

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO DE EXPLORACIÓN

**DIEGO FERNANDO PINEDA QUIJANO
FREDY ALEXANDER PRADA LARGO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2009

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO DE EXPLORACIÓN

**DIEGO FERNANDO PINEDA QUIJANO
FREDY ALEXANDER PRADA LARGO**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico e Ingeniero Electrónico**

Director

**CARLOS BORRÁS PINILLA
Ingeniero Mecánico**

Codirector

**JAIME BARRERO
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar nuestro camino y protegernos cada día.

A mis padres, porque sin su apoyo incondicional nada hubiera sido posible.

A mis hermanos, por su compañía, apoyo, comprensión y cariño.

A todos mis seres queridos, que siempre desean lo mejor para mí.

Diego Fernando Pineda Quijano

A Dios, por darnos la oportunidad de aprender, formarnos y crecer trabajando en equipo para conseguir metas propias.

A mis padres y hermano, por su comprensión y apoyo incondicional.

A mi mujer y mi hija por su amor y cariño.

A ERA para que mantenga su esencia y siga trabajando por la investigación y el desarrollo de Colombia.

Fredy Alexander Prada Largo

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Borrás Pinilla por su labor como director de proyecto, su apoyo moral, económico, logístico, por su aporte en la concepción y elaboración del prototipo y su guía en el desarrollo de este proyecto.

A Jaime Barrero por su colaboración, consejos técnicos y profesionales.

A Jorge Hernando Ramón por el apoyo en la consecución de recursos y equipos para la investigación en robótica móvil en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Al grupo ERA, Raúl Cadena y Sergio Meza por su apoyo incondicional y colaboración en el desarrollo de prototipos de robots por medio los cuales obtuvimos un aprendizaje recíproco en diversas áreas.

A DYNAMO Electronics, Fabio Erazo, Ángela Gélvez y Omar Carvajal.

A nuestros padres y hermanos por su apoyo, paciencia y comprensión.

A Jorge Meneses y sus colaboradores que pusieron a nuestra disposición las instalaciones y los elementos del laboratorio FMS de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

A Edwin Mosquera estudiante de Diseño Industrial de la UIS por su colaboración incondicional en varias etapas del proyecto.

A Don Gonzalo y Don Mario operarios del taller de máquinas herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del taller de fundición de la planta de aceros de la UIS, respectivamente.

A Edgar Rodríguez del Instituto Técnico Superior Dámaso Zapata por su gran colaboración en la construcción de las piezas del prototipo y sus asesorías técnicas.

A Carlos Rugeles y Erwin Rugeles del taller RUCASTIL por su colaboración en el montaje y ensamble de las piezas del prototipo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	4
1.3.1 Objetivos Generales	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	6
1.5 ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	6
1.5.1 Requerimientos para la manipulación del robot	6
1.5.2 Requerimientos funcionales	7
1.5.3 Requerimientos técnicos	8
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 GENERALIDADES	14
2.1.1 Definición	14
2.1.2 Historia	14
2.1.3 Estado del arte	16
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS	16
2.2.1 Según su grado de inteligencia	18
2.2.2 Según su capacidad de movimiento	19
2.2.3 Según su morfología	20
2.2.4 Según su aplicación	24
2.3 CLASIFICACIÓN DEL ROBOT QUE SE ESTÁ DESARROLLANDO	32

2.4	LOCOMOCIÓN EN ROBOT CON RUEDAS	33
2.4.1	Tipos de ruedas	34
2.4.2	Configuración geométrica de las ruedas	34
2.4.3	Estabilidad	35
2.4.4	Maniobrabilidad	38
2.4.5	Controlabilidad	38
2.5	WALKING WHEELS ROBOTS	39
2.5.1	Walking wheels con sistemas activos de suspensión	40
2.5.2	Walking Wheels Robots con sistemas pasivos de suspensión	40
2.6	ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE UN ROBOT MÓVIL	41
2.7	SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL GPS	43
3.	PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	45
3.1	METODOLOGÍA DE DISEÑO IMPLEMENTADA	45
3.2	RELACIÓN ENTRE LOS REQUERIMIENTOS Y LOS SUBSISTEMAS DE LOCOMOCIÓN DEL MÓVIL	45
3.2.1	Sistema de suspensión	46
3.2.2	Delimitación de la masa del móvil	47
3.2.3	Selección del tipo de llanta a utilizar	48
3.2.4	Diámetro de las ruedas y altura de los obstáculos superables	49
3.3	CONFIGURACIÓN FUNDAMENTAL	50
3.3.1	Alternativas de diseño del sistema de locomoción	50
3.3.2	Comparación entre las cinco alternativas	61
3.3.3	Criterios de selección	63
3.3.4	Selección de la solución	68
3.4	CONFIGURACIÓN DETALLADA	69
3.4.1	Entradas del proceso	71
3.4.2	Desarrollo del prototipo	73
3.4.3	Mejoramiento	74
3.4.4	Salidas del proceso	75

4.	DESARROLLO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DEL PROTOTIPO	76
4.1	VERSIONES GENERALES DE DISEÑO	76
4.2	SUBSISTEMA DE SUSPENSIÓN	76
4.2.1	Mecanismo de suspensión seleccionado	77
4.2.2	Diseño de la geometría de las barras de suspensión	79
4.3	SUBSISTEMA DE DIRECCIÓN	82
4.3.1	Tipo de rueda	83
4.3.2	Diseño detallado del subsistema de dirección	84
4.3.3	Selección de rodamientos	88
4.3.4	Cálculo de la transmisión de engranajes	89
4.3.5	Torque necesario para la dirección de cada rueda	92
4.3.5	Selección de los servomotores de dirección	93
4.4	DIFERENCIAL Y CHASIS	95
4.4.1	Diseño del mecanismo diferencial	95
4.4.2	Diseño de los engranajes del diferencial	99
4.4.3	Diseño del chasis	107
4.5	SUBSISTEMA DE TRACCIÓN	109
4.5.1	Análisis estático del sistema de locomoción	109
4.5.2	Estimación de la potencia requerida para el desplazamiento	113
4.5.3	Selección de los motores de tracción	120
4.6	VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS BARRAS PRINCIPALES DE SUSPENSIÓN	123
4.6.1	Cargas soportadas por las barras principales	123
4.6.2	Análisis estructural de la barra principal	124
4.7	DISEÑO DE LOS RESORTES DEL SUBSISTEMA DE SUSPENSIÓN	131
4.8	DISEÑO DE LOS RINES	133
4.8.1	Verificación de la resistencia de los rines diseñados	134
5.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	139

5.1	FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS PLANAS	139
5.1.1	Máquina utilizada	139
5.1.2	Estrategia general de mecanizado	141
5.1.3	Sujeción de la pieza	143
5.1.4	Condiciones de corte	144
5.1.5	Cálculos de tolerancias para los ajustes de las piezas	148
5.1.6	Generación de los códigos de mecanizado	150
5.2	FABRICACIÓN DE LOS RINES	152
5.2.1	Construcción del modelo en resina epoxi	152
5.2.2	Fundición de las masas base	153
5.2.3	Torneado preliminar	154
5.2.4	Mecanizado en CNC de los agujeros que forman los radios	155
5.2.5	Torneado final de las piezas	159
5.3	FABRICACIÓN DE LOS ENGRANAJES DEL DIFERENCIAL	161
5.4	MECANIZADO DE EJES, BUJES Y ACOPLÉS	163
5.4.1	Tolerancias y ajustes	163
5.4.2	Condiciones de corte	164
5.5	FABRICACIÓN DEL CHASIS Y LAS PIEZAS DOBLADAS	165
5.5.1	Chasis	165
5.5.2	Piezas dobladas en platina de un octavo	166
5.6	FABRICACIÓN DE LA CARCASA	168
5.7	MONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS	170
5.7.1	Subconjuntos tracción dirección	170
5.7.2	Subconjuntos ruedas centrales	170
5.7.3	Subconjunto cuerpo central	170
5.7.4	Subconjunto lado izquierdo y lado derecho	172
5.7.5	Montaje final	174
6.	DISEÑO DE SUBSISTEMAS Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE LA PLATAFORMA ELECTRÓNICA	175
6.1	SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS	178
6.1.1	Sensores de infrarrojo	179

6.1.2	Sensores de ultrasonido	182
6.2	SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y POSICIONAMIENTO	185
6.2.1	Brújula electrónica	187
6.2.2	Sistema de posicionamiento global (GPS)	190
6.3	SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	196
6.4	SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	199
6.4.1	Motores DC para la tracción	199
6.4.2	Etapa de potencia	200
6.4.3	Servomotores de dirección	202
6.5	UNIDAD DE CONTROL	202
6.5.1	Criterios de selección del microcontrolador	202
6.5.2	Microcontroladores considerados	204
6.6	UNIDAD DE ABASTECIMIENTO	205
7.	IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE LA PLATAFORMA ELECTRÓNICA	208
7.1	SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS	208
7.1.1	Sensores de infrarrojo	208
7.1.2	Sensores de ultrasonido	215
7.2	SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y POSICIONAMIENTO	218
7.2.1	Brújula electrónica	218
7.2.2	Sistema de posicionamiento global (GPS)	220
7.3	SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	223
7.4	SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	226
7.4.1	Etapa de potencia	226
7.4.2	Control de servomotores de dirección	228
7.5	UNIDAD DE CONTROL	229
7.6	UNIDAD DE ABASTECIMIENTO	239
8.	PRUEBAS Y RESULTADOS	242
8.1	INTEGRACIÓN DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS	242

8.1.1	Sistema de percepción de entorno	242
8.1.2	Sistema de posicionamiento, orientación y comunicación	243
8.1.3	Tarjetas de control, potencia y baterías	243
8.1.4	Cableado	244
8.2	PRUEBAS MECÁNICAS O DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	245
8.2.1	Peso y dimensiones finales del móvil	245
8.2.2	Capacidad de superación de obstáculos	245
8.2.3	Medición del mínimo radio de giro del móvil	247
8.2.4	Capacidad de desplazamiento a través de terrenos inclinados	248
8.2.5	Medición de la velocidad real del robot	251
8.2.6	Medición de la distancia de frenado	252
8.2.7	Distancia de frenado del móvil ante una señal dada por los sensores de distancia	255
8.2.8	Torque de dirección	258
8.2.9	Estabilidad estática	259
8.3	PRUEBAS ELÉCTRICAS	259
8.3.1	Corrientes consumidas por los dispositivos periféricos	259
8.3.2	Medición de los voltajes y corrientes reales de la tarjeta de control	260
8.3.3	Verificación de la precisión de los sensores de distancia	261
8.3.4	Verificación de la lectura de orientación de la brújula.	263
8.3.5	Estimación del error en la medida de posición dada por el GPS	264
8.3.6	Navegación autónoma hacia un punto objetivo	267
	CONCLUSIONES	274
	RECOMENDACIONES	278
	FUTUROS TRABAJOS	280
	BIBLIOGRAFÍA	282
	ANEXOS	286

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los robots.	17
Figura 2. Clasificación de los robots según su grado de inteligencia	19
Figura 3. (Izquierda) Vehículo autónomo aéreo. (Derecha) UFR II, Seiko Epson.	21
Figura 4. (Izquierda) Robot autónomo submarino, UIB. (Derecha) Swordfish, robot submarino tele-operado.	22
Figura 5. (Derecha) Mars Sojourner, NASA. (Izquierda) NOMAD	22
Figura 6. (Izquierda) 4WD2 Robot, Linxmotion (Derecha) WorkPartner	23
Figura 7. Locomoción en robots móviles de exploración terrestre.	25
Figura 8. Explorador “Spirit” enviado a Marte por la NASA.	26
Figura 9. Categorías de los robots utilizados en la enseñanza.	27
Figura 10. (Izquierda) Robot Technology Set with Serial Transmitter, LEGO®. (Derecha) Cybertron, CRYA®.	28
Figura 11. (Izquierda) Robo Mobile Set, FischerTechnik®. (Derecha) SRM ²² .	28
Figura 12. (Izquierda) Hummer . (Derecha) 4WD2 Robot.	31
Figura 13. (Izquierda) LAGR Robot (Centro) Walking Stick (Derecha) García Robot, Acroname Robotics.	32
Figura 14. (Izquierda) Handy Board (Centro) Stayton Board (Derecha) Stargate Board, Intel Corp.	32
Figura 15. Clasificación del robot que se va a desarrollar.	33
Figura 16. Los cuatro principales tipos de rueda.	35
Figura 17. (Izquierda) Yellow CYE SR (Derecha) URANUS.	38
Figura 18. (Izquierda) SCARAB. (Centro) SRR. (Derecha) OCTOPUS.	41
Figura 19. (Izquierda) Nomad. (Derecha) Crab I [44].	41

Figura 20. Metodología adoptada para la configuración sistemática del sistema de locomoción del robot móvil.	46
Figura 21. Ruedas usadas en carros RC con usos potenciales en robótica.	49
Figura 22. Configuración de las ruedas y maniobrabilidad de la alternativa 1.	53
Figura 23. Sistema de suspensión alternativa 1.	53
Figura 24. Configuración geométrica de las ruedas y dirección de la alternativa 2.	55
Figura 25. Esquema del subsistema de suspensión y de tracción (Gráfico izquierdo modificado del original)	55
Figura 26. (Izquierda) Esquema del sistema de suspensión rocker bogie. (Derecha) Vista frontal del sistema de movilidad de la alternativa 3.	57
Figura 27. Esquema básico de la suspensión de la alternativa 4.	58
Figura 28. (Izquierda) Configuración geométrica de las ruedas alternativa cinco. (Derecha) Esquema básico de la suspensión.	61
Figura 29. Sistema de dirección de la alternativa cinco.	61
Figura 30. Cuadro comparativo de las cinco alternativas de solución.	62
Figura 31. Diagrama de flujo del proceso de diseño detallado	70
Figura 32. Ruedas adquiridas para el prototipo.	74
Figura 33. (Izquierda) Versión inicial (Renderizada por Edwin Mosquera, Diseñador Industrial, UIS). (Derecha) Versión final (PhotoWorks).	77
Figura 34. Fuerzas que intervienen en la superación de obstáculos.	78
Figura 35. Prototipo preliminar del sistema de suspensión seleccionado.	79
Figura 36. Diseños preliminares de las barras principales de suspensión.	80
Figura 37. Versión definitiva de las barras principales de suspensión.	81
Figura 38. Versión uno del diseño de la barra secundaria de la suspensión	81
Figura 39. Versión definitiva del diseño de la barra secundaria de suspensión.	82
Figura 40. Versión uno del diseño del sistema de dirección.	85
Figura 41. Elementos que conforman el mecanismo de dirección del robot.	86

Figura 42. Rodamiento rígido de bolas seleccionado ⁴²	89
Figura 43. Rodamiento axial de bolas seleccionado ⁴²	89
Figura 44. Ángulo máximo de dirección requerido.	90
Figura 45. (Izquierda) FUTABA S3004. (Derecha) HITEC HS-475HB servomotor seleccionado.	94
Figura 46. Diferencial basado en engranajes cónicos	96
Figura 47. Diseño preliminar del diferencial basado en engranajes rectos.	97
Figura 48. Diseño final del diferencial basado en engranajes rectos.	97
Figura 49. (Izquierda) posición engranajes diferencial versión preliminar. (Derecha) posición engranajes diferencial versión definitiva.	98
Figura 50. Cargas soportadas por el sistema diferencial.	104
Figura 51. Diseño del chasis, versiones preliminares.	108
Figura 52. Diseño definitivo del chasis.	109
Figura 53. Diagrama de fuerzas parte 1.	111
Figura 54. Diagrama de fuerzas parte 2.	112
Figura 55. Geometría de la deflexión de la rueda. Dimensiones en mm	116
Figura 56. Cargas de flexión en el eje z sobre la barra principal	124
Figura 57. Propiedades y constantes del material utilizado en la simulación.	125
Figura 58. Enmallado realizado mediante el <i>CFX – Mesh method</i> .	126
Figura 59. Cargas aplicadas al modelo simulado.	127
Figura 60. Deformación total de la barra bajo las cargas estipuladas.	128
Figura 61. Factor de seguridad de esfuerzos ante las cargas estipuladas.	128
Figura 62. Deformación de la barra principal de suspensión, configuración en tándem	130
Figura 63. Factor de seguridad de esfuerzos de la barra principal de suspensión, configuración en tándem.	130
Figura 64. Esquema básico de un resorte de torsión.	132
Figura 65. Diseño de los rines versiones uno, dos y tres.	133

