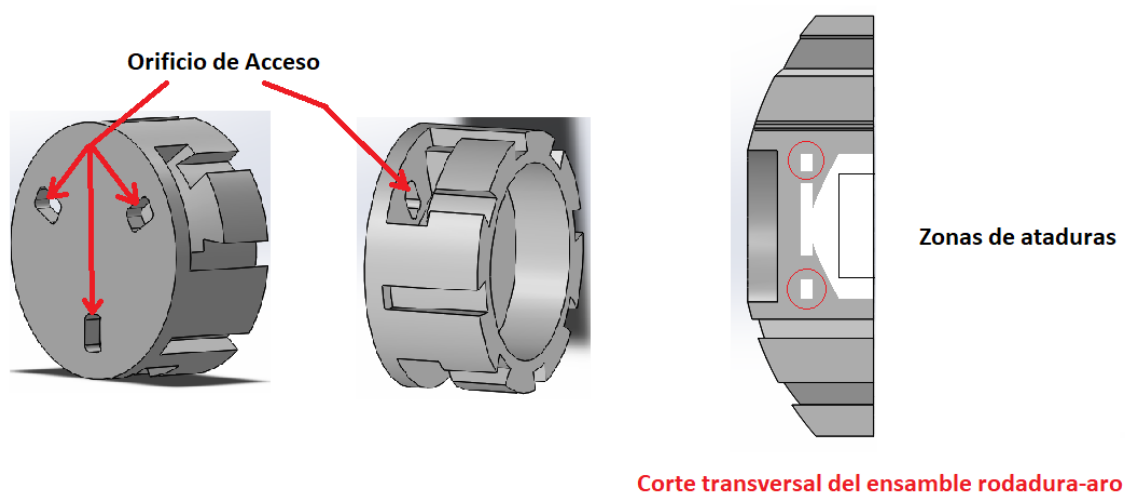


Figura 53. Método de enlazar entre el aro y la rodadura

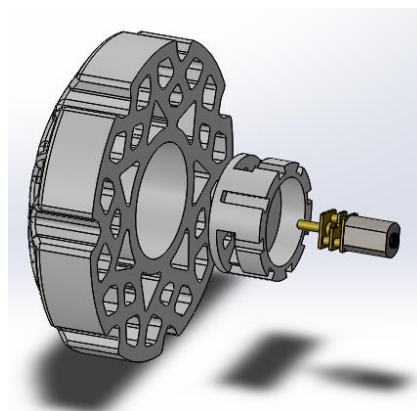


Figura 54. Modo de ensamblaje Rodadura-aro-motor

6.1.2.2 Armazón y chasis

Terminado las características de diseño del robot se dará las especificaciones que tendrá. Se mencionará rangos en las magnitudes en el diseño porque el tamaño y peso dependerá de los accesorios electrónicos, es por ello que al finalizar el diseño global de todos los módulos se procederá a asignar las magnitudes finales. En la tabla 103 se muestra los detalles de las especificaciones de diseño del robot móvil a desarrollar

Tabla 102




Especificaciones del robot a desarrollar

Diseño	Especificación	Magnitud
Ruedas	7-12	cm
Altura	7-12	cm
Ancho	11-17	cm
Largo	17 – 22 armazón	cm
	20 - 30 rueda a rueda	cm
Peso	0.9 – 1.8	kg
Autonomía mínima	30	minutos
Resistencia máxima a caídas	2	metros
Alcance mínimo	250 en exteriores	Metros
	50 interiores	Metros
velocidad máxima	0.5 -1.2	m/s

La alternativa de solución del material a construir el armazón del robot móvil a desarrollar fue el aluminio (ver Tabla 48), siendo un metal tan provechoso por sus propiedades como: ser maleable, fácil de trabajar, no es corrosivo por el ambiente ni al

agua, baja densidad que otros metales, no tóxico, impermeable y no inodoro. El chasis será construido a base de chapa de aluminio 1060 con 1mm de espesor puesto que es el espesor más delgado que se encuentra en el mercado local. Si el espesor no da suficiente resistencia después de analizar la simulación en un software CAE, se dispondrá a utilizar una chapa de 2 mm de espesor.

Tabla 103
Tipos de chasis en automóviles

Chasis	Descripción	Ejemplo de diseño
Chasis en escalera o bitubo	Construcción a base de 2 perfiles o vigas tubulares y ancladas por segmentos transversales o diagonales. Son eficientes sobre esfuerzos de torsión, fácil de construir y no posee mucha rigidez	
Chasis multi tubular	Es un conjunto de tubos que forman una estructura que dispuestos entre sí soportar varios tipos de esfuerzos. Su diseño se debe tomar en cuenta las juntas de los tubos.	
Chasis mono casco	Consiste en láminas finas formando una pieza en conjunto que atribuyen entre sí para la rigidez y flexibilidad	

Fuente: (Toro, 2009)

Se diseñará el chasis que es el componente encargado de sujetar a todos los implementos como actuadores y demás accesorios electrónicos (placas electrónicas,

cámara y batería). El chasis se diseñará a base de criterios aplicados en la industria automovilística, puesto que es una base de datos confiable y se puede aplicar al desarrollo del robot. No obstante, se analizará varios tipos de chasis en forma simplificada como se muestra en la tabla 104.

Se seleccionó un chasis mono casco porque la estructura estará compuesta por varios elementos o acoples ensamblados en él y a los elementos electrónicos (cámara, batería, motores, tarjetas PCBs, módulos) lo cual cada acople servirá a la vez de apoyo para que el chasis sea más rígido. (ver Figura 55). El chasis será desarrollado como el pliegue de una chapa de aluminio, un rectángulo doblado en sus 4 lados, denominado como placa base.

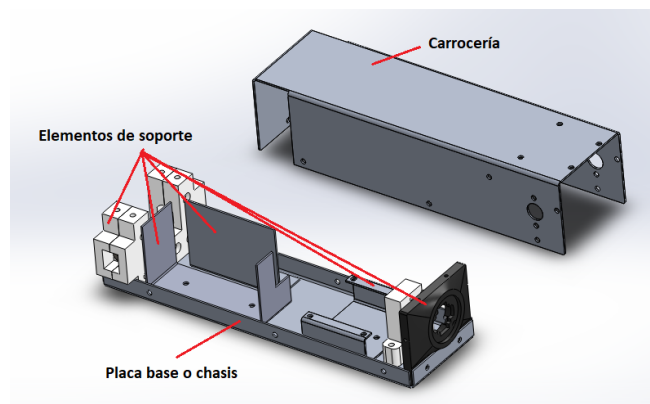


Figura 55. Conjunto de estructuras: casi, carrocería y elementos de soporte

Los elementos que sujetarán los actuadores en el chasis también serán implementados por chapa de aluminio 1060 y piezas realizadas en ABS, al mismo tiempo para ofrecer mayor rigidez en él (Figura 56).

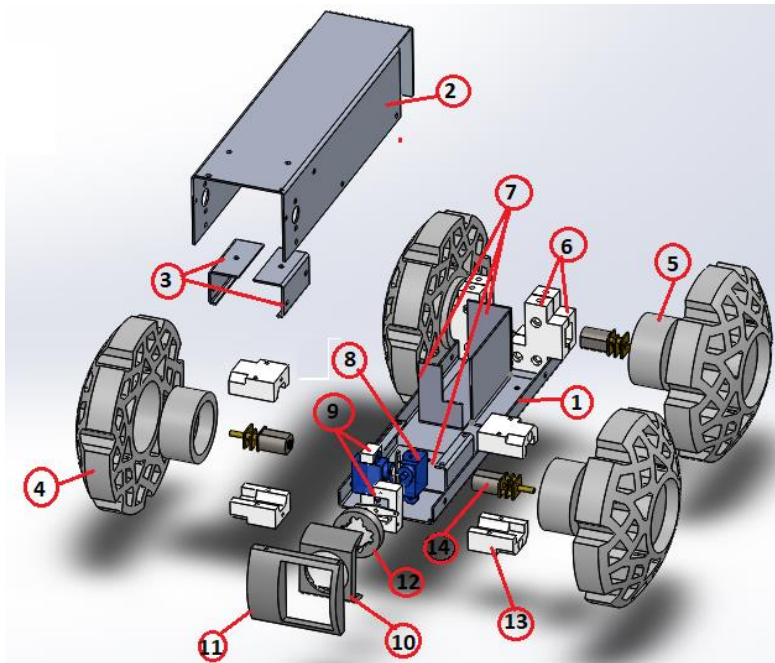


Figura 56. Elementos del robot móvil a construir

Tabla 104

Componentes del robot a construir

Número	Componente o elemento
1	Placa base
2	Carrocería
3	Placas de soporte para la carrocería
4	Rodadura
5	Aro
6	Soporte para motores traseros
7	Acople para placas pcbs
8	Servo motor
9	Acoples Servomotores
10	Acople giro cámara
11	Soporte delantero
12	Acople cámara
13	Sujeción motor delantero
14	Motoreductor

El chasis debe ser rígido al mismo tiempo debe soportar los esfuerzos sin sobrepasar el límite elástico del aluminio 1060 que es 90 [MPa]. Todos los implementos del chasis, conjuntamente, deben resistir los tipos de esfuerzos mecánicos que involucren en el impacto. Se utilizará un software CAE como herramienta de simulación para evaluar la resistencia del diseño si cumplirá en su aplicación destinada. Se simulará en la caída más crítica donde una rueda (específicamente la izquierda) debe soportar el impacto como se muestra en la figura 57.

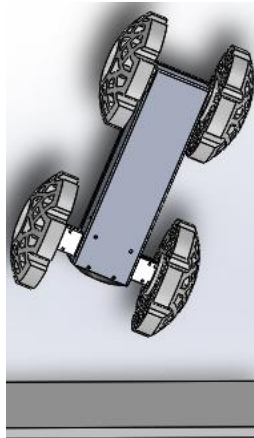


Figura 57. Forma de la caída más crítica del robot

Los parámetros de la caída es caída libre de 2 metros de altura desde la parte más baja del robot (o sea desde la rueda izquierda), colocar la dirección de la gravedad como se muestra en la figura 58, suelo rígido y con restricciones de contacto por penetración entre las placas de aluminio y las sujeciones de los elementos.

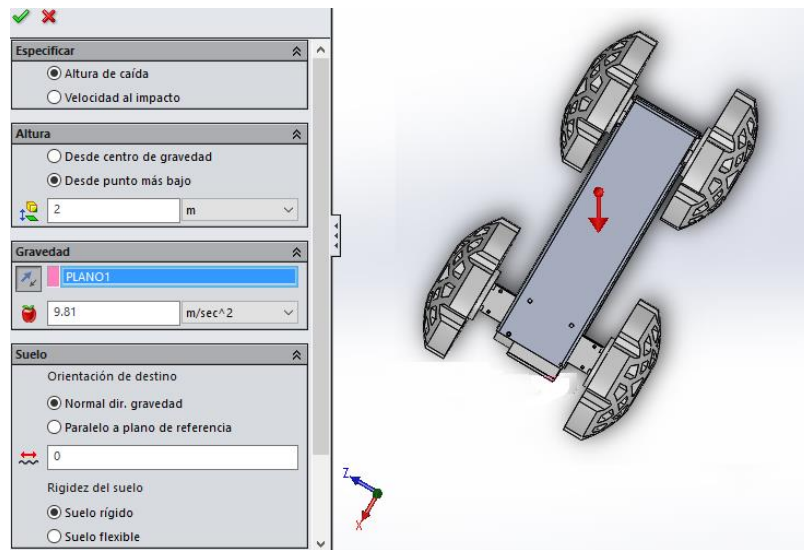


Figura 58. Parámetros de caída

Las opciones de resultados se muestran en la figura 59, como mínimo colocar un tiempo de solución después del impacto de 2500 micro segundos con el objetivo de obtener resultados después de que la rueda empiece a rebotar.

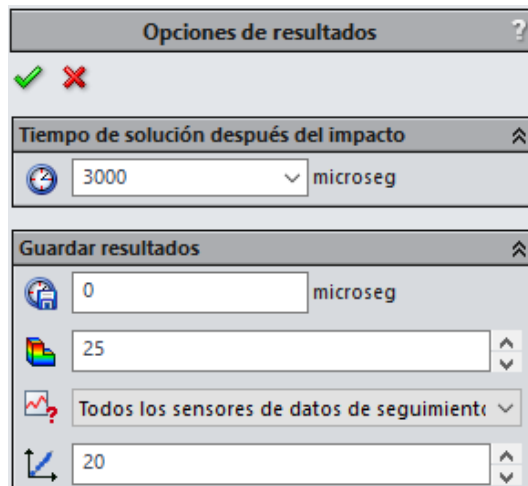


Figura 59. Opciones de resultados

En la figura 60 se muestra la simulación de caída finalizada, indicando el mayor de esfuerzo de von Mises que es de 56,93 [MPa] localizado en el chasis, atrás de la unión del soporte del motor izquierdo.

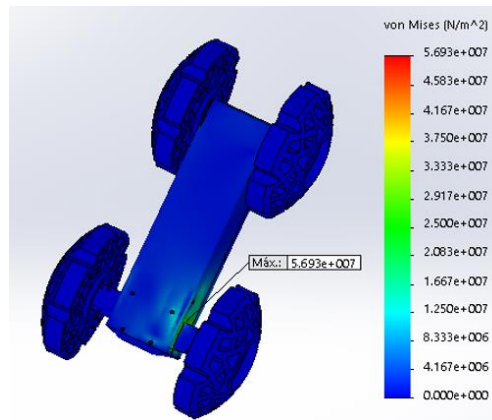


Figura 60. Simulación de caída finalizada

El límite de elasticidad del aluminio 1060 es de 90 [MPa], que está por encima del esfuerzo máximo de 56.93 [MPa]. Entonces este diseño es factible para una caída de 2 metros y utilizar un chasis con chapa de aluminio 1060 de 1 mm de espesor. En la figura 60 se muestran los esfuerzos más notables en la zona mayor afectada de la carrocería.