Figura 66. (Izquierda) Diseño definitivo de los rines. (Derecha) Rin original	133
Figura 67. Fuerzas aplicadas en el análisis estructural del rin.	135
Figura 68. Enmallado del modelo 3D del rin analizado.	136
Figura 69. Factor de seguridad a la fatiga	137
Figura 70. Factor de seguridad de los máximos esfuerzos equivalentes	137
Figura 71. Deformación total del rin bajo las cargas aplicadas.	138
Figura 72. Piezas planas que deben ser construidas en CNC	140
Figura 73. Centro de mecanizado <i>CNC LEADWELL V-20</i> .	140
Figura 74. Estrategia general de mecanizado.	142
Figura 75. Resultado del mecanizado aplicando la estrategia propuesta.	142
Figura 76. Distribución de las piezas para el primer montaje.	143
Figura 77. Distribución de las piezas para el segundo montaje.	143
Figura 78. Distribución de las piezas para el tercer montaje.	143
Figura 79. Sujeción de la platina por medio de uñas y tornillo.	144
Figura 80. Fórmulas utilizadas en los cálculos de velocidades de corte en escariadores. Fuente: catálogo <i>Melin tool company</i> .	147
Figura 81. Tolerancia del agujero de la chumacera.	150
Figura 82. Procedimiento para importar la geometría desde <i>MasterCAM</i> .	151
Figura 83. Resultado final de las simulaciones de los montajes uno (izquierda) y dos (derecha).	151
Figura 84. Proceso de fabricación de los rines.	152
Figura 85. Modelo para la fundición de las masas base construido en resina.	153
Figura 86. Resultado del proceso de pre mecanizado de las piezas en torno convencional	154
Figura 87. Sujeción de las masas pre-mecanizadas de los rines por medio de una prensa de mordazas radiales	156
Figura 88. Operaciones de mecanizado de los rines.	157

Figura 89. Aspecto de la pieza después de los taladrados (izquierda) y después de abrir las ventanas grandes y hacer el vaciado en la parte central (derecha).	158
Figura 90. Resultado de la simulación del programa de mecanizado de los rines.	159
Figura 91. Montaje en torno convencional para mecanizado final de los rines.	159
Figura 92. Montaje de los rines en torno para su mecanizado final.	160
Figura 93. Aspecto final del rin después de todas las operaciones de mecanizado.	161
Figura 94. Proceso de construcción de los engranajes del diferencial.	163
Figura 95. Rotura de la platina de aluminio de 1/8" al hacer un dobléz a 90°.	167
Figura 96. (Izquierda) Dispositivo utilizado para doblar las platinas de aluminio. (Derecha) Platina de aluminio de 1/8" doblada.	168
Figura 97. Proceso de fabricación de la carcasa en fibra de vidrio.	169
Figura 98. Etapas dos y tres del proceso de fabricación de la carcasa.	169
Figura 99. Aspecto final de la carcasa sobre la estructura del chasis.	170
Figura 100. Orden de montaje de los componentes del sistema de locomoción.	171
Figura 101. Sub-conjunto tracción dirección. En total son cuatro subconjuntos similares al mostrado.	172
Figura 102. Subconjunto rueda central derecha.	172
Figura 103. Ensamble estructura cuerpo central del robot	173
Figura 104. Ensamble subconjunto lado izquierdo del sistema de locomoción.	173
Figura 105. Diseño del ensamble del subconjunto lado derecho.	173
Figura 106. Ensamble de los tres subconjuntos principales que conforman el sistema de locomoción.	174
Figura 107. Ensamble final del sistema de locomoción y la carcasa.	174

Figura 108. Esquema general de subsistemas.	177
Figura 109. Sensor GP2Y0A02YK, Sharp.	179
Figura 110. Elementos principales del sensor GP2Y0A02YK.	180
Figura 111. Diagrama de bloques del sistema interno del sensor GP2Y0A02YK ⁵⁰ .	181
Figura 112. Curva Característica tensión-distancia del sensor GP2Y0A02YK.	181
Figura 113. Sensor de ultrasonido SRF02 ⁵¹	183
Figura 114. Característica de emisión acústica del SRF02.	183
Figura 115. Brújula CMPS03 ⁵²	189
Figura 116. GPS Garmin Etrex.	191
Figura 117. GPS BR305.	191
Figura 118. Modulo GPS ET-102.	191
Figura 119. GPS EM-406	195
Figura 120. Modulo Xbee Pro.	198
Figura 121. Esquema de la etapa de potencia	200
Figura 122. Esquema interno del puente H L6225.	201
Figura 123. Batería tipo pack Tenergy.	206
Figura 124. Regulador conmutado PTH08080W.	207
Figura 125. Tensión de salida sensor GP2Y0A02YK.	208
Figura 126. Tensión de salida filtrada sensor GP2Y0A02YK.	209
Figura 127. Esquema de filtro RC implementado.	210
Figura 128. Esquema de filtro RC implementado.	211
Figura 129. Aproximación mediante segmentos de recta de la característica del sensor.	213
Figura 130. Característica de la función programada para la obtención de distancia.	214
Figura 131. Conexión de bus I2C para sensor SRF02.	216
Figura 132. Trama de datos I2C para la escritura de registro.	217
Figura 133. Trama de datos I2C para la lectura de la medida registrada.	217

Figura 134. Secuencia de datos para la lectura del ángulo de la CMPS03.	219
Figura 135. Conexión GPS EM406A a puerto UART1 de Atmega128.	221
Figura 136. Esquema de enlace inalámbrico.	223
Figura 137. Hardware de prueba de enlace inalámbrico.	224
Figura 138. Segundo prototipo de Hardware para enlace inalámbrico	225
Figura 139. Esquema eléctrico de implementación del L6225.	226
Figura 140. Circuito impreso de control de potencia.	227
Figura 141. Salida de PWM según temporizador.	228
Figura 142. Tarjeta de control preliminar.	230
Figura 143. Layout de la board.	230
Figura 144. Indicación de Componentes de la unidad de control	231
Figura 145. Esquema eléctrico de la tarjeta de control diseñada.	232
Figura 146. Esquema de circuito oscilador con cristal.	233
Figura 147. Distribución de pines de programación ISP.	234
Figura 148. Esquema de circuito programador.	235
Figura 149. Esquema de conexión para canales de entrada analógica.	235
Figura 150. Asignación de pines en conector de entrada analógica o digital.	236
Figura 151. Disposición de conectores en bus I2C.	236
Figura 152. Asignación de pines hacia tarjeta de manejo de potencia de motores.	237
Figura 153. Asignación de pines de puertos UART.	237
Figura 154. Asignación de pines para instalación de pantalla LCD	239
Figura 155. Asignación de pines para la conexión de encoders.	239
Figura 156. Esquema de distribución alimentación principal.	240
Figura 157. Regulación de tensión de 5 V.	241
Figura 158. (Izquierda) Integración de los sensores de percepción de entorno. (Derecha) Junta universal utilizada como soporte de los sensores.	243

Figura 159. Integración del GPS, brújula y Xbee.	243
Figura 160. Integración de las tarjetas de control y potencia.	244
Figura 161. Posición de la batería.	244
Figura 162. Prueba de capacidad de desplazamiento por terrenos inclinados.	249
Figura 163. Inclinación máxima del terreno a través del cual puede subir el robot en función del % PWM.	250
Figura 164. Corriente consumida por motor, mientras sube a través de los terrenos inclinados.	250
Figura 165. Velocidad real del móvil en m/s en función del %PWM.	252
Figura 166. Gráfica de la distancia de frenado en función del %PWM ingresado.	254
Figura 167. Longitud de frenado en función del %PWM ante la señal del sensor de ultrasonido.	256
Figura 168. Distancia de frenado en función del %PWM ante la señal del sensor de infrarrojo.	257
Figura 169. Parada del móvil respecto al este, sur, oeste y norte.	263
Figura 170. Diagrama de flujo general del programa.	270
Figura 171. Estrategia de evasión tipo radar mediante vectores de repulsión.	271
Figura 172. Ruta de navegación efectuada durante la prueba.	272
Figura 173. Fuerzas generadas sobre la barra secundaria al superar un obstáculo.	313
Figura 174. Fuerzas que intervienen en la elevación de la rueda central.	315
Figura 175. Superación del obstáculo con la rueda trasera.	316
Figura 176. Simulación en Working Model 2D del sistema de locomoción seleccionado.	318
Figura 177. Esquema del soporte construido para las pruebas de torque	322
Figura 178. Dinamómetro utilizado para la medición del torque de dirección.	323

Figura 179. Masas utilizadas para simular la carga sobre las ruedas.	324
Figura 180. Elementos utilizados en la prueba de torque de dirección.	324
Figura 181. Evolución de la fuerza aplicada a un objeto en contra de la fuerza de fricción	325
Figura 182. Gráfica de torque VS pesos simulados sobre la rueda	326
Figura 183. Despiece de un servomotor analógico.	331
Figura 184. Posición servo VS ancho del pulso (duración del pulso).	332
Figura 185. Señales y posiciones servos.	333
Figura 186. Regulación de la velocidad del motor por medio de PWM.	334
Figura 187. “Averaging mechanism” o mecanismo de promedio del cuerpo del robot basado en diferencial.	337
Figura 188. “Averaging mechanism” o mecanismo de promedio del cuerpo del robot basado en resortes.	338

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos impuestos por la misión/tareas a desarrollar.	9
Tabla 2. Requerimientos de movilidad y adaptación al terreno.	10
Tabla 3. Requerimientos de adaptación del sistema de locomoción a la robótica	10
Tabla 4. Requerimientos de la confiabilidad esperada del sistema.	11
Tabla 5. Configuración geométrica de las ruedas.	36
Tabla 6. Características del sistema de locomoción de la alternativa 1.	51
Tabla 7. Características del sistema de locomoción de la alternativa 2.	54
Tabla 8. Características del sistema de locomoción de la alternativa 3.	56
Tabla 9. Características del sistema de locomoción de la alternativa 4.	58
Tabla 10. Características del sistema de locomoción de la alternativa 5.	60
Tabla 11. Matriz de selección de la solución.	69
Tabla 12. Calificación cualitativa de las alternativas de solución.	69
Tabla 13. Resultados de los cálculos realizados para determinar el número óptimo de dientes de los engranajes del subsistema de dirección.	91
Tabla 14. Información requerida para la selección de los servos de dirección.	94
Tabla 15. Verificación de interferencia y relación de contacto para engranajes iguales módulo 1 de 10 a 16 dientes.	102
Tabla 16. Fuerza tangencial soportada por los engranajes soles en función de su longitud.	106
Tabla 17. Masas asignadas conocidas y estimadas de algunos componentes del sistema.	110
Tabla 18. Resultados del análisis estático del sistema de locomoción.	113
Tabla 19. Resultados cálculos resistencias al movimiento del móvil.	119

Tabla 20. Características principales de los motores considerados para la tracción.	123
Tabla 21. Herramientas utilizadas.	146
Tabla 22. Datos obtenidos del catalogo consultado para el cálculo de las velocidades de corte de los escariadores.	146
Tabla 23. Velocidades calculadas y utilizadas para los escariadores.	147
Tabla 24. Velocidades de giro de husillo y de avance recomendadas en el catálogo de Blue-Master y las finalmente utilizadas.	149
Tabla 25. Ejes, bujes y acoples requeridos.	164
Tabla 26. Ajustes y tolerancias de ejes, bujes y acoples.	165
Tabla 27. Tabla comparativa de diferentes referencias de sensores infrarrojos.	179
Tabla 28. Tabla comparativa de diferentes referencias de sensores de ultrasonido.	182
Tabla 29. Registros del SRF02.	184
Tabla 30. Comandos del SRF02.	184
Tabla 31. Tabla comparativa entre parámetros de brújulas electrónicas.	188
Tabla 32. Tabla comparativa entre puntajes de brújulas electrónicas según los criterios de selección.	189
Tabla 33. Registros de lectura de la brújula electrónica CMPS03.	190
Tabla 34. Tabla comparativa entre parámetros de los GPS.	192
Tabla 35. Puntajes de diferentes GPS según los criterios de selección.	194
Tabla 36. Tabla comparativa entre parámetros de módulos inalámbricos.	196
Tabla 37. Puntajes de diferentes módulos inalámbricos según los criterios de selección.	197
Tabla 38. Características del Xbee pro.	199
Tabla 39. Puertos requeridos para el control del prototipo.	203
Tabla 40. Tabla comparativa entre diferentes microcontroladores.	204
Tabla 41. Consumo de Potencia de dispositivos a bordo del móvil.	205
Tabla 42. Caracterización (Tensión-Distancia) del sensor GP2Y0A02YK.	212

Tabla 43. Caracterización (Conversión-Distancia) del sensor GP2Y0A02YK.	213
Tabla 44. Comandos de Salida del estándar NMEA.	221
Tabla 45. Segmentación del comando GPRMC.	222
Tabla 46. Asignación de señales de interfase para expansión de memoria.	238
Tabla 47. Capacidad de superación de obstáculos usando los resortes.	246
Tabla 48. Medición del mínimo radio de giro del robot móvil.	248
Tabla 49. Capacidad de subir a través de terrenos inclinados.	249
Tabla 50. Velocidad real del robot en función del % PWM.	251
Tabla 51. Distancia de frenado en función de la velocidad del móvil.	254
Tabla 52. Distancia de frenado en función de la velocidad del móvil al recibir la señal del radar.	256
Tabla 53. Longitud de frenado en función de la velocidad del móvil al recibir la señal del sensor infrarrojo.	256
Tabla 54. Torque real requerido para la dirección. Sin carga útil.	258
Tabla 55. Corrientes consumidas por los diferentes dispositivos a bordo.	259
Tabla 56. Verificación de la precisión del sensor de ultrasonido.	261
Tabla 57. Verificación de la precisión del sensor de infrarrojo.	262
Tabla 58. Variación de la posición global dada por el GPS con el móvil estacionario.	264
Tabla 59. Torque requerido para la dirección de una rueda sobre diferentes superficies.	326
Tabla 60. Operaciones realizadas en el mecanizado de la platina del primer montaje.	359
Tabla 61. Operaciones de mecanizado para la elaboración de los rines en CNC	360
Tabla 62. Resultados de los cálculos realizados para el diseño del resorte de torsión.	361

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Manual del usuario	286
Anexo B. Estudio de la cinemática del sistema de suspensión	312
Anexo C. Estudio del torque requerido para la dirección	322
Anexo D. Servomotores y motores de corriente continua	329
Anexo E. Sistemas para promediar la posición del cuerpo del robot	335
Anexo F. Tablas	340
Anexo G. Listados	359
Anexo H. Planos de los componentes del sistema de locomoción	362

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

L	Longitud, cm.
B	Ancho, cm.
D	Diámetro, cm.
T	Torque, Kgf x cm.
R	Relación de transmisión entre engranajes.
r_a	Radio del círculo de adendo, plg.
c	Distancia entre centros del par de engranajes, plg.
r_b	Radio del círculo base del engranaje, plg.
r	Radio primitivo del engranaje, plg.
a	Adendo del engranaje, plg.
M	Modulo, mm.
Z	Número de dientes del engranaje.
Pb	Paso base, plg.
p	Paso circular, plg.
Y	Factor de forma de Lewis
P	Paso diametral del engranaje, plg.
m	Masa, kg.
F	Fuerza, N.
W	Peso o carga, Kg.
A	Aceleración, m/s^2 .
t	Tiempo, s.
V	Velocidad
Kc	Módulo de cohesión del tipo de suelo en consideración, N/m^{n+1} .
K $_{\phi}$	Módulo de fricción del tipo de suelo en consideración, N/m^{n+2} .

n	Coefficiente de deformación del tipo de suelo en consideración.
Co	Esfuerzo de cohesión del suelo, Pa.
Zew	Hundimiento de la rueda en el suelo, m.
l _w	Longitud del área cargada de la rueda, m.
N _w	Número de ruedas.
Ho	Fuerza de tracción disponible, N.
DP	Draw bar pull, N.
Fre	Fuerza del resorte, Lbf.
E	Módulo de elasticidad, Psi.
Rs	Radio medio del resorte, in.
Na	Número de vueltas de alambre del resorte.
Kf	Factor de concentración de esfuerzos para el resorte.
K	Constante.
Vd	Valor de conversión
Vo	Voltaje de salida

LETRAS GRIEGAS

Φ	Angulo de presión del engranaje, grados.
σ	Resistencia a la fluencia del material, lbf/in ² .
θ	Angulo de inclinación del terreno, grados.
φ	Angulo interno de fricción del suelo, grados.
α	Angulo de aproximación de la rueda, grados.
d	Deformación de la rueda, m.
β	Angulo de deformación del resorte

SUBÍNDICES

1,2 Referido a una transmisión de dos engranajes

r Rueda, ruedas

w Rueda

e Engranaje

t Tangencial

f Final

GLOSARIO

AAV: siglas en inglés de Autonomous Air Vehicle o vehículo aéreo autónomo.

Ambientes poco estructurados: estos ambientes se caracterizan por tener una intervención mínima de la mano del hombre. Un parqueadero de vehículos es un ambiente altamente estructurado. Las zonas verdes dentro de la ciudad, los parques, jardines, terrenos baldíos, son ambientes poco estructurados, pues ha intervenido la mano del hombre pero conservan algo de su estado natural. Los desiertos, montañas, bosques, etc., alrededor de los cuales no existen asentamientos humanos, son terrenos no estructurados pues permanecen en su estado natural.

BOGIES: un bogie es un par de ruedas unidas entre si por medio de una barra rígida, de manera que la distancia entre los centros de las ruedas siempre se mantiene, independiente de la forma que tenga dicha barra.

CMU: Carnegie Mellon University.

CWRU: Case Western Reserve University

EPFL: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

ESA: European Space Agency.

Locomoción peristáltica: se refiere al modo de locomoción de los walking wheels robots con sistema de suspensión activo que le permite modificar la posición de sus elementos para caminar como si tuvieran patas.

MER: Mars Exploration Rovers, así designó la NASA a los robots de exploración que envió a Marte.

Odometria: a odometría es uno de los métodos más ampliamente usados para estimar la posición de un robot. Consiste en llevar un registro de las distancias avanzadas por el robot y los rumbos tomados, teniendo en cuenta el número de vueltas que han girado las ruedas medidos por medio de encoders y los ángulos en los que se han posicionado los servomotores de dirección. Obviamente se deben realizar cálculos con base en la cinemática del móvil para poder obtener la posición del mismo. El inconveniente principal de esta metodología es que su precisión se ve fuertemente afectada por el deslizamiento de las ruedas que tienen los encoders y por el hecho de que los datos se van sumando de forma incremental aumentando el error a medida que aumenta la distancia recorrida por el móvil. Para robots indoors es apropiada debido a que los suelos son planos y uniformes y la posibilidad de que las ruedas sufran deslizamiento es mínima.

PWM: son las siglas en inglés de Pulse Width Modulate o ancho de pulso modulado. Este tipo de señales son útiles en el control de motores de corriente continua y servomotores de corriente continua. Consiste en enviar un tren de pulsos en el dominio del tiempo con pulsos de duración determinada (ancho del pulso) del cual va a depender que el motor gire a mayor o menor velocidad o que el servo se posicione en un ángulo determinado u otro. En el anexo D se explica mejor como se hace el control de estos elementos por medio de este tipo de señales.

Rover: esta palabra se utiliza para referirse a los ground robots utilizados en exploración. Un ground robot se desplaza por el suelo haciendo uso de diferentes mecanismos de locomoción, patas, ruedas u orugas.

Sistema de dirección Ackerman: este sistema es típicamente usado en vehículos de transporte terrestre. La maniobrabilidad es limitada pero da gran estabilidad cuando se está dando giros a altas velocidades.

UGV: siglas en inglés de Unmanned Ground Vehicle o vehículo terrestre no manejado.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO DE EXPLORACIÓN

AUTORES:

Diego Fernando Pineda Quijano.

Fredy Alexander Prada Largo.**

PALABRAS CLAVES:

Robótica autónoma, locomoción, posicionamiento, orientación, percepción de entorno, sensores, comunicación inalámbrica.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es dotar a la Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander, de una plataforma robótica que pueda utilizarse como herramienta de trabajo en un laboratorio de robótica móvil, tanto para la enseñanza y práctica, como para la investigación.

El robot se diseñó con base en requerimientos de diseño preestablecidos y clasificados sistemáticamente para cubrir todos los aspectos relacionados con el desempeño esperado del mismo. El diseño CAD fue desarrollado utilizando **SolidWorks**, los análisis estructurales se hicieron en **Ansys Workbench** y la manufactura fue asistida por **MasterCAM**. El diseño de las tarjetas electrónicas fue realizado utilizando **Eagle Layout**, la programación de las librerías que facilitan el control del robot y los programas de prueba se hicieron en **AVR Studio** y la configuración del modulo **Xbee pro** de comunicación inalámbrica se hizo mediante la aplicación **X-CTU** de Digi-MaxStream.

El resultado es un prototipo de robot móvil explorador con un sistema de locomoción apto para permitir su desplazamiento a través de ambientes externos poco agrestes, con capacidad de superar ciertos obstáculos y alta maniobrabilidad y estabilidad, un sistema de control basado en el microcontrolador ATmega 128 de ATMEL, capaz de recibir y procesar las señales recibidas de sus periféricos a través de buses de comunicación I2C, SPI, puertos de conversión analógica, puertos UART y puerto de expansión y de generar las ordenes al sistema de locomoción. El sistema de control permite la implementación de programas de navegación autónoma gracias a la utilización de un modulo de GPS para posicionamiento, una brújula electrónica para orientación y sensores de ultrasonido e infrarrojo para percepción del entorno. También permite el intercambio de datos entre el móvil y una estación remota de supervisión o control, por medio del modulo Xbee pro de comunicación inalámbrica.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Ing. Carlos Borrás, Ing. Jaime Barrero.

SUMMARY

TITLE:

AUTONOMOUS MOBILE EXPLORER ROBOT PROTOTYPE, DESIGN AND MANUFACTURING*

AUTHORS:

Diego Fernando Pineda Quijano.

Fredy Alexander Prada Largo**

KEY WORDS:

Autonomous robotics, locomotion, positioning, orientation, environment perception, sensors, wireless communication.

DESCRIPTION:

The target of this project is to provide to the Physical - Mechanical Engineering Faculty of the Universidad Industrial de Santander, a robotics platform which can be used like a tool work into a mobile robot laboratory, in teaching, practice and researching.

The design of the robot was made based on preestablished design requirements, which were systematically classified to cover all related aspects of the desired performance. The CAD design was developed using **SolidWorks**, structural analyses were made in **Ansys Workbench** and the manufacturing was assisted by **MasterCAM**. Circuit boards were designed using **Eagle layout**, the programming of the libraries which make easier the control of the robot and the test programs, were made in **AVR Studio** and the configuration of the Xbee pro, wireless communication module, was made by mean of **X-CTU**, application from Digi-MaxStream.

The result is a mobile explorer robot prototype, which has the following features: locomotion system to displace throughout outdoors rugged environments, skills to overcome obstacles, high maneuverability and stability. It also has a control system based in ATmega 128 micro controller from ATMEL, which enables the receipting and processing of received data from peripheral systems through communication buses like I2C, SPI, analogic conversion ports, UART ports and expansion port. The control system designed is also able to generate orders to the locomotion system and it lets the implementation of autonomous navigation programs by mean of GPS for positioning, digital compass for orientation and infrared and radar for environment perception. The mobile also has a wireless communication system based in Xbee pro, to interchange data with a remote supervision or control station.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Electricity, Electronic and Telecommunications Engineering School, Eng. Carlos Borrás, Eng. Jaime Barrero.

INTRODUCCIÓN

La robótica es una disciplina emergente en la academia nacional, estimulada por algunos eventos interuniversitarios. A nivel industrial ha sido poco trabajada dado los altos costos de instalación y puesta en marcha y el bajo volumen de producción que manejan las empresas. Sin embargo, en aras del desarrollo tecnológico de nuestro país y en vista de las políticas económicas que se avecinan, la industria nacional debe adoptar nuevas tecnologías que la hagan más competitiva internacionalmente. Esto será impulsado por los nuevos ingenieros egresados que tendrán la visión del desarrollo tecnológico dada por el conocimiento y claridad acerca de las capacidades, prestaciones y ventajas de implementar los sistemas robóticos y automáticos en los procesos industriales.

El presente proyecto planteó el diseño y construcción de una plataforma mecánica, hardware y software de control, para el desarrollo y crecimiento teórico y práctico en el área de la robótica móvil en estudiantes de pregrado, como un desarrollo propio para disminuir la dependencia tecnológica que existe con países desarrollados. El resultado fue un prototipo de robot móvil autónomo que puede desplazarse en terrenos irregulares y con texturas cambiantes propias de ambientes exteriores poco agrestes. Además, cuenta con sistemas de percepción del entorno y sistemas de posicionamiento que le permiten desarrollar tareas de exploración y navegación autónoma según los algoritmos planteados por quienes lo operen con fines académicos y de investigación.

El uso de plataformas robustas de hardware y software facilitan el proceso de aprendizaje e investigación en robótica, dirigiendo los esfuerzos a la implementación de algoritmos de control inteligente, que exploten las prestaciones mecánicas y de instrumentación de las mismas.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se hará un recuento de los objetivos propuestos, el contexto de aplicación y el enfoque planteado para el prototipo y se evaluarán los requerimientos y parámetros que serán pauta para las fases de diseño.

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la Universidad Industrial de Santander pocos estudiantes de ingeniería desarrollan competencias suficientes en diseño, construcción, programación y mantenimiento de dispositivos robóticos, lo que reduce su capacidad para afrontar la llegada de nuevos equipos con estas tecnologías a las industrias de nuestro país.

Esta problemática se debe a las falencias que existen en la universidad en la preparación de los estudiantes en temáticas de actualidad como la robótica y afines. Una de las razones por las cuales ocurre esto, es la ausencia de cursos formales en robótica y control dinámico. De igual manera se carece de herramientas que permitan realizar un aprendizaje teórico y práctico acerca de los diferentes componentes y sistemas que conforman o intervienen en la implementación de la robótica. Es necesario contar con plataformas de desarrollo cuya parte mecánica sea confiable, con hardware y software de control para facilitar la programación, que sean aptas para la enseñanza y la investigación a nivel universitario y que permitan al usuario concentrarse en el desarrollo de algoritmos de inteligencia.

Actualmente existen en la universidad dos grupos de investigación en robótica, DICBOT (Dinámica Control y Robótica) de la Escuela de Ingeniería Mecánica y ERA (Electrónica y Robótica avanzada) de la Escuela de

Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones que requieren de mejores herramientas que faciliten su labor en la investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Ingenieros y científicos de todo el mundo están abordando diversos campos de investigación en busca de mayores prestaciones, eficiencia, rendimiento y nuevas aplicaciones para los robots. En Colombia se está viendo el interés de algunas instituciones educativas por este tema, en parte debido a la introducción de dispositivos robóticos en algunas industrias, hecho que ha planteado la necesidad de personal capacitado para su manejo.

A nivel académico, la práctica sobre plataformas robóticas de carácter didáctico utilizadas como material de apoyo en la enseñanza, despierta el interés y estimula el desarrollo de habilidades en los estudiantes de diversas disciplinas como Ingeniería Electrónica, Mecánica, Sistemas y Diseño Industrial, en temas como la programación, el control digital, la sensórica, el diseño, entre otros. Muchas veces el aprendizaje de estos temas se convierte en algo tedioso y poco didáctico, pues el método de enseñanza se basa en el estudio de textos, presentaciones teóricas y exámenes para comprobar si hubo una asimilación de los conceptos. Por el contrario, al enfrentarse a un sistema robótico el estudiante automáticamente siente una motivación hacia el aprendizaje, propiciada por la satisfacción y orgullo que obtiene cuando logra un funcionamiento adecuado del robot. El control de dispositivos robóticos plantea numerosos retos al estudiante, pues este debe analizar y prever diversas situaciones a las que puede verse enfrentado el aparato, tener la creatividad para determinar varias estrategias o comportamientos por medio de los cuales se puedan sortear tales situaciones y revisar conceptos para encontrar solución a los problemas que surgen durante las pruebas de las estrategias planteadas.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivos Generales

- Elaborar un prototipo de robot móvil autónomo de tipo explorador, como plataforma de desarrollo y material de apoyo en la práctica y/o investigación de la robótica y temas afines, dirigida a estudiantes de la Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas interesados en esta línea de investigación.
- Contribuir con el desarrollo de la línea de investigación en robótica dentro de la escuela de Ingeniería Mecánica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir una plataforma de desarrollo, que sirva como herramienta de trabajo en la práctica y la investigación de la robótica móvil autónoma a nivel de educación superior, con las siguientes características:
 - ❖ Capacidad de desplazamiento por medio de ruedas, sobre terrenos semiplanos con pendientes inferiores a los 30° y suelos de arena, grama, tierra, asfalto y concreto con poca densidad vegetal y rocosa, propios de ambientes exteriores no agrestes; además, en climas con temperaturas inferiores a los 60°C y humedad relativa inferior al 92%.
 - ❖ Un sistema de percepción sensorial del entorno que le brinde la capacidad de hacer evasión de obstáculos y que lo apoye en la navegación y la planeación de trayectorias de manera autónoma.

- ❖ Un sistema de posicionamiento que le permita ubicarse en el espacio explorado con un error menor o igual a 5 m.
 - ❖ Comunicación inalámbrica bidireccional con una estación remota de supervisión.
 - ❖ Dimensiones no superiores a 60X40X40 cm³, por tratarse de un prototipo con fines académicos.
-
- Diseñar e implementar una unidad de control reprogramable donde se procesen las señales generadas por los sistemas de interacción del prototipo con el ambiente y se emitan ordenes a los diferentes subsistemas (locomoción, comunicación y visualización). Con la disposición de puertos para comunicación con los periféricos seleccionados, con capacidad de expansión mediante buses de transmisión de datos y con la capacidad de procesamiento requerido para ejecutar algoritmos básicos de navegación autónoma.
 - Desarrollar y programar las funciones necesarias para adquirir información de los dispositivos periféricos (sensores para la detección de obstáculos, dispositivos de posicionamiento y orientación y módulo de comunicación inalámbrica) y para generar las acciones de control sobre el móvil, que faciliten al usuario la programación de sus algoritmos de prueba.
 - Implementar un módulo de comunicación inalámbrica bidireccional para el transporte de datos desde la unidad de control del móvil hacia una central de supervisión remota y viceversa.
 - Diseñar un manual que permita al usuario conocer el funcionamiento del prototipo, sus características básicas y sus posibles aplicaciones.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Varias compañías producen y comercializan productos dirigidos al aprendizaje y desarrollo de la robótica. En algunos casos, las universidades hacen uso de estos dispositivos disponibles en el mercado, pero lo ideal es que la práctica e investigación comience desde la concepción del sistema o la plataforma como tal y se extienda a la investigación y el desarrollo de los algoritmos de control. Es importante y de mucho valor la experiencia que se adquiere durante el desarrollo de la parte física del robot. Adicionalmente, al construir una plataforma propia se buscaba también limitar la dependencia tecnológica que se tiene con los países desarrollados y demostrar que se cuenta con los conocimientos y el talento humano necesarios para la realización de dispositivos de este tipo.