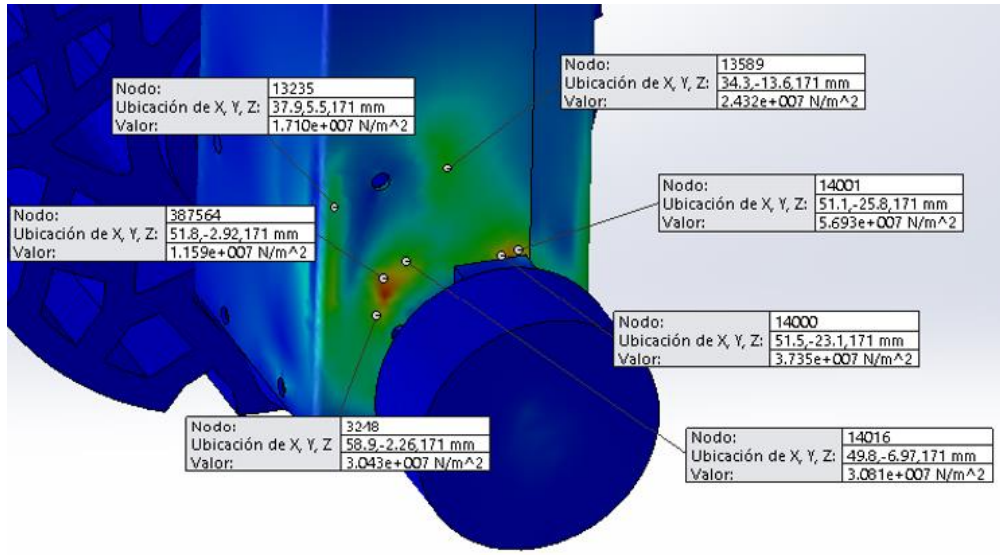


Figura 61. Esfuerzos en la carrocería

En la figura 62 se muestra el elemento refuerzo parte izquierda, con el objetivo de brindar apoyo al esfuerzo en esa zona, y se verifica que fortalece la zona de la unión entre la carrocería y la sujeción del motor izquierdo.

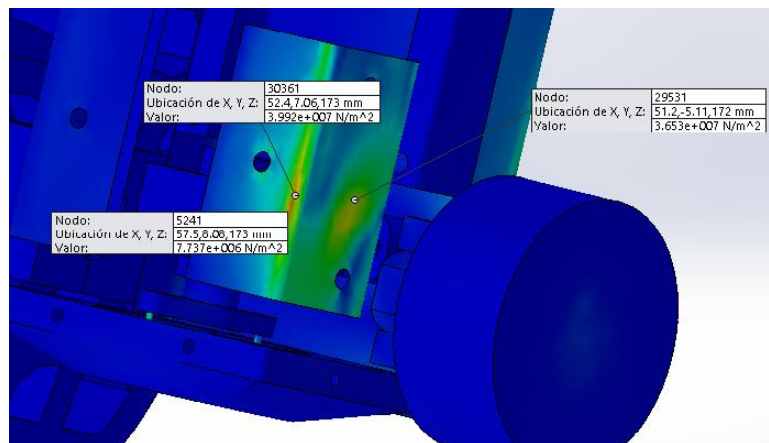


Figura 62. Esfuerzos en el refuerzo izquierdo

En la figura 63 se muestran el mayor desplazamiento y ocurre en la rodadura de la rueda ya que es la que absorbe la mayor parte del impacto, teniendo un desplazamiento resultante de 8.6 mm.

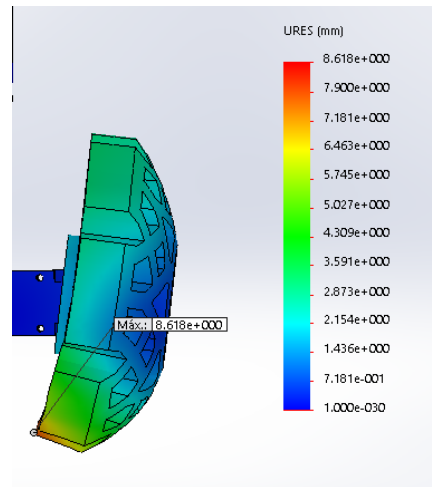


Figura 63. Vista superior e inferior (desmontada la carrocería)

Por último, se mide la resultante de desplazamiento en varios puntos cercanos en la zona donde se produce el mayor esfuerzo entre la unión de la carrocería y la sujeción del motor delantero izquierdo. El valor más alto es de 0.266 mm, ver figura 61.

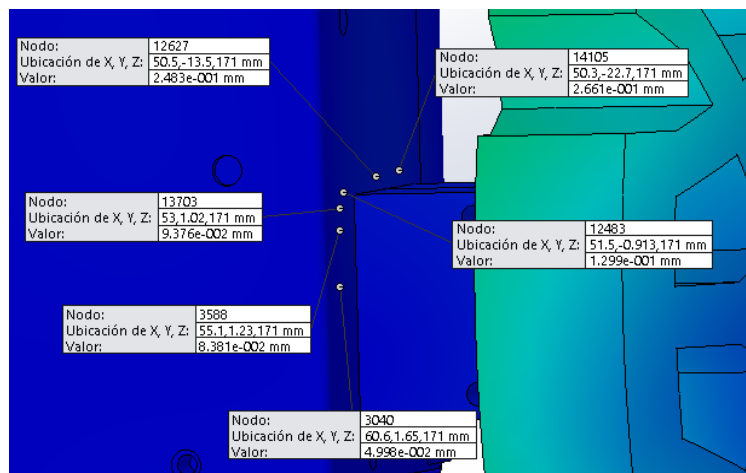


Figura 64. Resultante de desplazamiento en la zona con mayor esfuerzo de von mises

Posteriormente, se realiza una simulación a fatiga en base de la simulación de caída previamente estudiada. Con el resultado de los ciclos de vida se visualiza la zona donde falla el robot que es el lugar de color anaranjado mostrado en la Figura 65, soportando hasta 306 caídas.

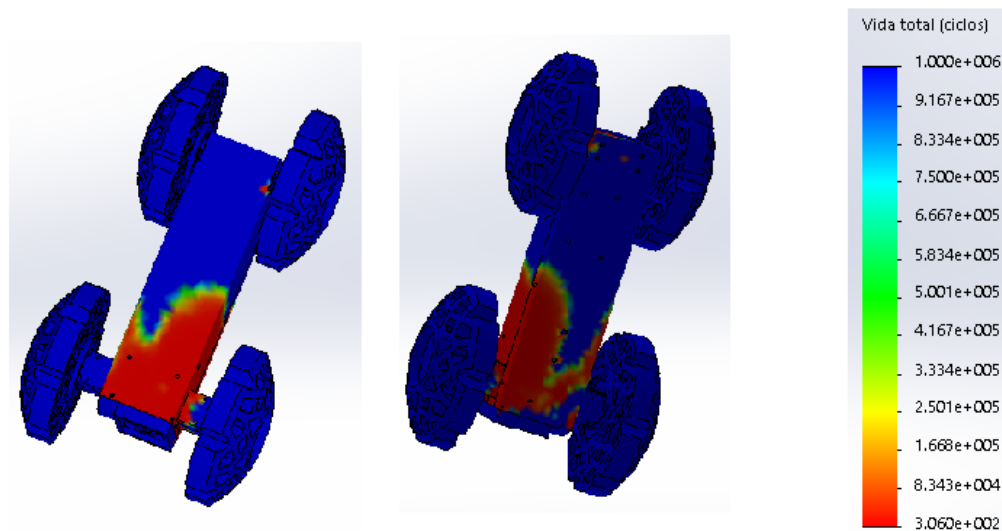


Figura 65. Resultado de la Simulación de Fatiga

3.6.3 Módulo 3. Accionamientos

3.6.3.1 Actuadores del sistema de desplazamiento

La alternativa de diseño seleccionada para el sistema de desplazamiento (Tabla 55) es utilizar motores con cajas reductoras como actuadores instaladas en las ruedas con el propósito de ofrecer la capacidad de desplazamiento al robot. Los motores tienen que ofrecer el torque indispensable para superar la inercia y la fuerza del propio peso del robot. Se procede a realizar un diagrama del cuerpo libre de una rueda sobre un plano inclinado a 60° con respecto al suelo (Figura 66) , mostrando las fuerzas involucradas.

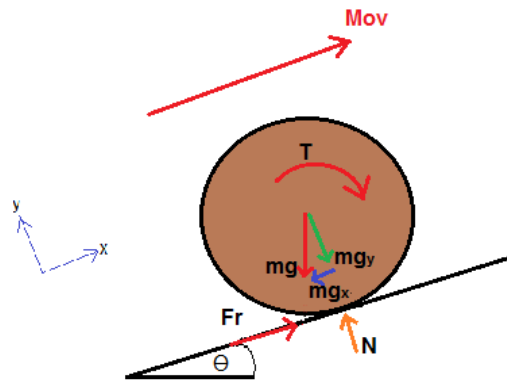


Figura 66. Diagrama de cuerpo libre de la rueda

Dónde:

Fr = Fuerza de fricción

α = aceleración angular

N = Fuerza normal

a = aceleración de traslación

mg = peso total del robot

I = momento de inercia

mg_x = Componente en x del mg

mg_y = Componente en y del mg

T = torque

r = Radio de la rueda

- Haciendo sumatoria de torque en el centro de masa de la rueda:

$$\sum \tau = I * \alpha \quad (3. 5)$$

- Sumatoria de fuerzas con respecto al eje x:

$$\sum F_x = m * a \quad (3. 6)$$

- Sumatoria de fuerzas con respecto al eje y:

$$\sum F_y = 0 \quad (3. 7)$$

Se reemplaza todos los torques que actúan en la rueda de la ecuación (3.6)

$$T - Fr * r = I * \alpha \quad (3. 8)$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad (3. 9)$$

Despejando la fuerza de rozamiento:

$$Fr = \frac{T - I * \frac{a}{r}}{r} \quad (3. 10)$$

Reemplazando las fuerzas en x de la ecuación (3.7)

$$Fr - mg_x = m * a \quad (3. 11)$$

Reemplazando la fuerza de fricción de la ecuación (3.11) en (3.12)

$$T - I * \frac{a}{r} - mg_x * r = m * a * r \quad (3. 12)$$

$$T = m * a * r + I * \frac{a}{r} + mg_x * r \quad (3. 13)$$

La conclusión de la ecuación (3.14) indica que el torque debe superar la fuerza de inercia del robot en traslación, la fuerza de inercia rotacional de las ruedas y el peso del robot con respecto a un plano inclinado para que pueda desplazarse.

La inercia de la rueda se lo considerará como un cilindro macizo:

$$I = \frac{1}{2} m_r * r^2 \quad (3. 14)$$

Dónde:

$$m_r = \text{masa de la rueda}$$

Reemplazando el momento de inercia en la ecuación (3.14) y se debe considerar la eficiencia del motor (e) y disponer de un factor de seguridad (Fs) en el diseño, quedará de la siguiente manera:

$$T = \frac{Fs}{e} \left(m * a * r + \frac{m_r * a * r}{2} + mg_{sen(\theta)} * r \right) \quad (3. 15)$$

Se considera un $F_s=1.3$, $e=0.9$, $a=0.1\text{m/s}^2$, $m_r=0.2\text{kg}$, la masa que debe soportar cada rueda es $m=0.45\text{ kg}$, $r = 0.055\text{ m}$, $\Theta=60^\circ$ y $g = 9.8\text{ m/s}^2$.

$$T = \frac{1.3}{0.9} \left(1.8\text{kg} \cdot 0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.055\text{m} + \frac{0.2\text{kg} \cdot 0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.055\text{m}}{2} + 0.45\text{kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{sen}(60^\circ) \cdot 0.055\text{m} \right) \quad (3. 16)$$

$$T = 0.318\text{ N} \cdot \text{m}$$

Convertido en $\text{kg} \cdot \text{cm}$

$$T = 3.25\text{ kg} \cdot \text{cm} \quad (3. 17)$$

Analizando la ecuación (3.16), la fuerza que tiene mayor impacto es el peso con respecto al plano inclinado, si fuera un plano inclinado de 90° , entonces las ruedas soportarían todo el peso; en ese caso se tendrá el siguiente torque:

$$T = 3.57\text{ kg} \cdot \text{cm}$$

En el diseño se basará del torque de la ecuación (3.16) $T = 3.25 \text{ kg.cm}$. Por lo tanto, se seleccionará un motor DC con torque cercano superior a 3.25 kg.cm . Se escogió un mini motoreductor de marca pololu (Figura 67) con torque de 3.6 kg.cm .



Figura 67. Motoreductor pololu

Tabla 105

Especificaciones de mini motoreductor pololu

Especificaciones	Valor
Voltaje de trabajo (V)	6
Corriente sin carga (A)	0.120
Corriente de paro (A)	1.6
Revoluciones (RPM)	140
Relación de engranes	210:1
Torque (Kg.cm)	3.6
Dimensiones (mm)	36 x 12 x 10
Peso (gr)	10
Material de engranes	Metal

La velocidad máxima tangencial por este motor y con radio de las ruedas de 5.5 cm , se tiene que:

$$V = \omega \cdot \frac{2\pi r}{60}$$

$$V = 140 \cdot \frac{2\pi \cdot 0.055}{60} = 0.806 \text{ m/s} \quad (3. 18)$$

3.6.3.2 Actuadores para el posicionamiento de la cámara

La alternativa de diseño seleccionada para el actuador del posicionamiento (Tabla 60) es utilizar un servo motor para el posicionamiento adecuado de la cámara cuando el robot se encuentre en sentido inverso. En la figura 60 se muestra el sentido de la cámara con respecto al suelo. Cuando el micrófono se encuentra en la posición inferior derecha con respecto a la cámara, figura 68 (a), la salida de video será la adecuada. Mientras tanto si el micrófono se encuentra en la posición superior izquierda con respecto a la cámara, figura 68 (b), la salida de video estará a 180° con respecto al suelo.

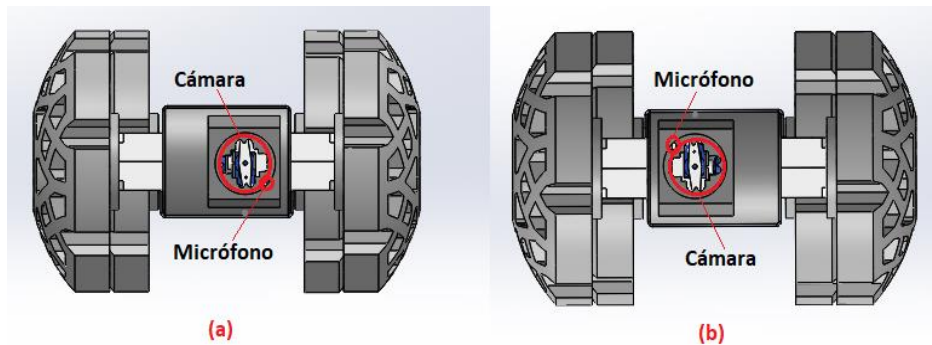


Figura 68. Sentidos de posición: (a) posición recta, (b) posición inversa

El servo motor estará acoplado al elemento sujeción cámara para que lo gire de 0 a 180° y viceversa. Por lo tanto, el servo motor facilitará que la cámara gire 180° cuando la salida de video esté inversa.

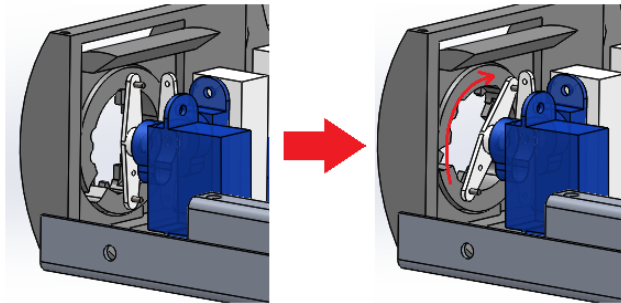


Figura 69. Rotación de cámara por medio del servo motor

Se calcula el torque que debe ejercer el servo motor para que gire el acople con juntamente con la cámara.

Sumatoria de torque con respecto al centro.

$$\sum \tau = I * \alpha \quad (3. 19)$$

La inercia se toma como un disco sólido con masa total de 0.02 kg, radio de 0.3m, una aceleración angular de 2 rad/s², factor de seguridad de 1.5 y eficiencia del motor de 0.9.

$$T = \frac{Fr}{e} * \left(\frac{1}{2} m_t * r^2 \right) * \alpha \quad (3. 20)$$

$$T = 0.003 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T = 0.03 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Se seleccionó el micro servo motor H301 (Figura 70) que satisface con un torque de 0.4 Kg.cm.



Figura 70. Micro servo H301

Las características del micro servo motor H301 se indica en la siguiente tabla:

Tabla 106

Especificaciones de H301

Especificaciones	Valor
Peso (gr)	3.7
Dimensiones (mm) (alto-largo-ancho)	20x9x25
Voltaje de trabajo (v)	3.7 - 6
Torque (kg.cm)	0.4
Velocidad (s/60°)	0.1
Material de los engranajes	Plástico
Ángulo de rotación (°)	180
Temperatura de trabajo (°C)	(-30) – (60)
Ancho de pulso (us)	500 - 2400
Corriente de trabajo (mA)	100
Corriente de reposo (mA)	1

Se implementará otro servo motor H301 para el giro hacia arriba y abajo de la cámara porque esta no tiene suficiente ángulo de visión.

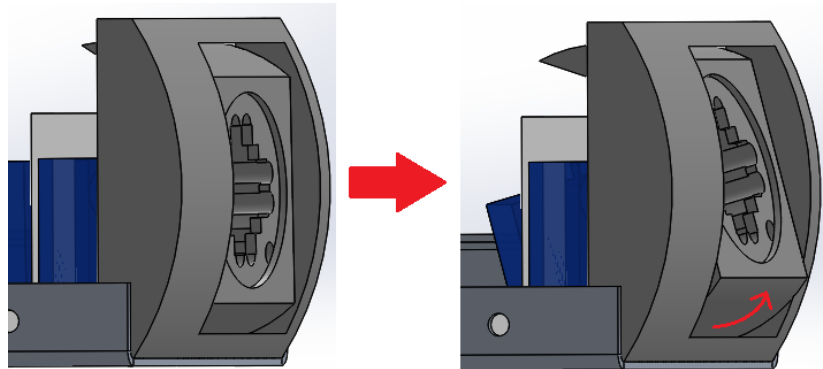


Figura 71. Giro de cámara

3.6.4 Módulo 4. Potencia

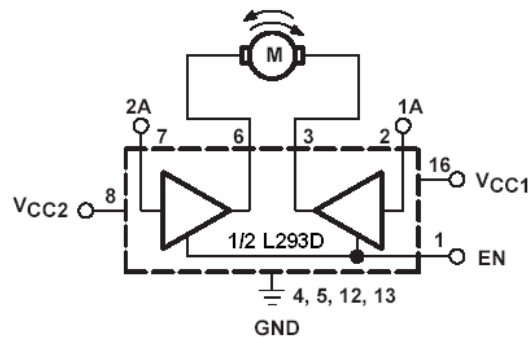
La alternativa de diseño seleccionada para el módulo de potencia (Tabla 65) es utilizar el puente H en C.I encargado de suministrar la potencia suficiente para el óptimo trabajo de los actuadores que son los. Además, facilita el control de estos motores en avance y sentido de giro. La elección se basa en los requerimientos de voltaje y corriente (tabla 108) de trabajo por parte de los motores DC

Tabla 107
Requerimientos eléctricos de los actuadores

Actuador	Requerimientos	
	Voltaje (v)	Corriente (A)
Motoreductor DC	6	0.12 - 1.6

Se utilizará el C.I L293D para el control de los motoredutores que suministra corrientes hasta los 600 [ma] con un rango de voltaje entre 4.5 a 36V. El voltaje del motoreductor pololu es de 6 [V] dentro del rango de trabajo del C.I L293D. Se recomienda no suministrar una corriente cercana a la corriente de paro de un motor porque se reduce la vida útil o se puede dañar su bobinado, por lo tanto una corriente de 600 [ma] queda por debajo de la corriente de paro y por encima de la corriente mínima de trabajo para que el motoreductor funcione correctamente.

El C.I además tiene incorporado internamente los diodos para proteger el circuito de las contracorrientes producido por las cargas inductivas del motor, se evita utilizar diodos externos y se puede conectar directamente los motores al integrado como se observa en la figura 72.



EN	1A	2A	FUNCIÓN
H	L	H	Giro a la derecha
H	H	L	Giro a la izquierda
H	L	L	Detención rápida
H	H	H	Detención rápida
L	X	X	Detención rápida

L = bajo, H = alto, X = no afecta

Figura 72. Conexión de un motor al C.I L293D

Fuente: (Carletti, 2017)

3.6.5 Módulo 5. Teleoperación

El presente módulo se ha dividido en 2 sistemas por separado porque en sistemas teleoperados en tiempo real se recomienda utilizar una banda de transmisión única tanto para el mando de control como el sistema de visión; de esta manera se evita interferencia por parte del control de mando hacia el sistema de visión y viceversa, además de disminuir o contrarrestar retardos de transmisión.

3.6.5.1 Diseño del sistema de visión

La alternativa de diseño seleccionada en el sistema de visión (Tabla 70) es la solución de implementar un sistema FPV. El sistema FPV es conocido como visualización en primera persona que corresponde la visualización en perspectiva de un dispositivo móvil. Sus primeras implementaciones fueron en drones y en la actualidad se lo emplea en varios aparatos móviles.

Un sistema FPV es fiable cuando se trata de teleoperación en tiempo real porque trabaja a altas frecuencias (1 Ghz – 5.9 Ghz) y con un amplio ancho de banda para transmisión rápida de datos. Se compone de 4 elementos: cámara, transmisor, receptor y pantalla o gafas (Figura 73).

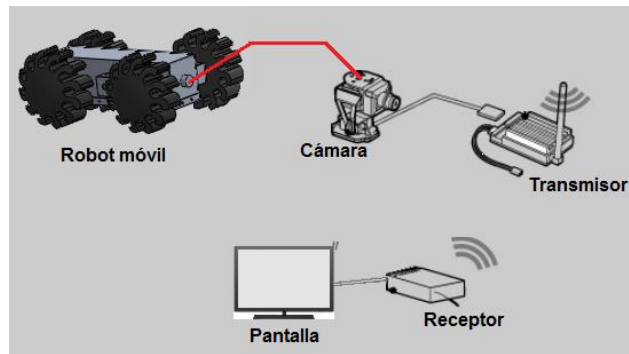


Figura 73. Elementos básicos de un sistema FPV

Transmisor

Las condiciones del transmisor a seleccionar deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Alcance mínimo línea de vista de 250 m
- Ser lo más compacto posible
- Transmitir audio y video
- Formato de video NTSC y alta definición
- Alta tasa de transmisión

Por lo tanto se ha escogido el mini transmisor de Audio/Video Eachine TX526 que cumple todos los requerimientos propuestos para la calidad de transmisión en tiempo real.



Figura 74. Transmisor audio/video Eachine TX526

Tabla 108

Especificaciones Tx TS5828

Especificaciones	Valor
Formato de video	NTSC / PAL
Modulación	FM
Rango de frecuencia de trabajo (Mhz)	5645 - 5945
Potencia de salida (dBm)	27
Alcance (m)	200 - 1000
Voltaje de operación (V)	7 - 24
Corriente de operación (ma)	280
Temperatura de operación (°C)	(-10) – (+85)
Ancho de banda de video (Mhz)	8.0
Frecuencia portadora de audio (Mhz)	6.5
Voltaje de entrada de video (Vp)	0.8 – 1.2
Voltaje de entrada de audio (Vp)	0.5 - 2
Tipo de antena	RPSMA
Dimensiones (LxWxH)	40 x 23 x 8 mm

El mini transmisor TX526 opera con disponibilidad a elegir 24 canales (Figura 74) que comprenden entre las frecuencias de 5645 – 5945 [Mhz] y todos operan en un mismo ancho de banda. Por lo tanto, se escogerá la frecuencia menor que es de 5645 [Mhz] entre menos es la frecuencia, la transmisión es menos susceptible a interferencias de condiciones externas como clima y obstáculos.

Tabla 109

Asignación de frecuencia del TS5828

FR	CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
A		5865	5845	5825	5805	5785	5765	5745	5725
B		5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866
C		5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945
D		5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880

Receptor

El receptor debe ser compatible con la frecuencia del canal, tipo de formato de video y audio. Se escogió el mini receptor Eachine ER32 (Figura 75) por ser de la misma marca del transmisor TX526 que garantiza la compatibilidad del transmisor y cumple con los requerimientos de transmisión/recepción.



Figura 75. Mini receptor ER32

Para escoger la frecuencia o canal se muestra en la siguiente tabla 111, todos los canales del receptor ER32 son compatibles con todos los canales del transmisor TX526.

Tabla 110*Asignación de frecuencias en canales de ER32*

CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
FR								
A	5865	5845	5825	5805	5785	5765	5745	5725
B	5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866
C	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945
D	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880

Tabla 111*Especificaciones del receptor ER32*

Especificaciones	Valor
Frecuencia de recepción (Mhz)	5645 – 5945
Voltaje de alimentación (V)	7 – 23
Sensibilidad (dB)	- 95
Peso (gr)	15
Voltaje de salida (V)	5
Formato de video	NTSC / PAL
Temperatura de operación (°C)	(-20) – (+70)
Consumo de potencia (a 12 V) (mw)	960
Conector de la antena	RP-SMA

Cámara

La cámara debe tener incorporado un micrófono y con señal de salida de datos compatible con el transmisor TX526. Por consiguiente, se escogió la mini cámara (Figura 76) de alta definición, tecnología CMOS y con formato de video de salida NTSC compatible con el módulo transmisor TX526 y receptor ER32. Además tiene la opción de visión nocturna cuando existe poca iluminación en el ambiente



Figura 76. Mini Cámara con micrófono y visión nocturna

Tabla 112

Especificaciones mini cámara

Especificaciones	Valor
Formato de video	NTSC
Resolución (pixeles)	1280 x 960
Iluminación mínima (Lux)	0.5
Impedancia de salida (ohm)	75
Voltaje de salida de video (Vp)	1
Voltaje de alimentación (V)	5
Corriente de consumo (ma)	70
Grado angular de lente (°)	170
Sensor de imagen	1/4 CMOS
Frecuencia de escaneo (Hz)	Horizontal: 15734.3 Vertical: 60

Pantalla

La pantalla debe cubrir los requerimientos del formato de video NTSC, la definición de video 800x480 pixeles y la frecuencia de refresco. Se seleccionó una pantalla TFT LCD (Figura 77) pequeña compatible con las características de video. Las especificaciones se detallan en la tabla 113.