Con este robot se tendrá la posibilidad de realizar prácticas en espacios abiertos, además de las que puedan ser implementadas en el interior de un salón o laboratorio, para desarrollar diferentes actividades de navegación autónoma, evasión de obstáculos, posicionamiento, etc. y para hacer más agradable el proceso de aprendizaje.

1.5 ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Se hizo una clasificación de los requerimientos del problema en tres tipos: requerimientos para la manipulación del robot, requerimientos funcionales y requerimientos técnicos.

1.5.1 Requerimientos para la manipulación del robot. Debe considerarse la practicidad que debe ofrecer al usuario en el reconocimiento de los diferentes módulos o subsistemas que integran el prototipo y la forma como

se interconectan, además de las características técnicas, mecánicas, eléctricas, de procesamiento, etc. Además deben darse a conocer en un manual de usuario las posibilidades de locomoción, conexión de instrumentación y expansión. De igual manera debe ser flexible al momento de implementar configuraciones sensoriales para la evasión de obstáculos y poseer el espacio y base física para el montaje de dispositivos (manipuladores, instrumentación electrónica, cámaras, etc.) necesarios en futuras aplicaciones específicas.

1.5.2 Requerimientos funcionales. El prototipo en su presentación básica debe permitir la implementación de las siguientes aplicaciones:

A. Ejecución de rutas predefinidas: el móvil realiza movimientos con velocidades y direcciones controladas describiendo rutas previamente definidas por el usuario según el algoritmo programado.

B. Detección de objetos y mapeo: el móvil detecta la presencia y posición (respecto a él) de objetos cercanos mediante el uso de diferentes tipos de sensores de distancia. Realiza un mapa digital del entorno efectuando un barrido tipo radar con un sensor de distancias que toma muestras periódicamente mientras rota. Esto será la herramienta principal en la caracterización del entorno y la implementación de metodologías de evasión de obstáculos y planeación de trayectorias.

C. Posicionamiento y orientación: realiza la lectura y almacenamiento periódico de su orientación y posición respecto al terreno explorado, de tal manera que puede desplazarse a diferentes puntos de interés definidos por el usuario.

D. Transmisión y recepción de datos: envía datos adquiridos de sus dispositivos de percepción y demás sistemas a una central remota, además

puede recibir datos que le permitan realizar acciones específicas frente a situaciones inesperadas.

E. Navegación autónoma: esta aplicación puede abarcar las anteriores ya que debe desplazarse en ambientes poco controlados realizando evasión de obstáculos, enviando periódicamente datos de sus sensores, sistemas de percepción y ubicación a la central de supervisión, posicionándose en puntos de interés de su exploración o misión y ejecutando algoritmos de navegación y planeación autónoma.

1.5.3 Requerimientos técnicos. Estos requerimientos definen las especificaciones de diseño de la plataforma mecánica o sistema de locomoción y de la plataforma electrónica.

A. Plataforma Mecánica: los requerimientos de diseño del sistema de locomoción se clasifican en cuatro categorías: misión o tareas a ejecutar, movilidad y adaptación al terreno, adaptabilidad a la robótica y confiabilidad. Existe una tabla para cada categoría en las cuales son clasificados y consignados los aspectos relacionados con el desempeño esperado del móvil, cualitativa o cuantitativamente¹.

Los requerimientos impuestos por la misión y tareas que debe desempeñar el robot son diferentes para cada aplicación. Los requerimiento de movilidad y adaptabilidad a la robótica, incorporan datos similares para una amplia variedad de aplicaciones¹. Las tablas uno a cuatro clasifican los diferentes requerimientos del sistema de locomoción en las categorías antes mencionadas.

¹ APOSTOLOPOULOS, Dimitrios. "Systematic configuration of robotic locomotion". Reporte: CMU-RI-TR-96-30. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Pittsburg, (US): Jul 1996.

Tabla 1. Requerimientos impuestos por la misión/tareas a desarrollar.

Requerimientos impuestos por la Misión/tareas del móvil	Configuración de los requerimientos del sistema de locomoción
Facilidad para ser levantado y trasladado dentro del campus por una persona. masa, volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Masa del robot dentro de los límites recomendados para transporte de pesos. - Dimensiones antropométricas de la población universitaria para delimitar las medidas del móvil (Objetivos).
Tracción sobre suelos de diferentes tipos.	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de desplazamiento sobre: grama, tierra suelta y compacta, arena, grava, concreto y asfalto.
Prácticas de laboratorio e investigaciones.	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de trasportar 2 kg de carga útil. - Espacio para el transporte de la carga útil.
Controlabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustes precisos - Evitar deslizamientos de las ruedas - Motores feedback: deseable - Alineación manual de las ruedas de dirección: deseable. - Funcionamiento autónomo o teleoperado.
Exploración a través del campus universitario.	<ul style="list-style-type: none"> - Movilidad/Adaptación al terreno (tabla 2). - Funcionamiento mínimo de una hora.

La velocidad máxima del móvil debe ser 100 cm/s que es adecuada cuando el móvil sea controlado remotamente por un operador y para funcionamiento autónomo si se utilizan sensores de largo alcance para detección de los obstáculos. Se desea además que el móvil navegue en **ambientes exteriores no agrestes y poco estructurados** superando obstáculos como escalones, piedras o palos de hasta 10 cm de altura y que pueda desplazarse sobre terrenos con pendientes de hasta 15°. Como no se puede

esperar que el robot sea capaz de superar todos los obstáculos que se encuentre dado su tamaño reducido, se establecen límites máximos de tal forma que se abarque un amplio espectro de terrenos y obstáculos que puede encontrar en el espacio que va a explorar (campus universitario).

Tabla 2. Requerimientos de movilidad y adaptación al terreno.

Requerimientos de movilidad y adaptación al terreno	Configuración de los requerimientos del robot móvil autónomo
Movilidad Velocidad, frenado.	- Velocidad máxima (tele-operado): 1 m/s - Max distancia de frenado: 20 cm
Superación de obstáculos	- Máx. altura de escalón superable: 10 cm - Mín. separación del cuerpo al piso: 15 cm
Maniobrabilidad a través de terrenos no estructurados.	- Mínimo radio de giro: 0,75 m - Capacidad de giro sobre su eje: deseable.
Movilidad en terrenos con pendientes: <i>hacia arriba, hacia abajo, a través.</i>	- Debe subir y bajar pendientes de 15°. - Navegar transversalmente por terrenos con pendientes de 25°. - Mantener estabilidad estática sobre terrenos de 30° de pendiente en cualquier dirección.

Tabla 3. Requerimientos de adaptación del sistema de locomoción a la robótica

Adaptación del sistema de locomoción a la robótica	Configuración de los requerimientos del robot móvil autónomo
Sensores sin interferencias	- El campo de visión de los sensores para la observación del terreno no debe ser obstruido por elementos de la estructura del robot. - Los movimientos de la estructura, dirección o suspensión, no deben interferir con los

	<p>sensores.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se deben minimizar al máximo las vibraciones del sensor: evitar resortes que hagan vibrar los sensores
Superación del terreno con mínima percepción y planeación	<ul style="list-style-type: none"> - Maximizar la adaptación al terreno minimizando la complejidad en el control. - Limitar o eliminar la planeación en la postura del cuerpo del móvil. Sistema de suspensión pasivo. - Maximizar la percepción del terreno minimizando las maniobras de circunnavegación. Sensores con movimiento.
Respuesta a la ejecución de las trayectorias planeadas	<ul style="list-style-type: none"> - Mínima distancia de percepción: 0,05 m - Velocidad máx. de travesía: 1 m/s.

Tabla 4. Requerimientos de la confiabilidad esperada del sistema.

Requerimientos de confiabilidad	Configuración de los requerimientos del robot móvil autónomo
Durabilidad de los componentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar los puntos de desgaste.
Ajuste de piezas móviles y fijas.	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad en el armado y desarmado de los componentes para limpieza y/o mantenimiento, ajustes forzados suaves.
Simplicidad en el diseño y construcción. Minimizar costos, facilidad en la reproducción del móvil, rapidez y facilidad en el montaje	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar el número de piezas. - Evitar diseños complicados. - Evitar uniones soldadas - Utilizar elementos estándar (servos, motores, rodamientos, tornillos, etc)

B. Plataforma Electrónica: a continuación se presentan los requerimientos de diseño de los sistemas eléctricos y electrónicos del robot.

- **Abastecimiento:** debe poseer una fuente de energía que provea a todo el sistema y pueda darle la posibilidad de realizar jornadas de prueba de cómo mínimo 1 hora de duración. Además debe entregar las tensiones y corrientes de forma que sea compatible con los diferentes dispositivos a implementarse, los cuales son dispositivos digitales, sensores y módulos de comunicación, los cuales poseen tensiones de polarización de 3,3 V y 5 V DC típicamente. También debe manejar el nivel de potencia requerido por el sistema de locomoción.

- **Locomoción:** debe tener la capacidad de controlar la velocidad de los motores de tracción y el ángulo de los servomotores de dirección.

- **Detección de Objetos:** debe poseer diferentes sensores que le permitan detectar presencia y calcular distancia a objetos en su trayectoria, es indispensable que estos dispositivos sean compactos (tamaño menor a $6 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$), de baja potencia (menor a 200 mW) y que requieran niveles de tensión compatibles con la fuente a bordo del móvil. El alcance requerido debe ser como mínimo correspondiente a la velocidad máxima del móvil por el tiempo que tarda en reaccionar ante la detección de bloqueo de su trayectoria.

- **Posicionamiento:** debe incorporar dispositivos que le permitan obtener frecuentemente su orientación y posición con referencia a la zona de exploración. Por tratarse de un vehículo con fines de exploración y reconocimiento es importante que el área de operación no requiera ser modificada severamente. Por tratarse de un prototipo funcional y con fines académicos no es indispensable una alta precisión y eficiencia en los sistemas de posicionamiento y orientación implementados.

- **Comunicación inalámbrica:** deben ser módulos transmisor-emisor que manejen comunicación serial full dúplex, con velocidades de transmisión y niveles estándar compatibles con los puertos del computador (RS232, USB), tamaño reducido (menor a $7 \times 7 \times 7$ cm³), en lo posible antena integrada y bajo consumo de potencia (menor a 600 mW). Con alcance de por lo menos 50 m lo que permitiría monitorear su comportamiento en la exploración de los alrededores de un edificio o zona verde de la universidad.

- **Unidad de procesamiento y control:** debe ser compacta, reprogramable donde se procesen las señales generadas por los sistemas de interacción del prototipo con el ambiente y se emitan ordenes a los diferentes subsistemas. Con la disposición de puertos para comunicación con los periféricos seleccionados, con capacidad de expansión mediante buses de transmisión de datos y con la capacidad de procesamiento requerido para ejecutar algoritmos básicos de navegación autónoma.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 Definición. La robótica es una tecnología multidisciplinaria que reúne de manera concurrente conocimientos de ciencias aplicadas como, la ingeniería de sistemas, la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, la ingeniería de control y la inteligencia artificial, dirigidos al diseño y la construcción de máquinas o artefactos que realizan tareas específicas sin la intervención directa del hombre, mejor conocidos como robots. Hay quienes definen a la robótica de una manera más simplista como una ciencia que se ocupa del estudio, desarrollo y aplicaciones de los robots.

2.1.2 Historia. El termino robot fue introducido en 1921 por el escritor checo Karel Capek en su obra “Rossum’s Universal Robots” para referirse a una máquina con la morfología de un humano. “Robot” en checo viene de la palabra “robota” que significa esclavo². Inicialmente esta palabra hacia referencia a máquinas al servicio del hombre, que imitaban su forma y sus capacidades, pero años después se fue generalizando el uso de este término para referirse a nuevas máquinas de otra morfología pero con capacidades similares a las ya conocidas, que reemplazaran al hombre en diversas tareas.

La robótica nació del deseo humano de construir una máquina a su imagen y semejanza que pudiera controlar a su gusto y que le obedeciera, sin problemas, en la realización eficiente de tareas cotidianas. Durante los siglos XVIII y XIX aparecieron varios autómatas con forma de humano que imitaban

² INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA. Historia de la robótica [en línea]
<www.depi.itch.edu.mx>

alguna función específica como escribir, dibujar, tocar algún instrumento o reproducir melodías y que funcionaban usando únicamente elementos mecánicos y además eran reprogramables. A principios del siglo XX Nikola Tesla diseñó robots que trabajaban con energía eléctrica, pero sin mucha funcionalidad y nada de inteligencia. Durante el periodo de la primera y segunda guerra mundial el desarrollo de este tipo de máquinas fue muy pobre pues todo el conocimiento científico estaba dirigido a la milicia y la tecnología con la que se contaba era muy básica, sin embargo, el deseo de construirlas seguía latente. Todos los adelantos tecnológicos logrados en estos años gracias a la ingeniería militar, el surgimiento de las computadoras y los avances en ciencias como la matemática y la física contribuyeron a la aparición de nuevos robots a partir de 1945, gracias al trabajo desarrollado por numerosas universidades principalmente en Estados Unidos. El interés se centro en robots móviles e industriales que tenían mayores aplicaciones e implicaban menores esfuerzos en cuanto a su concepción y construcción y se adaptaban mejor a la tecnología de la época. La industria automotriz impulso ampliamente la producción en serie de robots industriales. La mayoría carecían de inteligencia y por lo general eran tele-operados o programados para realizar ciclos fijos de trabajo. En los años 60's fueron utilizados algunos móviles en reconocimiento de zonas contaminadas y algunas otras aplicaciones que implicaban diseños que se adaptaran a cada una de las tareas y ambientes en los cuales estas se desarrollaran. Paralelamente, en centros de investigación como el MIT, Standford University, John Hopkins University y el Instituto de Robótica de Carnegie Mellon University recién fundado, se empezaron a desarrollar estudios en el campo de la inteligencia artificial atrayendo el interés de muchos ingenieros y científicos, quienes centraron su trabajo en el desarrollo de sistemas que dotaran a los robots de un grado de inteligencia que les permitiera tener autonomía en la forma en que reaccionan frente a situaciones no controladas de su entorno. En consecuencia aparecieron los llamados robots autónomos.

El calificativo autónomo se debe a la capacidad de percibir, modelar y actuar para alcanzar unos objetivos, sin la intervención humana.

2.1.3 Estado del arte. Actualmente, la mayoría de las investigaciones se centran en el desarrollo de software de control para hacer más eficiente el funcionamiento de robots autónomos de diversas morfologías, preferiblemente AAV y UGV y robots antropomórficos o humanoides. Algunas otras investigaciones buscan desarrollar estructuras robóticas para aplicaciones especiales, militares o civiles. También se están empleando técnicas de programación como los algoritmos genéticos y las redes neuronales, pretendiendo emular en los robots el proceso de aprendizaje humano. Otras investigaciones buscan enseñarle a los robots a actuar cooperativamente entre ellos y a interactuar con los humanos.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

Dada la infinidad de robots que han aparecido a lo largo de la historia y de la gran variedad de formas, tipos, aplicaciones, características y prestaciones, se hizo necesario hacer una clasificación para facilitar la caracterización de cualquiera de ellos y evitar confundirlos con máquinas similares. El mapa conceptual mostrado en la figura 1 resume las diferentes maneras en las que pueden ser clasificados los robots y establece las relaciones más importantes entre las diferentes clases existentes. Por ejemplo, los robots que son utilizados en exploración tienen morfología tipo vehículo, zoomórfica o híbrida. Los robots con aplicaciones industriales son los poliarticulados y cartesianos.