Figura 77. Pantalla TFT LCD

Tabla 113

Especificaciones de la pantalla TFT LCD

Especificaciones	Valor
Tamaño pantalla (pulg)	5
Definición (píxeles)	800 x 480
Voltaje de trabajo (V)	12
Formato de video	NTSC / PAL
Consumo de potencia nominal (w)	12

3.6.5.2 Diseño de la teleoperación de mando

Esta sección se encarga únicamente de encontrar módulos de transmisión/recepción inalámbrica para la teleoperación de mando. La transmisión de datos es de baja cantidad de información y no se requiere necesariamente una frecuencia alta de trabajo. El parámetro de diseño se enfoca en el alcance mínimo de transmisión que es de 250 metros de línea de vista. Se escogió el transceiver NRF24L01 por su bajo costo y consumo, largo alcance.



Figura 78. Transceiver RNF 24L01

El modelo de este transceiver o transceptor NRF24L01 tiene incorporado amplificadores de potencia al transmisor y preamplificador en la entrada del receptor con la finalidad de obtener mayor alcance de hasta 1 km. Este módulo tiene la capacidad de enviar y de recibir datos ya que son transceptores, se puede utilizar como comunicación simplex o half dúplex. Para este proyecto se usará 2 transceivers NRF24L01 con comunicación simplex, de envío de datos unidireccional, lo que significa que transceptor de mando será quien transmita y el transceptor de la estación robot será quien reciba.

Tabla 114.

Especificaciones del Transceiver NRF24L01

Especificaciones	Valor
Voltaje de alimentación (V)	1.9 – 3.6
Consumo (ma)	115
Frecuencia de trabajo (Ghz)	2.4
Dimensiones (mm)	15.5 x 40.7 x 12.2
Potencia de salida (dBm)	0, -6, -12 o -18
Alcance máximo (m)	1000
Máx velocidad envío de datos (Mbps)	2

3.6.6 Módulo 6. Control

La alternativa de diseño seleccionada para el módulo de control (Tabla 80) es utilizar Arduino, una plataforma de Hardware libre. La placa Arduino es una herramienta muy flexible en el entorno de programación y de interfaz a otros dispositivos o elementos electrónicos; siendo un instrumento fácil de manejar para usuarios expertos o inexpertos en conocimientos de electrónica. El Arduino estará encargado de interpretar las mediciones de salida de los elementos de mando como los botones y joystick; y corresponder una señal de salida para manejar los motoredutores y servo motor. La tabla 116 indica las especificaciones que debe cumplir la placa Arduino.

Tabla 115

Especificaciones de las estaciones

Estación	Especificaciones	Requerimiento
Robot	Pines para NRF24L01	5
	Número de salidas digitales	5
	Número de salida PWM	2
Mando	Pines para NRF24L01	5
	Número de entradas digitales	3
	I/O analógicas	2

De acuerdo a las especificaciones de número de I/O digitales y analógicas y comunicación con los transceivers NRF24L01 se decidió utilizar la placa de Arduino mini (Figura 79), uno para cada estación, que satisface a los requerimientos propuestos en la tabla 115.



Figura 79. Arduino mini

Las especificaciones técnicas del Arduino mini se muestran en la tabla 117

Tabla 116

Especificaciones técnicas del arduino mini

Especificaciones	Magnitud
Voltaje de operación (V)	5
Pines I/O digitales	14 (de los cuales, 6 provee salida PWM)
Pines analógicos	8
Corriente de los pines I/O (mA)	40
Memoria (kb)	32
Velocidad del oscilador (MHz)	16
Medidas (mm)	30 x 18
Máxima corriente 5V (mA)	150

Control de actuadores

La alternativa seleccionada para el tipo de control (Tabla 85) aplicada en el sistema teleoperado es utilizar control ON/OFF respaldado por la supervisión y destreza humana. La controlabilidad del sistema de mando depende del instrumento de entrada. Por ello, el elemento de entrada que se encargará de emitir la información para el control de los motoreductores será un joystick analógico de 2 ejes con pulsador (Figura 80).



Figura 80. Joystick analógico de 2 ejes

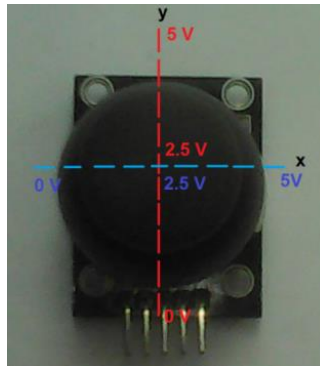


Figura 81. Voltaje correspondiente a la posición del joystick

El control de los motoredutores se hará con PWM, estableciendo 4 velocidades conforme a la controlabilidad del joystick como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 117

Controlabilidad de la velocidad de motoredutores vs rango de voltaje

Rango de voltaje (V)	Velocidad (m/s)
2.51 – 3.125	0.1
3.126 – 3.75	0.3
3.751 – 4.375	0.7
4.376 – 5	1
2.49 – 1.875	- 0.1
1.874 – 1.25	- 0.3
1.24 – 0.62	- 0.7
0.61 – 0	- 1

3.6.7. Módulo 7. Energía

El módulo de energía se encarga del suministro energético para los dispositivos electrónicos tanto en la estación local como en la estación del robot. La alternativa de solución seleccionada para la energía es emplear baterías como el abastecimiento. Para el dimensionamiento de la batería se tendrá en cuenta el consumo eléctrico de los elementos de cada estación.

Tabla 118

Requerimientos energéticos de elementos eléctricos de cada estación

Estación	Cantidad	Elemento	Corriente(A)	Voltaje(V)	Potencia (w)
Mando	1	Pantalla TFT	1	12	12
	1	ER32	0.08	7-23	0.72
	1	Arduino mini	0.15	5	0.75
	1	Amplificador de audio	0.2	8	1.6
	1	NRF24L01	0.115	1.9 - 3.6	0.38
			Corriente máx.	1.545	Potencia máx.
Robot	4	Motoreductor	2.4	6	14.4
	1	Arduino mini	0.15	5	0.75
	1	NRF24L01	0.115	1.9 – 3.6	0.38
	1	Cámara	0.07	5	0.35
	2	H301	0.2	5	1
	1	Tx526	0.28	7-24	2
			Corriente máx.	3.215	Potencia máx.

Batería de la estación robot

La potencia máxima de la estación robot es de 18.88 [w] para el consumo de 1 hora será 18.88 [WH] y multiplicado por un factor de seguridad de 1.2 se tiene que es de 22.65 [WH]; el consumo de mayor voltaje que se requiere es de 7-12 [V] por parte del TX526. La batería a seleccionar es la batería recargable LiPo Ar.Drone 2.0 (Figura 82) porque este tipo de baterías tienen la capacidad de almacenar mucha más energía en un volumen reducido que otras clases de baterías. Las magnitudes de la batería Ar.Drone son de 11.1 [V] con 2000 [mAh] con potencia máxima 22.2 [WH] y velocidad de descarga de 20C (máximo 40 A de suministro).



Figura 82. Batería AR.Drone 2.0

Se va a requerir reguladores de voltajes para suministrar 3.3, 5 y 6 [V]; el transceptor TX526 se conectará directamente a la batería. Por lo tanto, se ha escogido los siguientes reguladores de voltaje mostrados en la tabla 120.

Tabla 119
Reguladores de voltaje

Regulador	Corriente máx. del regulador (A)	Elementos a abastecer	Corriente total de elementos (A)
LM317T	1.5	Arduino mini L293D S0020 Cámara	0.8
LM1117T-3.3	1	NRF24L01	0.115
LM350	3	Potencia motoreductores	2.4

La autonomía del robot depende del consumo de corriente requerida por todos los componentes y la capacidad de descarga de la batería:

$$Tiempo = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{Velocidad de descarga}} \quad (3. 21)$$

$$Tiempo = \frac{22.2 \text{ wh}}{22.65 \text{ w}} = 58 \text{ min} \quad (3. 22)$$

El robot tiene una autonomía mínima de 37 minutos en las condiciones máximas de consumo por parte de los elementos electrónicos.

Batería de la estación Local

La potencia máxima de la estación local es de 15.45 [W] para el consumo de 1 hora será 15.45 [WH] y multiplicado por un factor de seguridad de 1.2 es 18.54 [WH]. Se escogió una batería de litio recargable DC 12680 (Figura 83) con capacidad de 6800 [mAH] y 12 [V].



Figura 83. Batería DC - 12680 [V]

Se requiere fuentes de 5 y 9 [V] para las demás etapas, por lo tanto, se ha escogido los reguladores que se muestra en la tabla 121.

Tabla 120

Reguladores para los elementos electrónicos

Regulador	Corriente máx. del regulador (A)	Elementos a abastecer	Corriente total de elementos (A)
LM7805	1	Arduino mini	150
LM1117T-3.3	1	NRF24L01	0.115
LM7809	1	Amplificador de audio Receptor ER32	0.28

$$Tiempo = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{Velocidad de descarga}} \quad (3. 23)$$

$$Tiempo = \frac{81.6 \text{ wh}}{18.54 \text{ w}} = 4.4 \text{ horas} \quad (3. 24)$$

3.7 Definición del concepto final

Al finalizar la selección del concepto de cada módulo, se procede a realizar el diseño de los circuitos electrónicos de las conexiones de todos los elementos electrónicos utilizando el software de Proteus Professional Versión 8.1.

3.7.1 Circuito electrónico de la Estación Robot

En la estación robot, se ideó en construir 3 circuitos electrónicos por separado con la finalidad de distribuir, eficientemente, las placas PCBs en el espacio dentro de la estructura mecánica del robot.

Circuito de alimentación al robot

Se realizará una etapa destinada al suministro de energía para todos los elementos como el arduino mini, cámara, transmisor TS5828, C.I L293D y el NRF24L01, mostrado en la figura 84, además se destina la conexión entre el transmisor TX526 y la cámara.

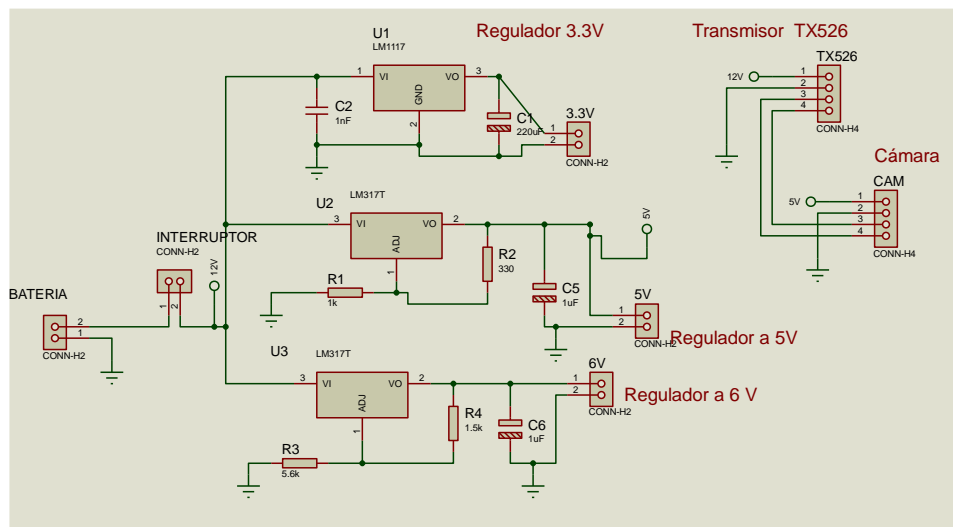


Figura 84. Circuito de Alimentación al robot

Tabla 121

Funciones del Circuito de alimentación al robot

Elementos	Funciones
Bornera batería	Conexión para la batería
Bornera 5V	Salida de 5 [V]
Bornera 6V	Salida de 6 [V]
Bornera TRA	Entrada para el transmisor TS5828
Bornera CAM	Entrada para la cámara
Bornera 3.3V	Salida de 3.3V

Circuito del Controlador robot

En la etapa de control de motores se realiza las conexiones correspondientes como se muestra en la figura 85 y figura 86. La figura 85 corresponde al circuito del controlador arduino mini conectado al Transceiver NRF24L01 para recibir las señales del control de mando y las señales de salida son para controlar los motores por medio de borneras.