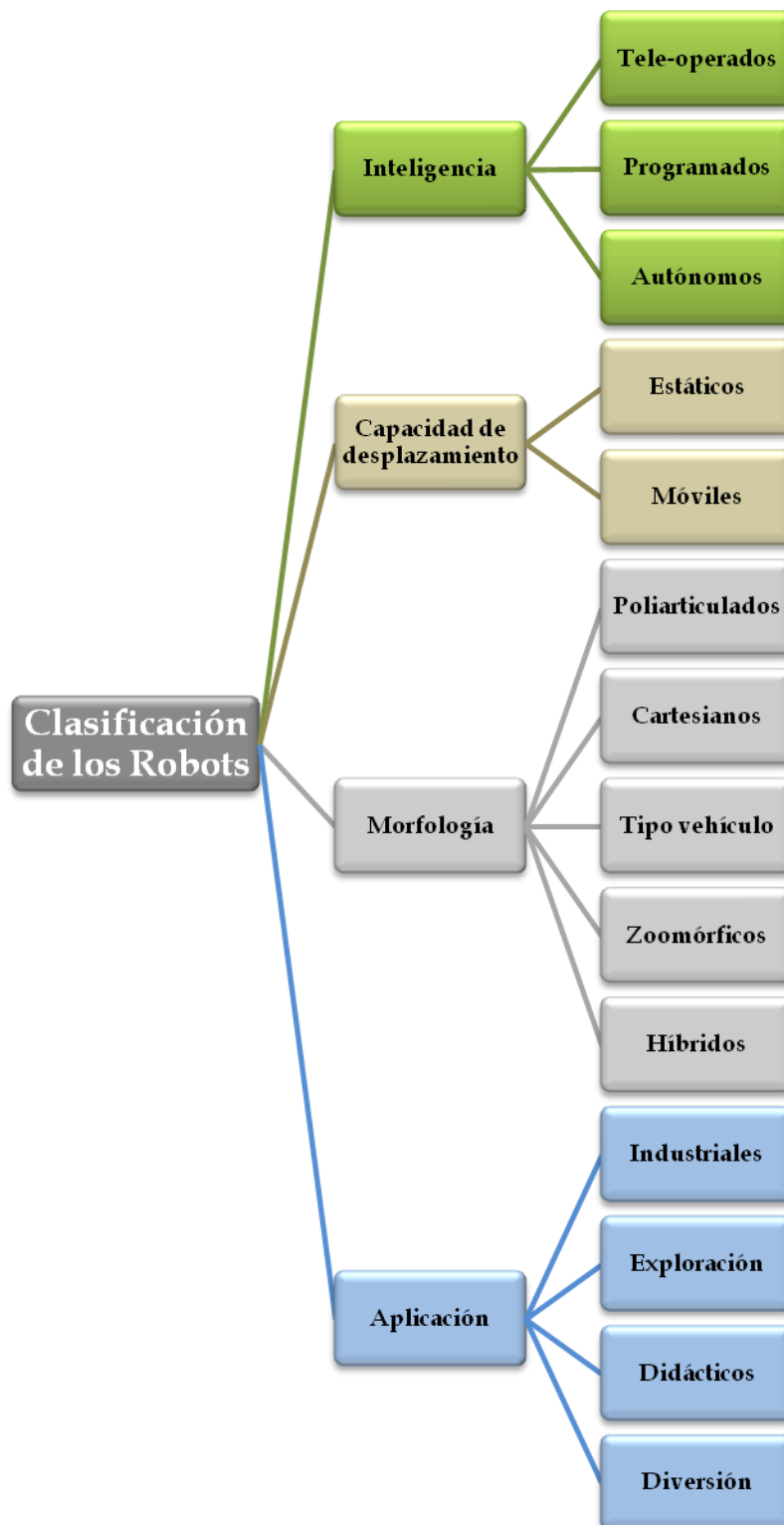


Figura 1. Clasificación de los robots.

2.2.1 Según su grado de inteligencia. Se clasifican en:

A. Control manual o Tele-operados: son robots que requieren de un operador humano para realizar la tarea para la cual fueron diseñados. Carecen por si solos de conocimiento de su entorno y sus movimientos dependen exclusivamente de las ordenes dadas por su operador. La comunicación con la estación de control puede hacerse por diferentes tipos de enlace inalámbrico e incluso haciendo uso redes de telefonía móvil como en el H2X HUMMER³, o por medio de un cable como en algunos robots submarinos como Swordfish⁴.

B. Programables: carecen de conocimiento de su entorno, tienen un programa que repiten cíclicamente para realizar su función. La mayoría de los robots industriales poliarticulados y cartesianos son de este tipo. Las trayectorias de movimiento son predefinidas y programadas. No responden satisfactoriamente ante cambios inesperados de su entorno.

C. Autónomos: poseen los elementos básicos y funciones de un sistema de control retroalimentado con la capacidad de adquirir datos de su entorno por medio de sensores, hacer la adaptación (amplificarlas, rectificarlas, filtrarlas) y el procesamiento de las señales provenientes de dichos sensores y emitir señales a los actuadores. El procesador tiene grabado un programa que le permite al robot tomar decisiones en respuesta a las variaciones que le impone su entorno y readaptar sus funciones. No interviene la mano de un operador, el cual es reemplazado por el programa que gobierna el funcionamiento del robot.

³KUNTSEVICH, Sergey y BEKKER, Dmitriy. "H2X - HUMMER H2 EXPLORER AUTONOMOUS DUAL NAVIGATION SYSTEM VEHICLE". Rochester Institute of Technology, New York, USA, 2006.

⁴ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, ESPAÑA. Swordfish [en línea] <http://www.mapa.es/en/pesca/pags/vizconde_web/novedades.htm#inicio>

La pirámide de la figura 2 esquematiza el desarrollo que ha tenido la robótica, empezando por la robótica tele-operada, trabajada desde el inicio o aparición de los primeros robots, hasta el punto de convertirse en una tecnología madura. Casi de la misma época es la tecnología programada utilizada ampliamente en robots industriales. En la punta de la pirámide están los robots autónomos sobre los cuales se están desarrollando la mayoría de las investigaciones hoy en día.



Figura 2. Clasificación de los robots según su grado de inteligencia

2.2.2 Según su capacidad de movimiento. Se clasifican en estáticos y móviles.

A. Estáticos: la mayoría de robots industriales poliarticulados y cartesianos son de este tipo. Trabajan en un espacio limitado en el que son instalados y están anclados al suelo. No poseen un mecanismo de locomoción.

B. Móviles: poseen un mecanismo de locomoción que les permite desplazarse en un espacio determinado para realizar su tarea o misión. Pueden estar diseñados para desplazarse sobre el suelo, en el agua o en el aire. Pueden ser autónomos, programados o tele-operados. Generalmente pueden comunicarse inalámbricamente con una estación remota de control o supervisión, aunque en algunos casos específicos como los submarinos o

robots antiexplosivos, pueden utilizar algún tipo de cable para la comunicación.

2.2.3 Según su morfología. Un robot se caracteriza por poseer un cuerpo de cierta morfología que le brinda la capacidad de tener movimientos propios, los cuales le permiten realizar las tareas para las cuales fue diseñado. Cualquiera de los robots conocidos hasta el momento tiene alguna de las siguientes formas genéricas:

A. Poliarticulados: este tipo de robots se caracterizan principalmente por ser estáticos y por tener varias secciones articuladas entre si y servo-actuadas que le permiten posicionarse y moverse con precisión en un espacio limitado. Su forma generalmente puede asociarse a la de un brazo humano. En algunos casos pueden llegar a tener hasta nueve grados de libertad y algunos tienen la capacidad de desplazarse en una celda de trabajo. Son programables. El “SCARA” (*Selective Compliant Articulated Robot Arm*) y el “PUMA” (*Programmable Universal Machine for Assembly*) son dos diseño famosos de este tipo de robots.

B. Cartesianos: tienen la capacidad de posicionar de manera controlada un manipulador, una herramienta o su elemento de trabajo, en un plano, que generalmente es horizontal, haciendo movimientos lineales o circulares que resultan de interpolaciones realizadas entre sus ejes ortogonales. La mayoría de los robots cartesianos utilizados en la industria, disponen de una estructura que sirve de soporte a una viga horizontal que se desplaza en la dirección X, sobre la cual se mueve el carro que va acoplado con el manipulador o herramienta (dirección Y). Algunas aplicaciones requieren de un tercer eje en la dirección Z para mover verticalmente su elemento de trabajo y otras, por el contrario, requieren movimiento en un solo eje (X). En el mercado se encuentran robots cartesianos dotados de hasta cuatro ejes.

C. Tipo vehículo: son robots móviles terrestres, acuáticos o aéreos similares a los vehículos de transporte típicamente diseñados para cada uno de estos medios. Es decir, sus estructuras mecánicas son semejantes a vehículos terrestres con ruedas u orugas, submarinos, embarcaciones acuáticas, helicópteros o aviones. Las figuras 3, 4 y 5 muestran ejemplos de robots aéreos, acuáticos y terrestres respectivamente.

En los robots terrestres tipo vehículo existe una mayor divergencia con respecto a los vehículos de transporte terrestre. Estos robots pueden tener desde dos (Yellow CYE SR⁵) hasta ocho ruedas (Lunokhod⁶) en configuraciones diversas (**tabla 5**) y con sistemas de suspensión variados por lo que se pueden subclasificar en “wheeled robots” cuando tienen un sistema básico de suspensión o no tienen sistema de suspensión y en “Walking wheels robots” que utilizan complejos sistemas de suspensión. Los “tracked robots” o robots de desplazamiento por medio de orugas, pueden tener dos, tres (nanokhod⁶) o cuatro orugas (iRobot-LE⁷) también en diversas configuraciones.



Figura 3. (Izquierda) Vehículo autónomo aéreo⁸. (Derecha) UFR II, Seiko Epson⁹.

⁵ CYE, Educational Robots. [en línea] <<http://www.personalrobots.com>>

⁶ VNIITRANSMASH. Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. Specimens of space technology, earth-based demonstrators of planetary rovers, running mock-ups. 1963-2002. Saint-Petersburg, Rusia, 2002.

⁷ IROBOT CORPORATION. Home robots. [en línea] <<http://www.irobot.com>>

⁸ COMPUTER SCIENCE. College of engineering. [en línea] <<http://www.cs.ou.edu>>

⁹ ZIHNI SINIR, Seiko Epson. [en línea] < www.zihnisinir.com >



Figura 4. (Izquierda) Robot autónomo submarino, UIB¹⁰. (Derecha) Swordfish, robot submarino tele-operado¹¹.



Figura 5. (Derecha) Mars Sojourner, NASA¹². (Izquierda) NOMAD¹³

D. Zoomórficos: también denominados robots biónicos, estos artefactos móviles se caracterizan por utilizar sistemas de locomoción que imitan estructuras animales. La imitación de animales que durante milenios de evolución se han adaptado de la mejor manera al medio ambiente, da como resultado estructuras robóticas de mayor eficiencia que aquellas estructuras diseñadas para el mismo medio, que no tienen en cuenta los seres vivos que en él habitan. La ciencia que estudia los seres vivos en su ambiente natural con el fin de imitarlos en su morfología, sus capacidades físicas, habilidades y comportamientos se denomina biomimética. La biomimética considera los organismos vivos como dispositivos especializados en sobrevivir y reproducirse, dotados de mecanismos altamente complejos, difíciles de imitar

¹⁰ LEIA, proyectos robóticos. [en línea] <[http:// www.leia.es](http://www.leia.es) >
¹¹ CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY. Biorobots. [en línea] <http://biorobots.cwru.edu/projects/c_mrobot/cart/>
¹² NASA, Mars Sojourner, [en línea],<<http://www.trueforce.com>>
¹³ CMU, Nomad project. [en línea],<<http://www.cs.cmu.edu>>.

en aparatos artificiales dado su alto grado de perfección¹⁴. La aplicación de esta ciencia ha permitido la aparición, entre muchas otras cosas, de este tipo de robots.

En cuanto a robots terrestres, los diseñadores e investigadores se han concentrado en imitar los sistemas de locomoción de artrópodos, cuadrúpedos, bípedos y ápodos. También se encuentran robots acuáticos basados en la morfología de peces.

E. Híbridos: estos robots corresponden a aquellos cuya estructura resulta de una combinación de las expuestas anteriormente. Existen híbridos zoomórfico - vehículo terrestre (Cricket car¹⁵), poliarticulado – vehículo terrestre (Mobile manipulation, Georgia Tech¹⁶, 4WD2 robot¹⁷), humanoide - vehículo terrestre (Workpartner, Helsinki University of Technology¹⁸). En la figura 6 se muestran algunos ejemplos.



Figura 6. (Izquierda) 4WD2 Robot, Linxmotion¹⁷ (Derecha) WorkPartner¹⁸

¹⁴ VICO, Francisco. Biomimética: Biología artificial. *En: Encuentros en la Biología*. N° 31. [en línea] <<http://www.encuentros.uma.es/encuentros31/biomimetica.html>>

¹⁵ CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY. Biorobots. [en línea] <http://biorobots.cwru.edu/projects/c_mrobot/cart/>

¹⁶ GEORGIA TECH UNIVERSITY. Mobile robot laboratory. [en línea] <<http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/research/manipulation.html>>

¹⁷ LYNXMOTION INC. 4WD2 Robot. [en línea] <<http://www.lynxmotion.com>>

¹⁸ HELSINKY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Automation technology laboratory. [en línea] <<http://automation.tkk.fi/WorkPartner>>

2.2.4 Según su aplicación. Existen cuatro grandes grupos:

A. Industriales: los robots industriales son artilugios mecatrónicos reprogramables destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación. Son en la actualidad los de mayor uso y producción, generalmente siguiendo la arquitectura de los robots poliarticulados y cartesianos ya mencionados. Japón y Estados Unidos lideran la fabricación y consumo de robots industriales siendo Japón el número uno.

B. Exploración: estos robots son utilizados para realizar labores de exploración en lugares de difícil acceso para el hombre o que representan un riesgo para su integridad, tales como zonas volcánicas, desiertos, zonas polares, zonas contaminadas, naufragios, exploración planetaria, zonas de desastre (robots ápodos), detección de explosivos, etc. Pueden ser teleoperados o autónomos, caso en el cual el robot debe programarse de acuerdo a las características y capacidades de su sistema de locomoción diseñado según el espacio a explorar, para hacer de manera autónoma la evasión de los obstáculos insuperables y la planeación de las trayectorias a seguir para llegar a su punto de destino. Toda misión de exploración consta de tres fases: llegar al área que se desea explorar, hacer una inspección y supervisión de la misma y desarrollar alguna actividad como recoger una muestra, identificar un objetivo, analizar el ambiente o simplemente tomar imágenes. Para poder llevar a cabo su misión deben tener las siguientes características:

- Un tipo de locomoción acorde al medio donde se va a desempeñar
- Manipuladores y/o herramientas especializadas en las tareas requeridas según la misión. Esto hace que algunos de estos robots puedan ser considerados de morfología híbrida.

En el caso de ser autónomos además requieren:

- Sistemas de percepción del entorno, posicionamiento y orientación para realizar su desplazamiento de manera controlada.
- Dispositivos de comunicación que permitan intercambiar información con centrales de supervisión.

Se pueden subclasificar en “outdoors” si son diseñados para desplazarse en ambientes externos o “indoors” si son para ambientes internos, es decir dentro de edificaciones. Para su locomoción se deben tener las morfologías tipo vehículo o zoomórfica. En el caso de exploración terrestre existen varias opciones en cuanto a la locomoción, las cuales se muestran en la figura 7.

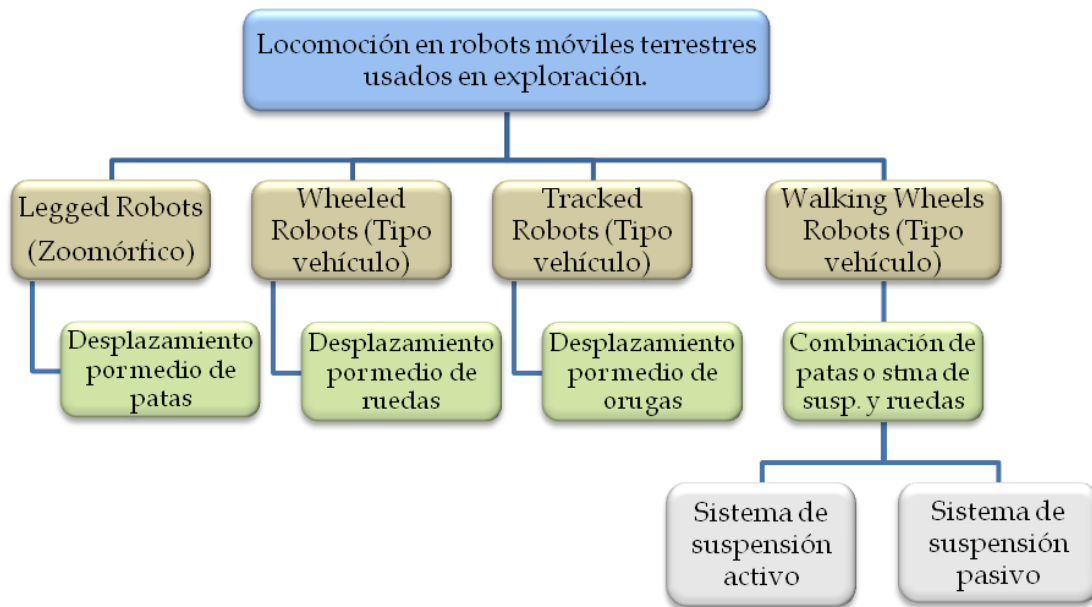


Figura 7. Locomoción en robots móviles de exploración terrestre.

Los legged robots son utilizados en terrenos escarpados, escabrosos, rocosos y con numerosas irregularidades (outdoors). No se justifica diseñarlos para ser utilizados en terrenos planos pues en estos terrenos no son eficientes y requieren de control sofisticado. Los wheeled robots se

utilizan en ambientes indoors o en terrenos planos sin mayores irregularidades dado que no poseen sistemas de suspensión que les brinden grandes habilidades (**tabla 2**). Los tracked robots son especiales para terrenos arenosos dado que tienen una gran superficie de contacto disminuyendo la presión ejercida sobre el suelo y por consiguiente el hundimiento. Sin embargo, tienen un mayor consumo de potencia debido al deslizamiento que se presenta cada vez que gira. Los walking wheels robots son especiales para terrenos irregulares y con obstáculos (outdoors) pues poseen mecanismos de suspensión que le brindan grandes capacidades.

Los “MER” de la NASA enviados a explorar la superficie de Marte en 2002 (**Figura 8**) son un buen ejemplo de este tipo de robots [35]. En la referencia [22] (Introduction to autonomous mobile robots) existe información detallada de estos sistemas de locomoción y en las referencias [14, 23-44] se pueden encontrar varios ejemplos de robots diseñados para exploración.



Figura 8. Explorador “Spirit” enviado a Marte por la NASA¹⁹.

C. Didácticos: son robots utilizados para la enseñanza de la robótica a nivel de educación básica, media y superior. Correspondiendo con estos niveles es posible distinguir dos categorías de robots didácticos mostrados en la figura 9.

¹⁹ NASA, Spirit project. [en línea] <[http:// www.marsrovers.nasa.gov](http://www.marsrovers.nasa.gov).>

Robots didácticos para educación básica y media: el objetivo de estos robots es introducir a los niños en el mundo de la robótica, de una forma atractiva y divertida y motivarlos para que desde edades tempranas se interesen en este tema. Los robots utilizados son estructuras simples, generalmente móviles, modulares, desarmables y reconfigurables que resultan atractivos por su forma y sus colores y en la mayoría de los casos parecen carros de juguete pero son realmente robots que los niños pueden programar de una manera fácil y didáctica.

Para los profesores la robótica es una manera popular y efectiva de cubrir y desarrollar los currículos de áreas de ciencia, tecnología, física y matemáticas, de desarrollar las habilidades de sus alumnos, de reducir su distracción y facilitar su aprendizaje. La interacción con estos robots es importante en las edades tempranas porque estimula el desarrollo de la imaginación y la creatividad, mediante el diseño, configuración y programación de estos dispositivos para la realización de tareas simples²⁰.

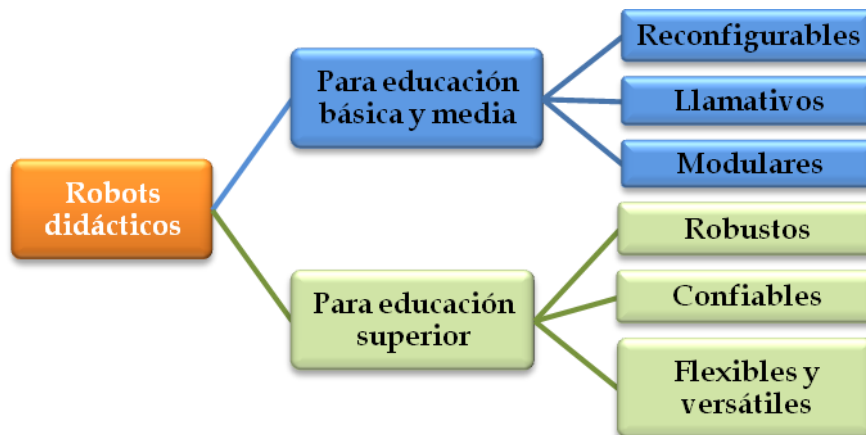


Figura 9. Categorías de los robots utilizados en la enseñanza.

²⁰ UNIVERSITY OF ALBERTA. Using LEGO robotics in learning environment. [en línea] < <http://imej.wfu.edu/articles/2004/1/02/index.asp> >

Existen varias marcas que ofrecen kits de robótica dirigidos a la enseñanza a nivel de educación básica y media. Entre éstas, la más conocida es LEGO®, que tiene infinidad de productos que buscan estimular la creatividad, la resolución de problemas y el trabajo en equipo, así como habilidades y destrezas en los niños²¹. Otras marcas que producen kits de robots para la enseñanza son: CRYA® (Control Robótica y Automatización) de México y fischertechnik® también de México (**Figuras 10 y 11**).



Figura 10. (Izquierda) Robot Technology Set with Serial Transmitter²¹, LEGO®. (Derecha) Cybertron, CRYA®²².

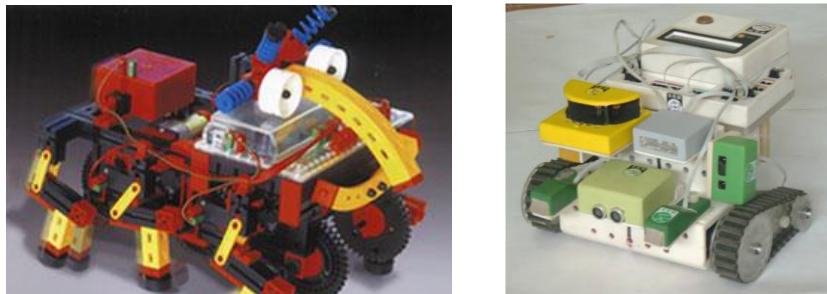


Figura 11. (Izquierda) Robo Mobile Set, FischerTechnik®²³. (Derecha) SRM²².

En la Universidad Industrial de Santander se desarrolló un proyecto cuyo objetivo principal fue el diseño y construcción de un sistema robótico modular

²¹ LEGO®. Educational robots. [en línea] <<http://www.lego.com>>

²² CRYA, Cybertron robot. [en línea]. <<http://www.crya.com.mx>>

²³ FISCHERTECHNIK, Robo Mobile set. [en línea]. <<http://www.fischertechnik.com.mx>>

que permitiera la configuración de distintos robots móviles programables, para ser utilizado como material de apoyo en la enseñanza de temas relacionados con ciencias, tecnología y matemáticas a nivel de educación secundaria²⁴ (**Figura 11 derecha**).

Robots utilizados en educación superior: a nivel de educación superior, los robots se utilizan para la enseñanza de temas relacionados con sensores, control automático, programación, micro-controladores, microprocesadores, sistemas embebidos y manejo de actuadores como servomotores, motores DC y motores paso a paso. Se trata de llevar los conceptos teóricos a la práctica, además, también se pretende enfrentar al estudiante con los retos que plantea un sistema robótico real que son más complejos, en comparación con un sistema simulado.

Las plataformas que se utilizan en este nivel tienen un grado de complejidad un poco mayor. Generalmente se trata de manipuladores robóticos (poliarticulados), robots tipo vehículo o artrópodos que se hacen con cierta robustez tanto en la parte mecánica como en la electrónica, para permitir, además de la práctica y enseñanza de la robótica a nivel de pregrado, la comprobación y/o refinamiento de diferentes algoritmos de control desarrollados en investigaciones de posgrado.

En el caso específico de los robots móviles, en la parte mecánica se exigen las siguientes características:

²⁴ PINILLA, Alirio, CARVAJAL, Omar, MORALES Hernando, ERASO Fabio, et. al. Diseño y construcción de un sistema robótico modular que permita la configuración de distintos robots móviles programables, proyecto interdisciplinario desarrollado entre la escuela de diseño industrial y la escuela de ingeniería electrónica. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, UIS. 2006.

- Un sistema de locomoción acorde con el medio en el cual será utilizado, sea un laboratorio o ambientes externos. Tener en cuenta aspectos ergonómicos.
- Buena estabilidad, alta controlabilidad y buena maniobrabilidad.
- Resistencia de sus componentes, ajustes adecuados entre las piezas, poco juego entre elementos de transmisión (backslash) para facilitar y dar precisión en el control.
- Flexibilidad en la orientación de los sensores para facilitar el planteamiento de diferentes estrategias de navegación y evasión de obstáculos.
- Facilitar el montaje de diferentes tipos de sensores para la realización de diferentes prácticas.
- Confiabilidad y vida útil prolongada.

En cuanto a la parte electrónica las características exigidas son:

- Tarjeta de control expandible mediante la adición de tarjetas electrónicas con micro-controladores o microprocesadores adicionales.
- Entradas y salidas de diferentes tipos que permitan el uso de varios protocolos (I2C, SPI, etc.), para poder utilizar sensores de diferentes tipos.
- Sistemas de auto-protección eléctrica.
- Baterías sin efecto de memoria que permitan el funcionamiento prolongado por varias horas.
- Confiabilidad, facilidad en la conexión de los componentes (ergonomía y Poka Yoke) y una larga vida útil.

Cuando se desea implementar un curso de robótica se tienen tres opciones en cuanto a la plataforma de desarrollo:

1. Diseñar y construir la plataforma mecánica y electrónica conformando equipos interdisciplinarios de ingenieros electrónicos, mecánicos y/o diseñadores industriales. Este precisamente es el principal objetivo de este proyecto.

2. Montar el sistema de control y sensores sobre carros a control remoto modificados para poder ser utilizados como robots autónomos³ (**figura 12 izquierda**).

3. Utilizar plataformas mecánicas de desarrollo y kits de robótica con características ideales para los trabajos que se desarrollan a nivel de educación superior, ofrecidos por diversas empresas como LYNXMOTION Inc., LEGO[®], Tecnología educativa S.A de argentina, Acroname Robotics, BlueBotics, CYE educational robots, entre otras. Las figuras 12 (Der) y 13 muestran ejemplos de este tipo de plataformas. El mercado también ofrece varias opciones en cuanto a tarjetas de control específicamente diseñadas para trabajar en robótica de alto nivel, tales como la “Handy Board” desarrollada en el MIT que se basa en el microprocesador 68HC11 de Motorola²⁵, la “Station board” y la “Stargate board” desarrolladas por Intel y basadas en el procesador ARM²⁶, entre otras (**Figura 14**).



Figura 12. (Izquierda) Hummer³ . (Derecha) 4WD2 Robot¹⁷.

²⁵ HANDY BOARD WEBSITE. Handy board. [en línea] <[http:// www.handyboard.com](http://www.handyboard.com)>

²⁶ PERSONAL EXPLORATION ROVER HOMEPAGE. Stargate and Station boards. [en línea] < <http://www.cs.cmu.edu/~myrover/PER/parts/index.html> >



Figura 13. (Izquierda) LAGR Robot⁵ (Centro) Walking Stick¹⁷ (Derecha) García Robot, Acroname Robotics.



Figura 14. (Izquierda) Handy Board²⁵ (Centro) Stayton Board (Derecha) Stargate Board, Intel Corp²⁶.

D. Diversión: son robots utilizados en parques de diversiones, parques temáticos, museos o en el hogar.

2.3 CLASIFICACIÓN DEL ROBOT QUE SE ESTÁ DESARROLLANDO

Una vez establecidas las diferentes clases de robots existentes, se puede hacer la clasificación o caracterización del robot que se quiere desarrollar en este proyecto. La figura 15 resume la clasificación del robot que se va a desarrollar en este proyecto.

- **Según su grado de inteligencia:** autónomo, sin embargo tendrá todo el hardware necesario para ser tele-operado o programado.
- **Según su capacidad de movimiento:** móvil

- **Según su morfología:** tipo vehículo terrestre con desplazamiento por medio de ruedas.
- **Según su uso:** exploración de ambientes externos (outdoors) poco estructurados por lo tanto debe diseñarse un Walking Wheel robot. Además será utilizado en la enseñanza por lo tanto también se clasifica como robot didáctico.

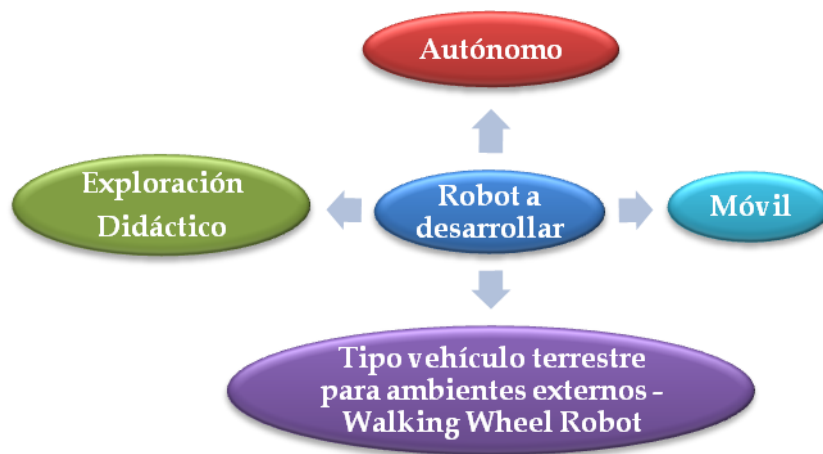


Figura 15. Clasificación del robot que se va a desarrollar.