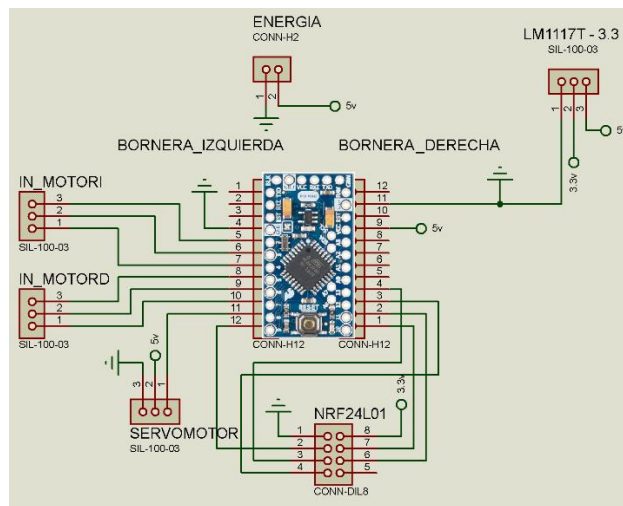


Figura 85. Circuito controlador - robot

Tabla 122

Funciones del circuito controlador

Elementos	Funciones
Arduino mini	Controlador encargado de procesar información y enviar las señales pre programadas para la función destinada
Energía	Entrada de voltaje de 5 [V]
IN_MOTORI	Salida digital hacia el C.I L293D al motor izquierdo
IN_MOTORD	Salida digital hacia el C.I L293D al motor derecho
SERVOMOTOR	Salida para controlar el servo de giro de cámara
NRF24L01	Bornera para colocar el transceiver NRF24L01

Circuito Potencia motores

En la figura 86 se muestra la etapa de potencia conformada por los C.I L293D para brindar los requerimientos de energía hacia los motores. En la tabla 124. se muestran las entradas y salidas por medio de borneras para su conexión.

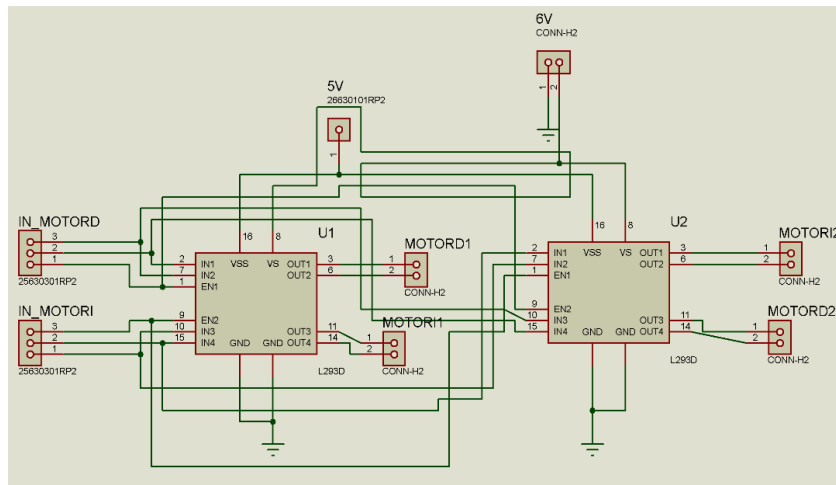


Figura 86. Circuito potencia a motores

Tabla 123

Funciones del circuito potencia a motores

Elementos	Funciones
5 [V] y 6 [V]	Entradas de voltaje de 5 y 6 [V]
U1 y U2	C.I L293D para brindar potencia a los motor reductores
IN_MOTORD	Entrada digital para el control de motores derechos
IN_MOTORI	Entrada digital para el control de motores izquierdos
MOTORD1 MOTORD2	Salida eléctrica para mover a los motores derechos
MOTORI1 MOTORI2	Salida eléctrica para mover a los motores izquierdos

3.7.1 Circuito electrónico de la Estación de mando o local

En la estación de mando o local se hará dos placas PBCs: una para a transmisión de datos del arduino y el otro la recepción de audio/video y amplificación de audio. Con el objetivo de minimizar interferencia del transmisor al amplificador de audio porque es muy sensible.

La figura 87 es el circuito de la etapa de recepción de audio/video y se realiza un amplificador variable de audio puesto que la señal es baja y no regulable desde el receptor; con salida de Jack hembra.

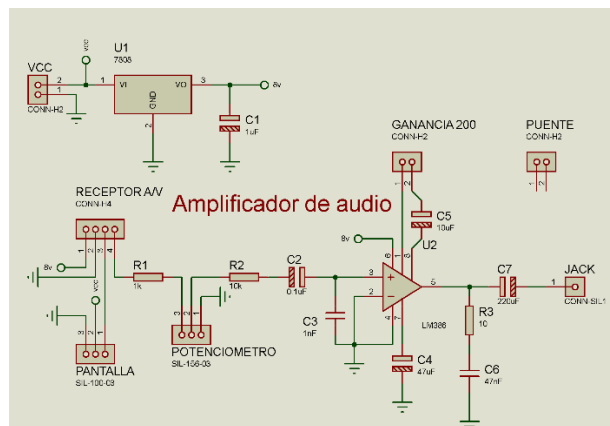


Figura 87. Circuito recepción de audio/video y salida amplificada de audio

Tabla 124

Funciones del Circuito recepción de A/V

Elementos	Funciones
Receptor A/V	Entrada para el receptor ER32
Pantalla	Salida para la conexión de la pantalla TFT
Amplificador de audio	Amplificar reguladamente la salida de audio del ER32
Jack	Salida para audífonos
Ganacia 200	Función extra y opcional para mayor ganancia de audio

En la figura 88 se muestra el circuito transmisor, comprendido por el joystick, transceptor NRF24L01, arduino nano, reguladores de voltaje y botones; para que el operario mande las señales de mando hacia el robot.

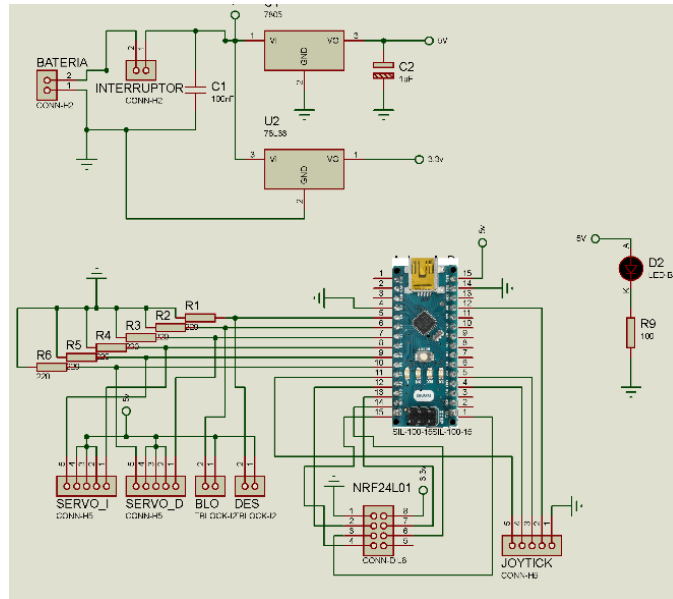


Figura 88. Circuito de mando

Tabla 125

Funciones del circuito de mando

Elementos	Funciones
Arduino Nano	Microcontrolador encargado de leer las salidas de los botones y del joystick para luego enviar señal al transmisor de datos.
BLO	Botón para señal de giro horario del servomotor
DES	Botón para señal de giro anti horario del servomotor
JOYSTICK	Joystick para manejar los motores
NRF24L01	Salida para el transceiver NRF24L01

Diseño de placa PCB

El ancho correcto de las pistas en la placa PCB asegura la vida útil del circuito impreso y de los elementos o componentes electrónicos. Para el cálculo del ancho de pista es muy complicado porque hay muchos parámetros que intervienen en él. De manera que existen estándares basados en ensayos para obtener datos empíricos aproximados y representados en gráficos, con el objetivo de simplificar el cálculo. Por lo tanto, se ha considerado la norma IPC2221 para el cálculo del ancho de pista para cada etapa de diseño. El cálculo consiste en fijar la corriente y la temperatura de trabajo mostrada en la gráfica de la figura 89 y seleccionar la sección transversal correspondiente. Posteriormente, se escoge el ancho de pista a partir de la sección anteriormente seleccionada y con el espesor de cobre de la placa a utilizar como se muestra en la figura 90.

La placa que se usará tiene un espesor de cobre de 1 oz/ft², los parámetros de corriente para la placa de la estación robot es de 4 [A] y de la estación de mando es 1.5 [A] trabajando a una temperatura de 20 °C, por lo tanto se tiene que el ancho de pista de la placa PCB de la estación robot debe ser mínimo 1.6 [mm] y la de estación de mando mínimo 0.4 [mm].

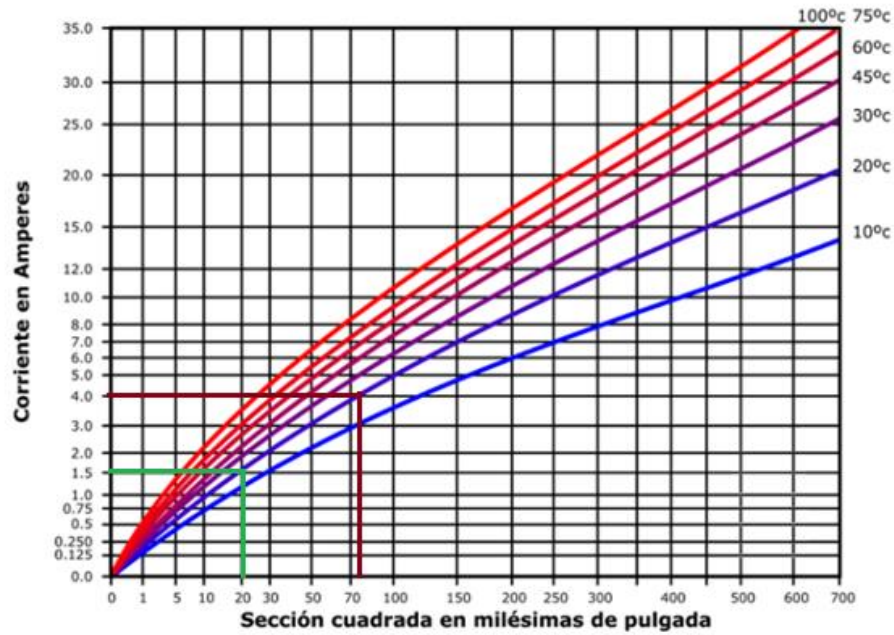


Figura 89. Corriente vs Sección transversal
Fuente: (Gamboa, 2011)

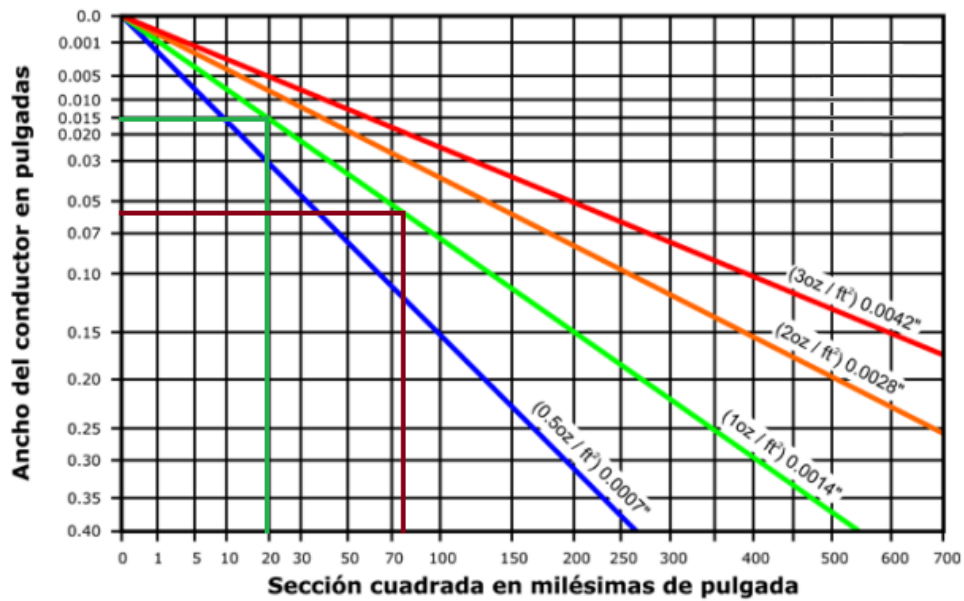


Figura 90. Ancho del conductor vs Sección transversal
Fuente: (Gamboa, 2011)

Por lo tanto, de acuerdo a los circuitos a desarrollar, se obtendrán el diseño de las placas PCB en Proteus 8 Professional Version 8.1 que se pueden visualizar en Anexos. Posteriormente se adquiere la presentación en 3D de todas las placas electrónicas como se muestran desde la figura 91 a la figura 95.

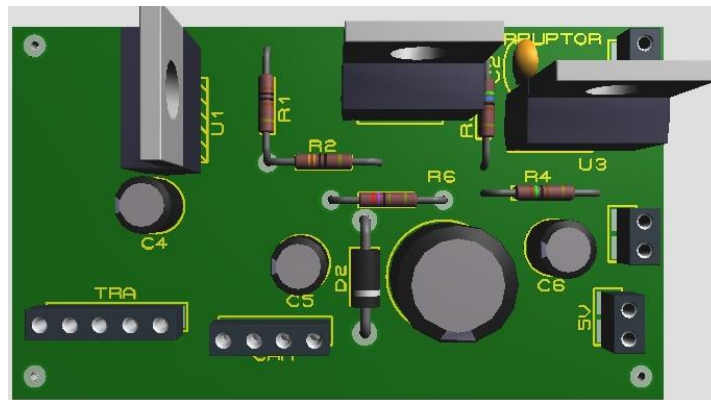


Figura 91. Placa PCB en 3D del Circuito de alimentación robot

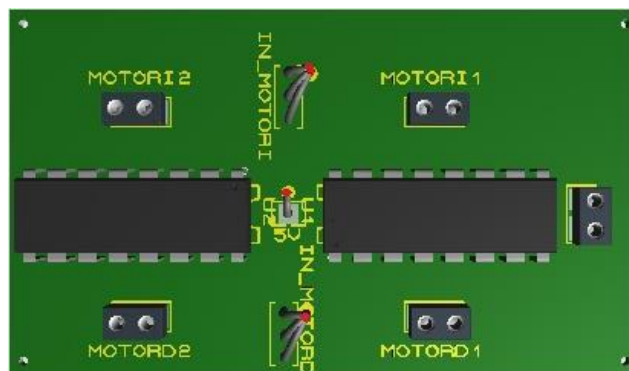


Figura 92. Placa PCB en 3D del Circuito de potencia a motores

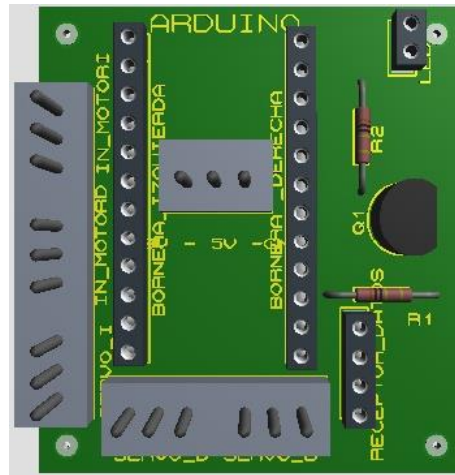


Figura 93. Placa PCB en 3D del Circuito Controlador



Figura 94. Placa PCB en 3D del Receptor A/V

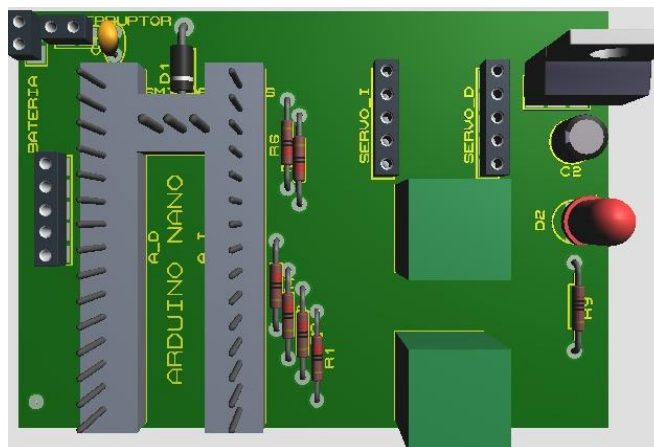


Figura 95. Placa electrónica en 3D del Circuito de mando

3.8 Implementación del Sistema

La implementación conlleva de 3 partes importantes que establecen la construcción final del prototipo, de las cuales son: implementación electrónica, implementación mecánica y ensamblaje; se explicará a continuación y se detallará los métodos y procedimientos para el buen funcionamiento del sistema.

3.8.1 Implementación electrónica

La implementación electrónica consiste en la realización de las placas PCB y montaje de elementos (cámara, emisor y receptor de A/V). Primero se realiza una limpieza antes de imprimir el circuito a la placa, se usó cloruro férrico para el ataque químico hacia el cobre. Para los orificios que deben ser introducidos los pines o patas de los elementos electrónicos y cables, se utilizaron brocas de 0.75mm y 1 mm de diámetro. Se dispone a soldar los elementos a la placa por medio del caudín y estaño.

Para la protección de oxidación al cobre fue necesario aplicar una capa de resina y barniz. Desde la figura 96 a la figura 100 se muestran las placas PCB terminadas y con todos los elementos conectados.

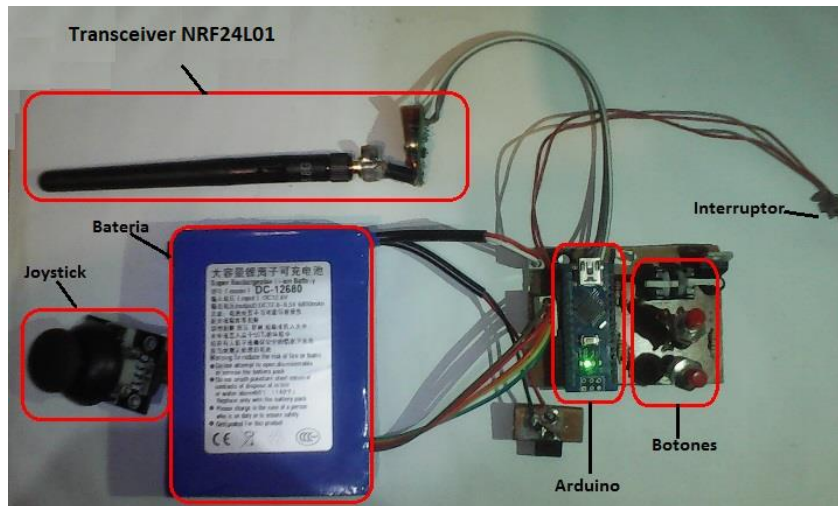


Figura 96. Placa electrónica de Mando

El cable del receptor ER32 se lo malló enrollando pares de alambres flexibles y conectándolo a tierra; se usó caucho termo retráctil para aislar la conducción eléctrica y ajustar los alambres flexibles al cable.

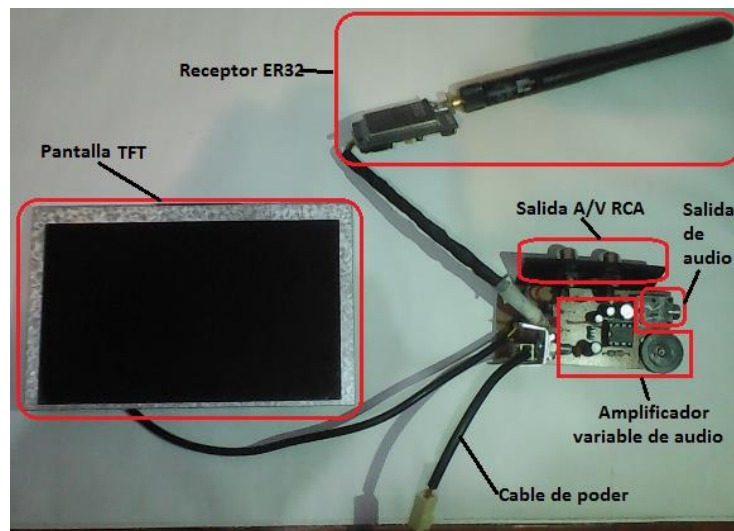


Figura 97. Placa electrónica Receptor de A/V

Los cables de alimentación de la placa electrónica del circuito de potencia a motores (figura 98) son los que provee el suministro energético por medio de la

conexión desde las salidas de 5 [V] y 6 [V] de la placa electrónica de alimentación al robot (figura 99), este mismo cable ofrece energía a la placa electrónica del circuito controlador (figura 98).

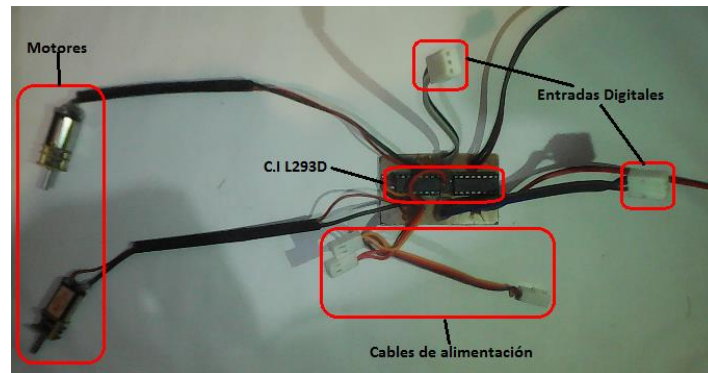


Figura 98. Placa electrónica del Circuito de potencia a motores

Las entradas digitales del circuito de potencia a motores (figura 99) van conectados a las borneras de salidas digitales de la placa electrónica del circuito controlador.

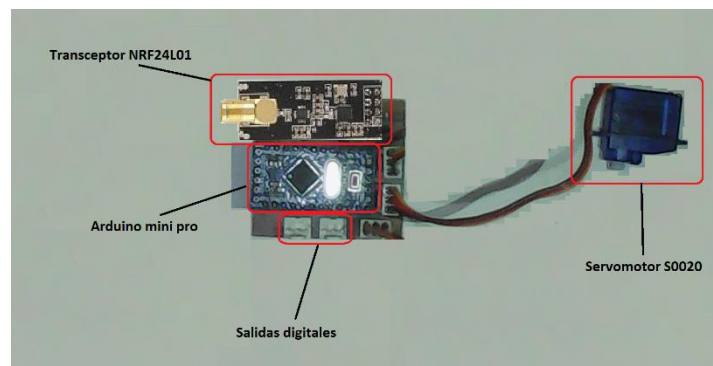


Figura 99. Placa electrónica del Circuito controlador



Figura 100. Placa electrónica de alimentación al robot

3.8.2 Implementación mecánica

Esta etapa se destina en el maquinado, desarrollo de las piezas que soportaran los esfuerzos mecánicos, sujeción de implementos electrónicos (Placas PCS, baterías, cámara, transmisor TX526) y electromecánicos (motoreductores y servomotor) y la estructura.

A partir de retazos de aluminio con 1 mm de espesor, se procede a cortar a las medidas establecidas en los planos usando la cizalladora del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



Figura 101. Corte a medida de placas de aluminio

Se procede a realizar a dar forma a las placas anteriormente cortadas, se ha usado la dobladora universal del Laboratorio de Procesos de Manufactura. Posteriormente, se taladra para los agujeros, el roscado; y finalmente, se usa el esmeril para terminar y afinar los últimos detalles.



Figura 102. Procesos: Doblado, acabado, taladrado



Figura 103. Placas de aluminio terminadas

Las piezas sobrantes se realizaron en impresión 3D por su complejidad, como la carcasa de control, sujeciones de los motoredutores, acople con la cámara, molde

para la rodadura de las ruedas, sujeción del servo motor de giro. Por último, se hizo taladrado de agujeros pequeños y los roscados para los tornillos.



Figura 104. Piezas y partes elaborados en impresión 3D

3.8.3 Ensamblaje

Ensamble Control Remoto

Terminado de construir todas las piezas en el apartado 3.8.1 y 3.8.2, se ensamblará con tornillos de 2 y 3 mm de diámetros. En la Figura 105 se muestra el proceso de ensamblado y terminado el control remoto.

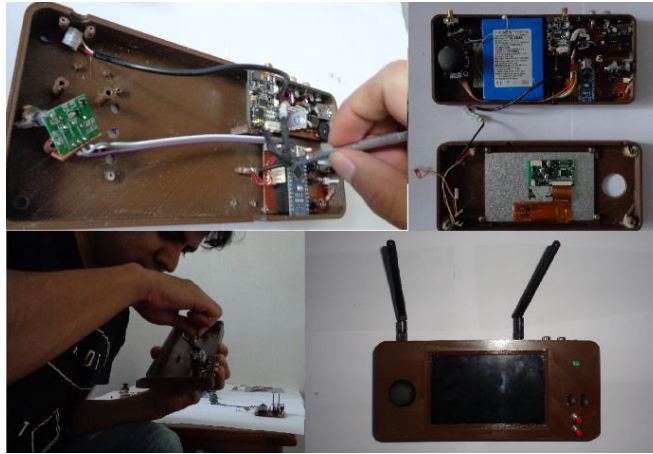


Figura 105. Ensamble del control remoto

Dentro del control se hace una masa a tierra construido con papel aluminio y conectado a tierra; para contrarrestar las interferencias externas hacia la recepción A/V y la amplificación de audio (Figura 106).



Figura 106. Masa a tierra del control remoto

Al final de ensamblar la parte superior y posterior del control, se pega papel adhesivo con las indicaciones de los botones y control como acabado final (Ver Figura 107).



Figura 107. Ensamble final del control de mando

Fabricación de la Rodadura

Antes de ensamblar completamente el robot, se hará primero las rodaduras de las 4 ruedas a base de caucho de silicona. En primer lugar, se aplicará aceite, con una brocha, en la superficie de los moldes realizados en impresión 3D; donde se llenará con caucho de silicona, ver figura 108.



Figura 108. Aplicación de aceite en el molde

Luego en un envase aparte, se mezclará el caucho de silicona con su catalizador con relación de 100 y 10 unidades, respectivamente para que cure a temperatura ambiente (Figura 109).



Figura 109. (De izquierda a derecha) Mezcla del caucho de silicona y mezcla del catalizador

Se vierte el caucho de silicona vulcanizado dentro del molde y se coloca el motoreductor ensamblado con el aro de la rueda con ajuste de un tornillo prisionero (Figura 110) de tal manera q solo el aro se introduzca dentro del caucho de silicona, ver figura.



Figura 110. Ensamble aro y motoreductor, antes de colocar dentro del caucho de silicona

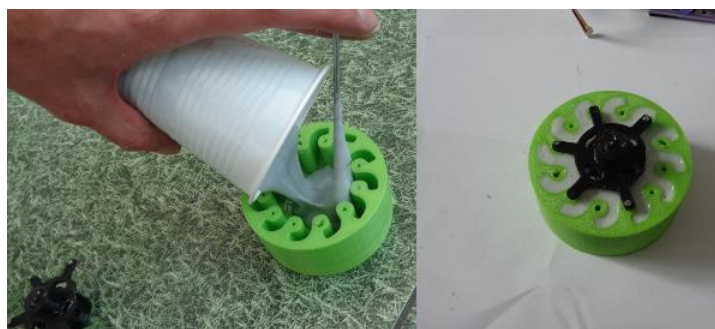


Figura 111. Relleno de caucho de silicona y colocación del aro con el motoreductor

Repetir el procedimiento con las demás rodaduras. El curado finalizado dura 4 horas, por lo que se dispone a retirar la rodadura del molde, ver figura 112.