2.4 LOCOMOCIÓN EN ROBOTS CON RUEDAS

En la sección 1.2.4-B se especificaron las diferentes morfologías que pueden adoptarse para la locomoción o desplazamiento de los robots de exploración terrestre (**Figura 7**). Dentro de tales opciones están, los llamados “wheeled robots” y los “walking wheels robots” (tipo de robot seleccionado para el desarrollo que se lleva a cabo en este proyecto) que se desplazan por medio de ruedas, siendo estos últimos aptos para exploración en ambientes externos poco estructurados ya que combinan la versatilidad de las patas de los “legged robots” con la eficiencia en terrenos planos de los “wheeled robots”. En el diseño del sistema de locomoción de un wheeled o un walking Wheel robot se deben tener en cuenta cinco aspectos principales que son: tipo de rueda, configuración geométrica de las ruedas, estabilidad,

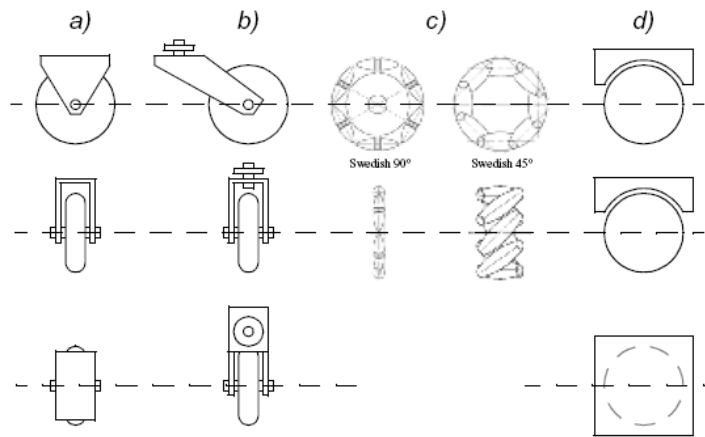
maniobrabilidad, controlabilidad. Los tres últimos aspectos están fuertemente relacionados y son gobernados por la selección de los dos primeros.

2.4.1 Tipos de ruedas²⁷. Existen cuatro clases principales de ruedas que son mostradas en la figura 16. Todas difieren ampliamente en su cinemática y por consiguiente la selección de un tipo específico tiene un gran efecto en la cinemática total del robot móvil.

2.4.2 Configuración geométrica de las ruedas²⁷. La configuración geométrica de las ruedas tiene que ver con el número de ruedas que son utilizadas y la distribución que se haga de las mismas. En el diseño del sistema de locomoción de los wheeled o walking wheels robots se debe considerar la selección del tipo de rueda simultáneamente con la configuración geométrica. Esta selección debe basarse en las características del terreno a través del cual navegará el robot y debe tener en cuenta el sistema de suspensión a utilizar buscando maximizar la controlabilidad, maniobrabilidad y estabilidad.

En la tabla 5 se muestran algunas configuraciones geométricas de 2, 3, 4 y 6 ruedas que han sido utilizadas en robots móviles desarrollados en todo el mundo, detallando los tipos de rueda utilizados en cada una de ellas. La mayoría de las configuraciones mostradas han sido utilizadas en robots indoors que no requieren complejos sistemas de suspensión, sin embargo algunas pueden considerarse para robots outdoors agregando sistemas de suspensión que mejoren su adaptabilidad a las irregularidades del terreno. Existen otras configuraciones de seis y ocho ruedas que son especiales para walking wheels robots que no aparecen en dicha tabla. Cada configuración brinda determinadas características de estabilidad, controlabilidad y maniobrabilidad que deben ser tenidas en cuenta durante su selección.

²⁷ SIEGWART, Roland y NOURBAKHSI, Illah. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 2004. 321p.


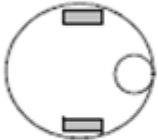
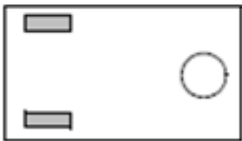

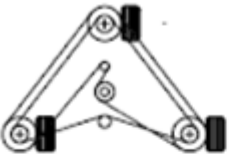
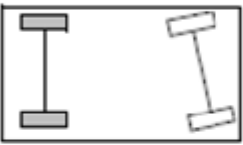
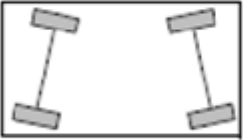
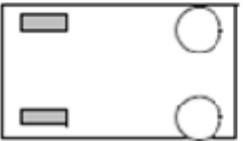


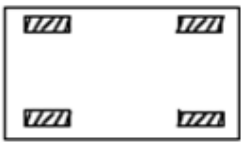

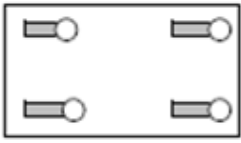
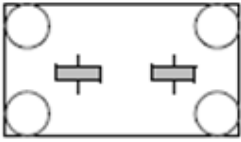
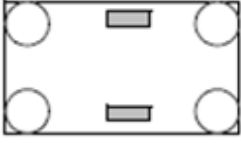







The four basic wheel types. (a) Standard wheel: two degrees of freedom; rotation around the (motorized) wheel axle and the contact point. (b) castor wheel: two degrees of freedom; rotation around an offset steering joint. (c) Swedish wheel: three degrees of freedom; rotation around the (motorized) wheel axle, around the rollers, and around the contact point. (d) Ball or spherical wheel: realization technically difficult.

Figura 16. Los cuatro principales tipos de rueda²⁷.

2.4.3 Estabilidad²⁷. El menor número de ruedas requerido para garantizar estabilidad estática es dos. Como se muestra en la tabla 5, dos ruedas motrices que hagan dirección por diferencial pueden lograr la estabilidad estática del robot si el centro de masa está por debajo del eje de las ruedas (**figura 17 izquierda**). Sin embargo, esta solución requiere que el diámetro de las ruedas sea muy grande, lo que en algunas circunstancias puede resultar impráctico. Además, es posible que en condiciones dinámicas, como en el arranque o al detenerse, el robot roce el piso con un tercer punto, ya que su cuerpo debe ser muy bajo. Normalmente, la estabilidad estática requiere de un mínimo de tres ruedas, con la salvedad adicional que el centro de gravedad esté contenido dentro del triángulo formado por los tres puntos de contacto con el suelo. La estabilidad puede mejorarse adicionando más ruedas, aunque una vez el número de puntos de contacto es mayor que tres, la naturaleza hiperestática de la geometría requerirá de alguna forma de suspensión flexible para desplazarse sobre terrenos no uniformes y garantizar el contacto de todas las ruedas con el suelo en todo momento.

Tabla 5. Configuración geométrica de las ruedas²⁷.

# of wheels	Arrangement	Description	Typical examples
2		Two-wheel differential drive with the center of mass (COM) below the axle	Cye personal robot
3		Two-wheel centered differential drive with a third point of contact	Nomad Scout, smartRob EPFL
		Two independently driven wheels in the rear/front, 1 unpowered omnidirectional wheel in the front/rear	Many indoor robots, including the EPFL robots Pygmalion and Alice
		Three motorized Swedish or spherical wheels arranged in a triangle; omnidirectional movement is possible	Stanford wheel Tribolo EPFL, Palm Pilot Robot Kit (CMU)
		Three synchronously motorized and steered wheels; the orientation is not controllable	“Synchro drive” Denning MRV-2, Georgia Institute of Technology, I-Robot B24, Nomad 200
4		Two motorized wheels in the rear, 2 steered wheels in the front; steering has to be different for the 2 wheels to avoid slipping/skidding.	Car with rear-wheel drive
		Four steered and motorized wheels	Four-wheel drive, four-wheel steering Hyperion (CMU)
		Two traction wheels (differential) in rear/front, 2 omnidirectional wheels in the front/rear	Charlie (DMT-EPFL)

# of wheels	Arrangement	Description	Typical examples
4		Four omnidirectional wheels	Carnegie Mellon Uranus
		Two-wheel differential drive with 2 additional points of contact	EPFL Khepera, Hyperbot Chip
		Four motorized and steered castor wheels	Nomad XR4000
6		Two motorized and steered wheels aligned in center, 1 omnidirectional wheel at each corner	First
		Two traction wheels (differential) in center, 1 omnidirectional wheel at each corner	Terregator (Carnegie Mellon University)
Icons for the each wheel type are as follows:			
	unpowered omnidirectional wheel (spherical, castor, Swedish);		
	motorized Swedish wheel (Stanford wheel);		
	unpowered standard wheel;		
	motorized standard wheel;		
	motorized and steered castor wheel;		
	steered standard wheel;		
	connected wheels.		

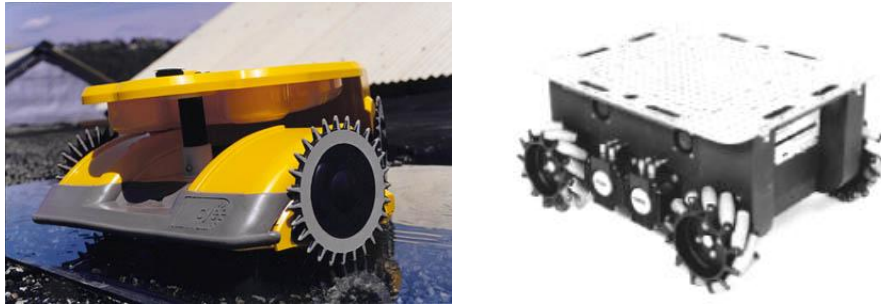


Figura 17. (Izquierda) Yellow CYE SR⁵ (Derecha) URANUS.

2.4.4 Maniobrabilidad²⁷. Ésta tiene que ver con la capacidad del robot de desplazarse en cualquier dirección. Los robots que utilizan ruedas suecas o ruedas esféricas son los únicos verdaderamente omnidireccionales, es decir, pueden moverse incluso en dirección perpendicular a la orientación de las ruedas o del chasis del móvil (**Figura 17 derecha**). Cuando un robot puede girar sobre su propio eje puede decirse que tiene gran maniobrabilidad y esta habilidad puede ser utilizada en diferentes estrategias de evasión de obstáculos. Utilizando cuatro ruedas caster un robot se puede desplazar en dirección oblicua con respecto a la orientación de su chasis o girar sobre su propio eje obteniendo por lo tanto gran maniobrabilidad. Los robots con el sistema de dirección ackerman tienen pobre maniobrabilidad mientras que los robots que hacen dirección por diferencial como los de dos ruedas cuyo centro de gravedad está por debajo del eje de las mismas tienen gran maniobrabilidad. Existen robots de cuatro ruedas no dirigibles que hacen dirección por diferencial (SR2 de la Universidad de Oklahoma) con gran maniobrabilidad pero presentan alto consumo de energía debido al deslizamiento que sufren sus ruedas al hacer diferencial.

2.4.5 Controlabilidad²⁷. Hay generalmente una relación inversa entre controlabilidad y maniobrabilidad. Por ejemplo, el diseño omnidireccional tal como el de las cuatro ruedas caster, requiere de un procesamiento significativo para convertir las velocidades de rotación y de translación

deseadas en comandos individuales a cada una de las ruedas. Además, estos diseños frecuentemente agregan más grados de libertad a la rueda. Por ejemplo, la rueda sueca tiene un set de rodillos libres a lo largo de su perímetro. Esos grados de libertad causan una acumulación de deslizamientos, que conllevan a reducir la precisión e incrementan la complejidad en el control.

Controlar un robot omnidireccional en desplazamiento recto resulta más difícil y frecuentemente menos preciso que un diseño con menor maniobrabilidad. Por ejemplo, un vehículo con una dirección tipo ackerman puede moverse en línea recta simplemente impidiendo la desorientación de las ruedas de la dirección y moviendo las de tracción. En un vehículo diferencial, los dos motores unidos a las dos ruedas deben ser manejados exactamente con el mismo perfil de velocidad, el cual se ve afectado por variaciones en las ruedas, motores y diferencias de contacto entre el suelo y cada una de las ruedas. En robots con ruedas suecas como el Uranus (**figura 17 derecha**), el problema es incluso más complejo, debido a que todas las ruedas deben tener exactamente la misma velocidad para que el robot pueda moverse en una línea recta perfecta.

En conclusión, no hay una configuración ideal que maximice simultáneamente la estabilidad, maniobrabilidad y controlabilidad. Cada aplicación trae consigo restricciones únicas y la tarea del diseñador es escoger la configuración más apropiada²⁷.

2.5 WALKING WHEELS ROBOTS.

Estos robots se desplazan por medio de ruedas y están dotados de sistemas de suspensión capaces de adaptarse a terrenos irregulares y de sobrepasar obstáculos de cierto tamaño²⁷. En este tipo de robots se pueden distinguir

dos clases particulares según la complejidad del sistema de suspensión que utilicen: los Walking Wheels con sistema de suspensión activo que tienen la capacidad de controlar la posición de las barras de suspensión y/o de su centro de gravedad y los Walking Wheels con sistema de suspensión pasivo. Por simplicidad en su diseño, construcción y control y también porque resulta mas económico, **el robot a desarrollar será un Walking Wheel Robot con sistema de suspensión pasivo**. A continuación se muestran algunos ejemplos de estas dos clases de robots.

2.5.1 Walking wheels con sistemas activos de suspensión. Utilizan servomotores o cilindros hidráulicos o neumáticos servoasistidos para modificar de manera controlada su centro de gravedad y/o la disposición, configuración o posición relativa de sus miembros de suspensión para obtener de esta manera mayor movilidad y mejorar su capacidad de superación de obstáculos y adaptación al terreno. Presentan un alto consumo de energía dado el mayor número de servos utilizados, un peso superior y un mayor costo. La figura 18 presenta varios modelos de robots que utilizan sistemas activos de suspensión.

2.5.2 Walking Wheels Robots con sistemas pasivos de suspensión. En este tipo de robots el sistema de suspensión esta compuesto de barras y elementos conectados entre si de forma pasiva, por lo tanto, ninguna articulación es motorizada y la posición de las barras de suspensión solo cambia dependiendo de la forma del terreno sobre el cual se encuentre el robot, por acción de la gravedad. Son fáciles de controlar, generalmente brindan una maniobrabilidad y estabilidad relativamente alta, los diseños en general son simples, su peso es menor, lo que les posibilita llevar más carga útil (payload), consumen menos energía, son eficientes y su adaptación a terrenos irregulares y superación de obstáculos es buena dependiendo del diseño. En la figura 19 se muestran dos ejemplos de este tipo de robots. En

el capítulo dos se mostrará el estudio detallado que se hizo a los sistemas de locomoción de los robots de este tipo en los que se basaron las alternativas de diseño conceptual del sistema de locomoción del robot que se esta desarrollando.



Figura 18. (Izquierda) SCARAB²⁸. (Centro) SRR²⁹. (Derecha) OCTOPUS³⁰.



Figura 19. (Izquierda) Nomad³¹. (Derecha) Crab I [44].

2.6 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE UN ROBOT MÓVIL.

Una característica importante que debe poseer un robot móvil de exploración o reconocimiento es la de disponer de componentes que le permitan obtener periódicamente sus coordenadas (x,y) y su orientación respecto a un sistema

²⁸ On-line: www.frc.ri.cmu.edu

²⁹ On-line: www-robotics.jpl.nasa.gov

³⁰ LAURIA, M, PIGUET, Y, SIEGWART, R. Octopus: an autonomous wheeled climbing robot. ASL-Swiss Federale Institute of Technology (EPFL). Lausanne, Switzerland. 2002.

³¹ ROLLINS, E, LUNTZ, J, FOESSEL, A, SHAMAH, B, WHITTAKER, W. Nomad: A Demonstration of the Transforming Chassis. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA. 1997

de referencia ³²(esto si el móvil se desplaza en un plano). Debido al ruido y distorsiones presentes en las medidas e información obtenida de los sensores, la estimación de la posición debe integrar técnicas adaptativas más que puramente teóricas.

En la tarea de estimar la posición del móvil existen varias metodologías que pueden ser usadas independientemente, combinaciones o como un sistema redundante en aras de lograr un alto grado de precisión.

Entre estas se destacan las siguientes estrategias y los dispositivos utilizados:

1. Posicionamiento explícito al entorno:

Instrumentos de posicionamiento relativo:

- Odometría (Encoders, Tacómetros)
- Sistema inercial (Acelerómetros, Giróscopos, Compass)

Instrumentos de posicionamiento absoluto:

- Estaciones de transmisión
- Triangulación mediante balizas
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global)

2. Posicionamiento basado en el entorno:

- Sensores activos (escáner Láser, Sonar)
- Sensores pasivos (Cámaras)

³² GONZALES, Javier y OLLERO, Anibal; "ESTIMACION DE LA POSICION DE UN ROBOT MOVIL", Universidad de Malaga/Universidad de Sevilla, España.