Figura 112. Etapa final de curado y desmolde

Ensamble Robot

Primero se ensamblan las placas que juntarán las placas PBC's y la batería a la placa base por medio de tornillos.

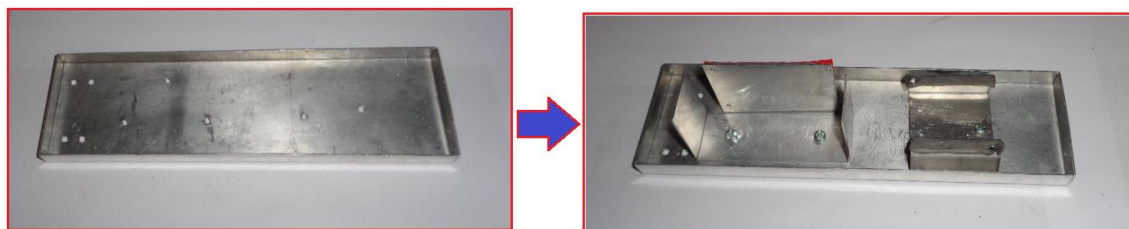


Figura 113. Ensamble de placas de aluminio a placa base

Después se dispone a ensamblar todas las placas PCB's como la placa de alimentación al robot, placa del circuito controlador y la placa del circuito de potencia a motores, y la batería ver figura 114.

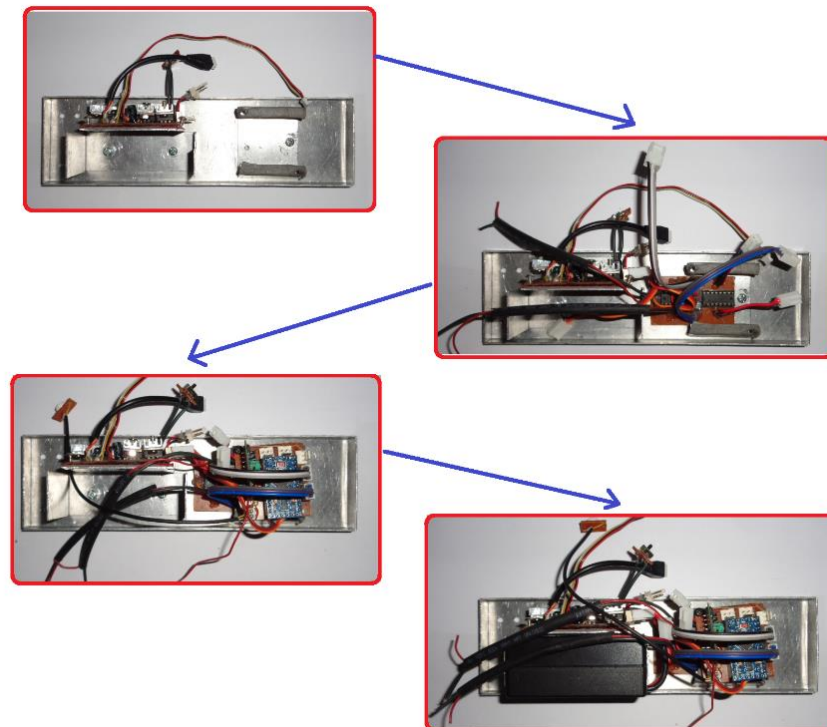


Figura 114. Ensamble de placas PBC's y batería hacia la placa base

Al final, se ensamblan los motores, la cámara, , servomotor, el transmisor TX526 hacia la placa base y se los conecta a cada placa PCB's y entre ellos.

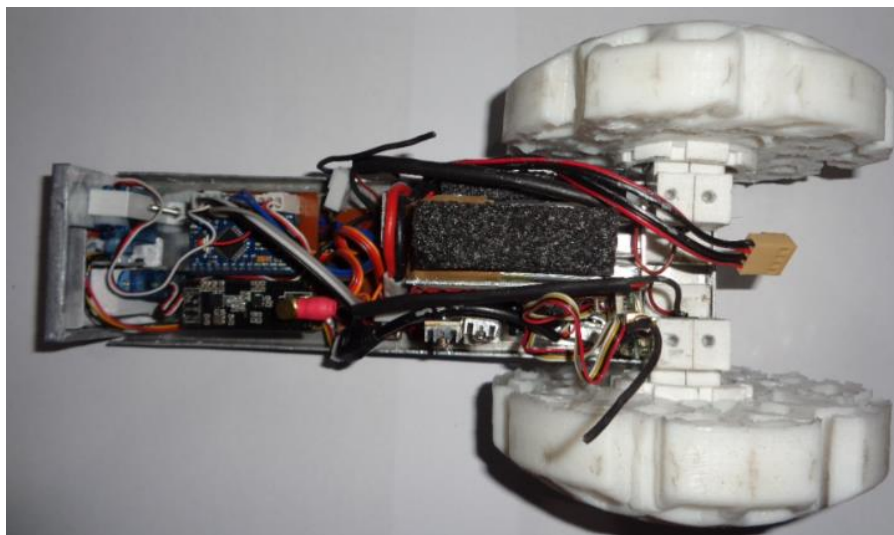


Figura 115. Ensamble final en la placa base

En la carrocería se ensamblarán los motoredutores delanteros y las placas de soporte ver figura 116.



Figura 116. Ensamble final en la carrocería

Luego se procede ensamblar las rodaduras a los motores por medios de los aros. Finalmente, se ensamblan la placa base y la carrocería con tornillos M3, ver figura 117.

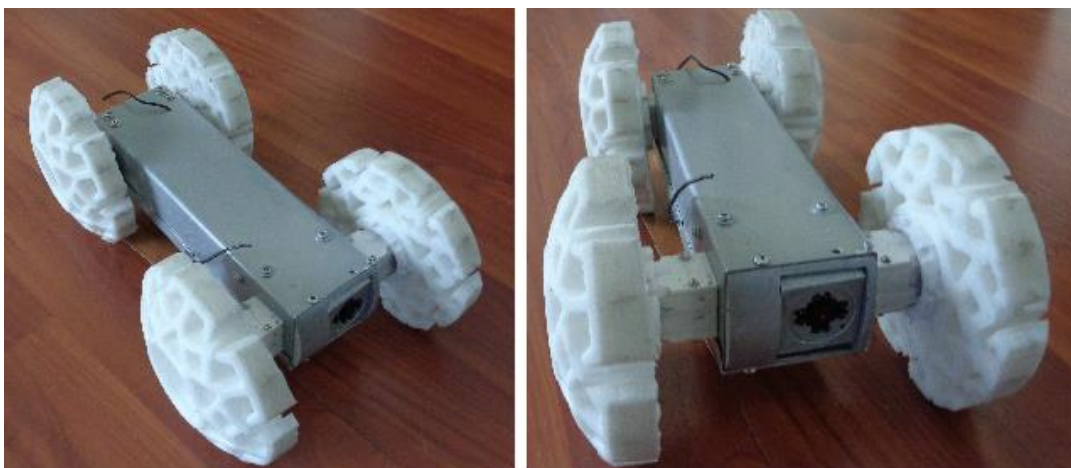


Figura 117. Ensamble final del robot

CAPÍTULO IV PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez terminado de implementar el robot, es necesario someterlo a varias pruebas que permitan medir su rendimiento para las funciones que estará sometido. Las pruebas son de movilidad, tele operación y resistencia mecánica.

4.1 Pruebas y resultados de movilidad

El objetivo de la prueba de movilidad es verificar el funcionamiento de los motoredutores, evaluar el desplazamiento y algoritmo de control de velocidad en los motores, y giro del micro servo motor.

4.1.1 Pruebas y resultados de Desplazamiento

Esta prueba se hace que el robot se desplace en línea recta, giros, comprobar las 4 velocidades y la suspensión de las 3 rodaduras fabricadas. En la tabla 127 se muestran los resultados y calificación que ocurrió en cada prueba.



Figura 118. Modelos de rodaduras

Tabla 126*Calificación de resultados de desplazamientos*

Tipo de prueba	Modelos de rodadura		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Desplazamiento recto	5	3	5
Giro	4	5	4
Velocidad	4	3	4
Suspensión	4	5	5
Total	17	16	18

Resultados generales:

La velocidad más baja en los 3 modelos no se realizaba porque no era lo suficientemente fuerte para mover al robot, se le aumento el pwm para solucionarlo. El modelo 3 de rodadura fue más satisfactoria que los demás.

En esta sección también se mide la mayor elevación que puede subir el robot como una grada. El resultado fue de una elevación o grada de altura 5cm.

4.1.2 Prueba y resultados en terrenos

El diseño del torque de los motorreductores fue a base de un plano inclinado de 60° y con la condición de sin deslizamientos. Es por ello que es importante complementarlo haciendo pruebas reales en diferentes terrenos para medir el desempeño de la rodadura. Los principales terrenos que encontramos dentro de las edificaciones son madera, flotantes, porcelanatos o cerámicos, alfombra y de cementos; adicionalmente se probaría terrenos como asfalto y césped. La prueba se lo realizará a diferentes terrenos hasta la inclinación máxima que el robot pueda subir.

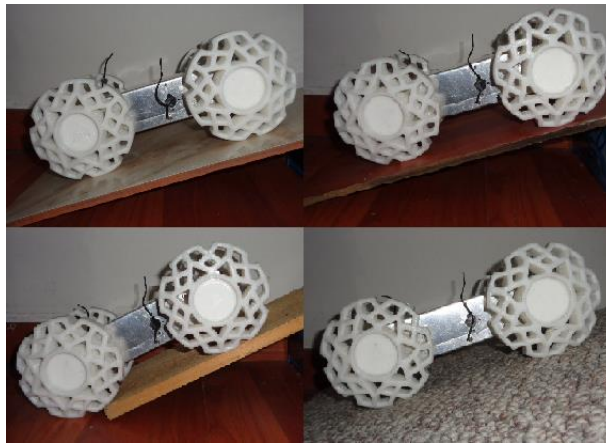


Figura 119. Prueba de plano inclinado en cerámica, piso flotante, madera y alfombra



Figura 120. Prueba en plano inclinado en concreto, césped y asfalto

Tabla 127

Resultados de pruebas de terrenos

Tipo de terreno	Máyor inclinación (°)	Calificación Adherencia	Movilidad
Madera	48	Muy buena	Muy buena
Piso Flotante	46	Muy buena	Muy buena
Asfalto	48	Muy buena	Muy buena
Concreto	50	Muy buena	Muy buena
Césped	40	Media	Media
Cerámico	47	Muy buena	Muy buena
Alfombrado	44	Buena	Medio

Resultados:

- El máximo ángulo que el robot puede subir en un plano inclinado fue de 50 en concreto porque la fuerza normal disminuye a tal punto que no hay fuerza de fricción suficiente entre la rodadura y el suelo.
- Los resultados en los terrenos de madera, piso flotante, cerámico y alfombrado fueron satisfactorias porque es el terreno donde el robot se va a desarrollar.
- El terreno en donde el robot no rinde aceptablemente bien, es césped debido a las hojas que impiden que el robot pueda girar libremente, pero la movilidad en dirección recta lo realiza con poca dificultad. Entre más largo sea el césped, menos es la capacidad de movilidad del robot.

4.2 Pruebas y resultados de teleoperación

Esta sección se enfoca en realizar pruebas de teleoperación, la coordinación entre el sistema de visión y el mando por medio del usuario, la distancia máxima de operación de cada sistema; se medirá la autonomía del robot.

4.2.1 Pruebas y resultados de alcance y autonomía

El alcance tiene variables como ganancia de la antena, potencia del emisor, características del medio donde se propaga la onda, interferencia por otras fuentes de energía electromagnéticas. En esta prueba solo se tomará en cuenta los obstáculos que estarán en medio de la vía de transmisión estación robot – estación de mando. La

prueba de autonomía se realizará con todo el sistema puesto en marcha, motores y envío de audio/video; durante la etapa de prueba se analizará la percepción de teleoperación, esto quiere decir si existe o no retardos y maniobrabilidad en tiempo real. El obstáculo a tomar en cuenta será paredes únicamente porque el robot va a trabajar mayor parte en interiores. En la tabla 129 se muestra los alcances tanto del sistema de visión y audio, como la del sistema de transmisión de datos.

Tabla 128

Resultados de alcances de transmisión

Obstáculos	Sistema audio/video	Sistema transmisión de datos
Línea de vista	260 metros	320 metros
1 pared	90 metros	110 metros
2 paredes	50 metros	60 metros
3 paredes	18 metros	25 metros

Posteriormente se verifica los estados de transmisión de video durante las pruebas como la definición de la cámara y la claridad sobre el día. Luego se prueba la opción de visión nocturna dentro una habitación (Figura 122), por la noche y apagada las luces. Al final, se conecta con un monitor externo (Figura 123) para comprobar el funcionamiento de video y audio en el monitor.



Figura 121. Muestra del video durante la prueba.



Figura 122. Prueba de visión nocturna en un cuarto oscuro



Figura 123. Conexión con monitor externo

En la tabla 129 se hizo medición del voltaje de la batería de cada estación en intervalos de 10 minutos. Durante el proceso, todos los motores estuvieron funcionando

a máxima velocidad y se hizo de prueba hasta que la estación robot se quede sin energía suficiente para que opere.

Tabla 129

Energía de la batería de cada estación

Tiempo de operación (min)	Voltaje en la batería de la estación (V)	
	Control remoto	Robot
0	12.6	12.6
10	12.04	12.42
20	11.38	12.19
30	10.50	12.07
40	9.72	11.89

Resultados Generales

- El alcance de los dos sistemas está definido por el alcance menor de cualquiera de ellos. En esta prueba se evidencia que el alcance será definido por el sistema de transmisión audio/video. Por lo tanto, el alcance máximo a línea de vista para la teleoperación es de 260 metros.
- La definición de video es muy buena y la opción de visión nocturna funciona correctamente. La captación de audio es potente, capaz de escuchar susurros dentro de una habitación.
- La autonomía máxima de todo el sistema viene dada por el rendimiento máximo de la batería del control remoto que fue de 40 min, por debajo de 10 voltios empieza a descargarse más rápido.

4.3. Pruebas y resultados de resistencia a caídas

La prueba de resistencia mecánica a caídas se lo realiza soltar al robot en caída libre a distancias de intervalos de 50 cm hasta los 2 metros. Después de cada prueba, se evaluará el estado de la estructura conformada por chapas de aluminio.

Tabla 130

Resultados de pruebas en caída libre

Altura (cm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
50	Bien	Muy bien	Muy bien
100	Malo	Bien	Muy bien
150	Malo	Malo	Muy bien
200	Malo	Malo	Muy bien



Figura 124. Prueba de altura a 0.5, 1, 1.5 y 2 metros

Resultados generales:

Los resultados que se muestran en la Tabla 131 es con referencia en un cambio de diseño en los acoples de los motores con el objetivo de otorgarles más resistencia con refuerzos en el eje y la caja que contiene los engranes. Con los diseños anteriores, la caja de engranajes cedía por el esfuerzo del eje durante la prueba de caída y se rompían los tornillos que aseguraban al motor.

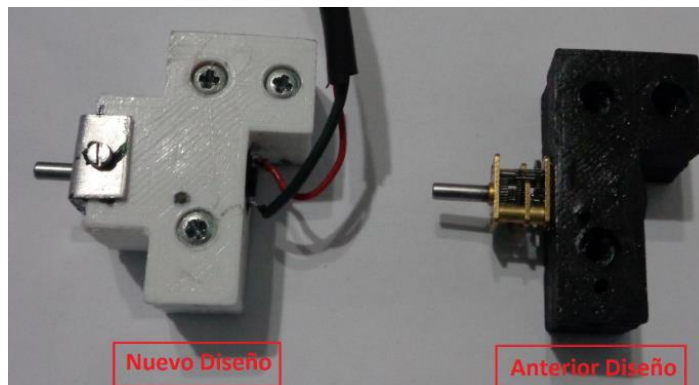


Figura 125. Muestra entre el nuevo diseño y el anterior diseño.

En la figura 125 se muestran el nuevo diseño y el anterior diseño. El nuevo diseño se recubre la caja de engranes del motor con una extensión del material ABS del anterior diseño. Adicionalmente, se implementa una placa de aluminio 1060 con 1mm de espesor que atraviesa el eje final del motor que se acopla al aro de la rueda y se comprueba que da suficiente soporte para que no ceda durante el impacto.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un robot móvil teleoperado inalámbricamente, a bajo costo, para inspección a distancia por medio de un control remoto siendo la interfaz donde el usuario monitorice unilateralmente los movimientos del robot y con capacidad de soportar caídas de hasta 2 metros. El desarrollo de la interfaz del control de mando es sencillo, ahorrando tiempo de practica para la adaptabilidad con el sistema.
- Los parámetros de diseño de teleoperación en tiempo real fueron solventados por criterios de transmisión como velocidad de datos, capacidad de procesamiento de información con el objetivo de reducir las limitaciones del sistema y obtener el mejor desempeño entre coordinación hombre-robot ya que el punto crítico es la percepción humana frente a los retrasos de señales.
- Todo el sistema de diseño, en general, está fundamentado en optimizar el tamaño del robot, así como los parámetros de sistema de locomoción por ruedas, elementos de acople para la estructura mecánica, dimensionamiento de placas PBCs y el sistema para golpes; como resultado, el robot será suficientemente compacto relacionado a brindar una inspección cautelosa.

- Emplear el caucho de silicona para este proyecto fue de mucha importancia por sus características mecánicas siendo un material de amplia deformación y desplazamiento, pudo satisfacer 3 parámetros de diseños como sistema de suspensión, tracción y sistema para los golpes, además se complementa con el diseño geométrico de la rodadura.
- En el futuro, prototipos realizados como en este proyecto servirían como pruebas con visión artificial siendo una herramienta para la navegación, sustituyendo sensores por algoritmos de reconocimiento de imágenes se lograrán hacer mapeos y otorgarle autonomía al robot.

5.2 Recomendaciones

- Tomar mucha consideración en los elementos más vulnerables a esfuerzos mecánicos, producido por el efecto de caída, guiándose por la simulación previa y en la forma de acoplarlos a la estructura del robot, a base de ellos se optimiza la robustez del diseño.
- La construcción modular del sistema de control facilita el cambio e incorporación de elementos o nuevos elementos para mejorar o realizar investigación con la misma plataforma física del robot.
- El diseño de este prototipo no es idóneo para césped, pero si se lo quiere utilizar para este terreno es aconsejable cambiar otro diseño de rueda con mayor flexibilidad en la zona circunferencial.

- El peso del robot es un factor crítico, ya que, si tiene mayor peso, generará mayor fuerza de impacto. Para ello se podría cambiar las ruedas por un elastómero más rígido y que el ancho de las conexiones sean menor. También el uso de materiales compuestos más ligeros para la fabricación del bastidor y de la carrocería, reduciría el peso.
- No se pudo implementar un sistema de refrigeración dentro del robot por su corto espacio. Es recomendable que los dispositivos como los reguladores de voltajes y el transmisor de A/V no se sobre calienten para que ofrezcan la potencia máxima y no acortar la vida útil. Por ello, el uso de nuevas tecnologías como el synthetic jet, que es un dispositivo compacto y silencioso se podría implementar en conjunto con el disipador para enfriarlo por medio del flujo de aire que expulsa.

BIBLIOGRAFÍA

Adamiak, M. (2012). *Abrasion Resistance of Materials*. Rijeka: Intech. Obtenido de
intechopen: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/31705/InTech-
Rubber_abrasion_resistance.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/31705/InTech-Rubber_abrasion_resistance.pdf)

Alonso, R. C. (2007). *Tecnologías de la Información y la Comunicación*. Ideaspropias.

Álvarez, F. B. (5 de 2010). *Universidad de Oviedo*. Obtenido de
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion14.ResistenciaPolimeros.pdf>

Álvaro Arranz, J. B. (2006). *Aplicaciones de robots móviles*. Madrid.

Antonio Barrientos, L. P. (1997). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: Concepción
Fernández Madrid.

Bermeo, S. (2003). *Desarrollo de robots basados en el comportamiento*. Barcelona:
UPC.

Bräunl, T. (2006). *Embedded Robotics Mobile Robot Design and Applications with
Embedded Systems*. Berlin: Springer.

Carletti, E. J. (2017). *robots-argentina*. Obtenido de robots-argentina: [http://robots-
argentina.com.ar/MotorCC_L293D.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_L293D.htm)

Carlos Restrepo, L. R. (2005). *Interfaz de comunicación, visualización y control de
navegación de la plataforma móvil p-metin*.

ceiisa. (30 de 06 de 2015). *ceiisa*. Obtenido de
<http://ceiisa.blogspot.com/2015/02/sensores-capacitivos.html>

Charith Lasantha Fernando, M. F. (2012). *Design of Telesar V for Transferring Bodily Consciousness in Telexistence*. Algarve.

Correa, A. C. (2005). *Sistemas Roboticos Teleoperados*. Bogota.

Diagram, C. (2013). *Robometricschool*. Obtenido de Robometricschool:
<http://www.robometricschool.com/2013/01/electronic-circuit-dc-motor-driver.html>

EPRI. (2006). *Plant Support Engineering: Elastomer Handbook for Nuclear Power Plants*. California: Electric Power Research Institute .

Ferrer, B. E. (2011). *Transporte y desplazamiento de objetos mediante coordinación de robots móviles*. Valencia.

Festo. (2014). *Festo*. Obtenido de <https://www.festo.com/group/es/cms/10219.htm>

Gamboa, M. (09 de 2011). *eycom*. Obtenido de eycom:
http://www.eycom.com.ar/tecnica/descargas/Calculo_capacidad_de_corriente_en_pistas.pdf

Geovanny Argudo, A. A. (2013). *Diseño y construcción de un robot móvil tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del cuerpo de bomberos*. Cuenca.

González, M. A. (2012). *Prototipo de robot móvil teleoperado*. Querétaro.

Good, M. (2016). *Structural analysis of thermal interface materials and printed circuit boards in telecom units - a methodology*. Luleå: Luleå University of Technology.

Hernández, J. (2007). *Control of a ground vehicle with obstacle avoidance using vision*. Puebla. Obtenido de https://lafmia.hds.utc.fr/Ground_Vehicle.html

Kalle Hanhi, M. P.-M. (2007). *Elastomeric Materials*. Tampere: Leonardo da vinci.

Laura Folgado, J. C. (2011). *Montaje y mantenimiento de equipos*. Madrid: Editex.

Liang, H. (2007). *Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion*. London: University of London.

Martinez, V. F. (1995). *Planificación de Trayectorias para Robots Móviles*.

Melvin Andrés González Pino, C. M. (2009). *El Tmr-1. Un Robot Movil Teleoperado*. Santander: Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

Mofidi, M. (2007). *Tribology of Elastomers*. Luleå : Luleå University of Technology.

Moore, D. F. (1974). *A review of hysteresis theories for elastomers* . Swansea: Pergamon.

Nasa. (2008). *Nasa*. Obtenido de https://www.nasa.gov/centers/ames/multimedia/images/2008/moses_lake.html

Nikos C. Mitsou, S. V. (s.f.). *ntua*. Obtenido de Visuo-Haptic Interface for Teleoperation of Mobile.

Ollero, A. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: marcombo.

Ortíz, A. (2008). *Universitat de les Illes*. Obtenido de http://dmi.uib.es/aortiz/mobots_navegacion.pdf

Presidencia República del Ecuador. (21 de Febrero de 2013). Obtenido de <http://www.presidencia.gob.ec/el-indice-de-homicidios-en-ecuador-esta-por-debajo-del-promedio-de-la-region-y-menor-al-de-ee-uu/>

ReconRobotics. (26 de Julio de 2012). *policemag*. Obtenido de <http://www.policemag.com/channel/swat/products/2012/07/throwbot-xt.aspx>

Reconrobotics. (2013). *Reconrobotics*. Obtenido de <http://www.reconrobotics.com/products/throwbot-xt/>

Reconrobotics. (07 de 2015). *Reconrobotics*. Obtenido de <http://www.reconrobotics.com/products/product-event-photos/barricaded-subject-photos/>

Resdal. (2006). *Ecuador. Libro Blanco de la Defensa Nacional - Política de defensa*.

rober, K. (2011). *KR 5 sixx R650, R850 Especificación*.

Robotikka. (27 de Marzo de 2012). *Actualidad Gadget*. Obtenido de <http://www.actualidadgadget.com/nueva-suspension-robotica-para-vehiculos/>

Romeva, C. R. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: UPC.

S. Hernandez, E. M. (2015). *Computational modelling of elastomeric materials to fit experimental data*. Coruña: School of Civil Engineering, University of Coruña.

Sánchez, L. (2014). *Orientación de las políticas públicas implementadas en la última presidencia del economista Rafael Correa para contrarrestar el crecimiento del narcotráfico en el país*. Quito.

Sgs-Thomson. (1994). *datasheetcatalog*. Obtenido de [datasheetcatalog: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/1328.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/1328.pdf)

Siegwart, R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. London.

smoyolem. (18 de Noviembre de 2011). *espol*. Obtenido de <http://blog.espol.edu.ec/saryx/comando-conjunto-de-las-fuerzas-armadas/>

Snánchez, E. (2002). *Implementación de un Sistema Teleoperado con Reflexión de Fuerza de Seis Grados de Libertad*. San Sebastian.

Software. (26 de 01 de 2016). *diwo*. Obtenido de diwo: <http://diwo.bq.com/joystick-bitbloq-2/>

Stachniss, C. (2009). *Robotic Mapping and Exploration*. Berlin: Springer.

Tim A. Osswald, J. P. (2011). *Viscoelastic Behavior of Liquid Silicone Rubber*. Chicago: SIMTEC Silicone Parts, LLC.

Toro, M. (24 de 9 de 2009). *scribd*. Obtenido de scribd: <https://www.scribd.com/doc/20314825/Diseno-y-tipos-de-chasis>

Tovar, C. (06 de 11 de 2015). *applicate*. Obtenido de http://www.applicate.mx/es/ObservatorioApps/La_necesidad_de_una_nueva_era_en_las_comunicaciones_inalambricas

Tutoriales. (26 de 04 de 2016). *naylampmechatronics*. Obtenido de http://www.naylampmechatronics.com/blog/32_Comunicaci%C3%B3n-Inal%C3%A1mbrica-con-m%C3%B3dulos-de-RF-de.html

Wood, L. (2001). *Robotic Mobile Manipulation Experiments at the U.S. Army Maneuver Support Center*. Missouri.

Zyanya. (28 de Octubre de 2011). *Nerdgasmo*. Obtenido de <http://nerdgasmo.com/2011/10/androides-que-pueden-imitar-los-movimientos-de-los-humanos/>