Uno de los métodos de posicionamiento básico, consiste en colocar encoders en los ejes de las ruedas, con el inconveniente que acumulan su error provocando una incertidumbre creciente a medida que el vehículo se desplaza.

Los métodos inerciales se ven afectador por el problema anterior, además de ser sensibles al ruido por entregar medidas pequeñas de aceleración e incluir incertidumbres inducidas por la doble integración, su ventaja sobre los métodos odométricos es que no introducen errores debidos a perdidas de tracción.

2.7 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El sistema de posicionamiento global GPS permite obtener las coordenadas geográficas y altura sobre el nivel del mar de cualquier vehiculo que lo posea. Funciona basado en una constelación de 24 satélites en seis orbitas, los cuales están dotados de un reloj de alta precisión y un emisor de ondas de radio frecuencia que envía una señal al receptor en tierra, debido a la sincronización entre los relojes tanto de los satélites como el receptor, este ultimo realiza el cálculo de las distancias a las cuales se encuentran los satélites cercanos basado en el tiempo de retraso de la onda recibida y la velocidad de ésta a través de la atmósfera. Por medio de un algoritmo de triangulación calcula la posición y la almacena para después entregarla a dispositivos de visualización o control³³.

Inicialmente creado con fines militares, actualmente constituye un instrumento muy utilizado para navegación y practicas de exploración y recreación civil. Este dispositivo aparece como una alternativa factible de posicionamiento para la navegación en ambientes exteriores de robots de

³³ GONZALES, Melvin y OJEDA, José; "ROBOT MOVIL DE VIGILANCIA CON SISTEMA DE OMNIVISION Y NAVEGACION AUTONOMA CON GPS ", Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2005.

campo, aunque como todo sistema tiene sus falencias, una de ellas es la restricción en cuanto a precisión que ofrece para aplicaciones civiles, entre otras posibles fuentes de error sistemático. A nivel mundial el país que ha impulsado y ha dado a conocer su trabajo es Estados Unidos con la implementación de proyectos de investigación apoyados en robots exploradores en regiones desérticas, polares y más recientemente en proyectos espaciales de la NASA.

3. PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Este capítulo presenta el proceso de diseño del sistema de locomoción, iniciando con la metodología de diseño empleada, el diseño conceptual y la configuración detallada.

3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO IMPLEMENTADA

El proceso de diseño del sistema de locomoción del robot móvil autónomo se llevó a cabo siguiendo algunas etapas de una metodología sistemática propuesta por el Dr. Dimitrios Apostolopoulos del Instituto de robótica de Carnegie Mellon University, para el diseño de robots móviles autónomos de exploración planetaria, la cual fue denominada “***Systematic Configuration of Robotic Locomotion***”¹. A pesar de que el robot diseñado no será utilizado en tales labores, se trata de un robot para exploración de ambientes externos que requiere un sistema de locomoción con habilidades similares a las de tales robots y por lo tanto algunos aspectos de esta metodología son aplicables. La figura 20 muestra las diferentes etapas de dicha metodología.

3.2 RELACIÓN ENTRE LOS REQUERIMIENTOS Y LOS SUBSISTEMAS DE LOCOMOCIÓN DEL MÓVIL.

Al relacionar los diferentes requerimientos con los subsistemas del móvil, se determinan algunos parámetros de diseño necesarios para la etapa del diseño conceptual y detallado. A continuación se muestran los diferentes aspectos de la locomoción del móvil que pudieron ser relacionados y definidos con base en los requerimientos del problema establecidos en el capítulo uno:

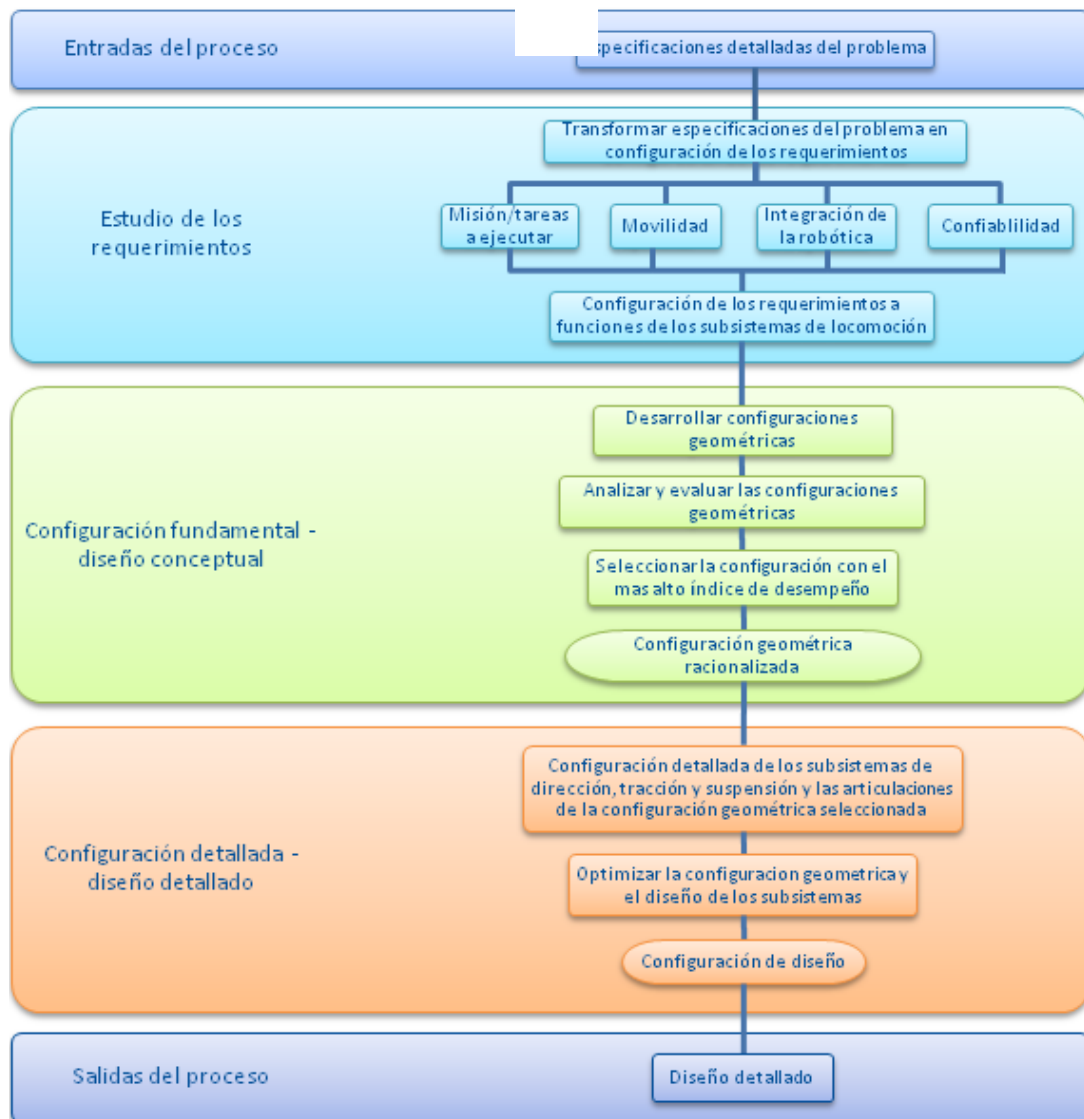


Figura 20. Metodología adoptada para la configuración sistemática del sistema de locomoción del robot móvil¹.

3.2.1 Sistema de suspensión. Debido a que el robot debe desplazarse por terrenos irregulares en ambientes externos y superar obstáculos de cierto tamaño (**tabla 1 y tabla 2**), el tipo de robot ideal para esta aplicación es un *Walking Wheel Robot*, tal como se había mencionado en el capítulo dos. Estos robots, también denominados “*All terrain robots*”, pueden tener sistemas de suspensión pasivos o activos. En este caso, uno de los

requerimientos (**Tabla 3**) establece que el sistema de suspensión debe ser pasivo pretendiendo facilitar el control del robot, disminuir los costos del prototipo, minimizar el peso y el consumo de potencia y favorecer la simplicidad en el diseño. Por lo tanto el robot a desarrollar será un *Walking Wheel Robot* con sistema de suspensión pasivo.

3.2.2 Delimitación de la masa del móvil. Para delimitar el peso del móvil se estudiaron las recomendaciones contenidas en la publicación de la OIT titulada «Peso máximo en el levantamiento y transporte de cargas» (núm. 59, publicada en la serie «Seguridad, higiene y medicina del trabajo», Ginebra, 1988), en la que se indica que 55 kg es el límite recomendado desde el punto de vista ergonómico que puede ser levantado *ocasionalmente* por un trabajador de sexo masculino entre los 19 y los 45 años de edad y que 45 kg es el límite recomendado para los trabajadores de sexo masculino mayores de 45 años de edad. También según la mencionada publicación de la OIT, la Comisión señala que es de 15 kg el límite recomendado desde un punto de vista ergonómico para la carga permitida que ha de ser levantada y transportada *ocasionalmente* por una mujer adulta, y de 10 kg el límite recomendado, en el caso de un levantamiento y transporte de cargas más frecuente³⁴. Otra fuente que puede ser consultada para estimar la carga máxima a transportar es www.ergonautas.upv.es/metodos/ginsht-ayuda.php.

Teniendo en cuenta lo descrito en el anterior párrafo, el peso máximo que puede tener el robot es de 10 Kgf. Por lo tanto, se debe minimizar el peso de la estructura para permitir el transporte de carga útil (2 Kgf como mínimo, tal como fue establecido en los requerimientos). Como el robot será utilizado en prácticas de laboratorio, no siempre llevará carga útil, por lo tanto se podrá esperar un mejor funcionamiento frente a la superación de los obstáculos y menor consumo de potencia en tales casos.

³⁴ GOBIERNO DE GUATEMALA. Pesos recomendados por la OIT. [en línea]
< <http://webfusion.ilo.org/public/db/standards/normes/>>

3.2.3 Selección del tipo de llanta a utilizar. En la tabla 1 se especificó que el robot debe navegar a través de ambientes poco estructurados con suelos de arena, grama, concreto, asfalto o grava, característicos de los espacios abiertos y zonas verdes de la universidad, lugares en los cuales se piensa poner a navegar al robot móvil. Dada la variedad de suelos por los cuales se desplazará el vehículo, debe seleccionarse un tipo de rueda que tenga un buen desempeño en todos ellos.

Haciendo caso a otro de los requerimientos que establece el uso de elementos estándar para favorecer la simplicidad en el diseño y reducir los costos, se encontró que era apropiado y práctico usar ruedas de vehículos de control remoto a escala. Se sabe que estos carros son diseñados para desplazarse por terrenos muy similares a los antes mencionados, por lo tanto las ruedas que estos utilizan son apropiadas para esta aplicación. Dichas ruedas tienen las siguientes características:

- Tamaños entre 2” y 6” de diámetro y 2” y 4” de ancho.
- Son generalmente de caucho o algún material sintético similar, que le brinda buena tracción en suelos lisos y/o rugosos.
- Contienen internamente una espuma que le ayuda a mantener su forma cuando está sometida a fuerzas externas, principalmente el peso del vehículo.
- Su superficie tiene labrados similares a los de las ruedas de los automóviles pero en la mayoría de los casos con mayor profundidad o en su defecto pueden tener pequeñas puntas sobre toda la superficie **(Figura 21)**.

En el robot estas puntas o labrados son útiles para mejorar la capacidad de superación de obstáculos pues le brindan un mejor agarre a las superficies, sobre todo si estas son rugosas. La gran flexibilidad que tiene este tipo de ruedas da una ventaja adicional al ser implementadas en un robot móvil ya

que pueden absorber las vibraciones ocasionadas por los desniveles e irregularidades del terreno, pues la suspensión en la mayoría de los casos es rígida o semirrígida. La figura 21 muestra algunos de los diseños de llantas que se pueden conseguir en el mercado.



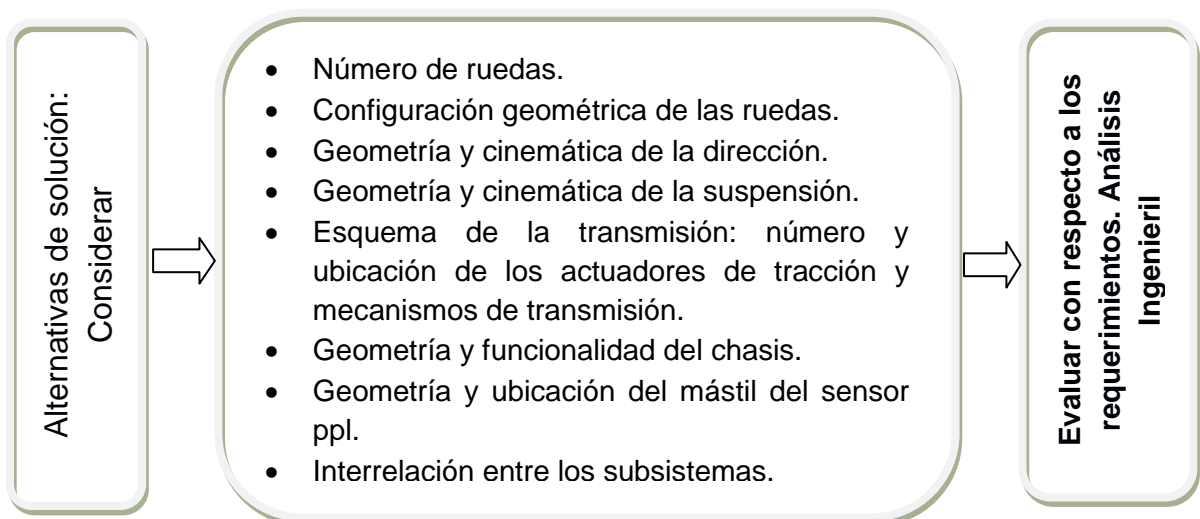
Figura 21. Ruedas usadas en carros RC con usos potenciales en robótica³⁵.

3.2.4 Diámetro de las ruedas y altura de los obstáculos superables. De antemano se sabe que los walking wheels robots con sistemas de suspensión pasivos que utilizan seis ruedas pueden superar obstáculos de mayor altura que los que utilizan solo cuatro. Los de seis superan fácilmente obstáculos de alturas iguales al diámetro de sus ruedas mientras que los de cuatro difícilmente pueden superar obstáculos de la mitad del diámetro de sus ruedas. Teniendo en cuenta que se requiere superar obstáculos de 10 cm de altura, las ruedas deben ser mínimo de 10 cm de diámetro (4") si se selecciona un sistema de suspensión de seis ruedas y mínimo de veinte centímetros si se selecciona uno con cuatro ruedas. La cinemática de cada mecanismo de suspensión en particular, determinará la longitud del móvil, teniendo presente que no debe exceder 60 cm de longitud pues así fue establecido en los objetivos del proyecto, pensando en facilitar su transporte.

³⁵ On-line: www.towerhobbies.com.

3.3 CONFIGURACIÓN FUNDAMENTAL

En esta segunda etapa de la metodología implementada se generan las alternativas generales de solución al problema de diseño del sistema de locomoción del robot móvil autónomo explorador. En el siguiente diagrama se define la información que debe estar contenida en todas las configuraciones geométricas consideradas como alternativas de solución¹, información que es suficiente para describir todos los subsistemas que conforman la locomoción del móvil.



3.3.1 Alternativas de diseño del sistema de locomoción. Todos los diseños conceptuales mostrados a continuación coinciden en los siguientes aspectos:

- Son Walking Wheels Robots con sistemas de suspensión que se adaptan pasivamente al terreno explorado.
- Todas las alternativas se basan, algunas en mayor y otras en menor medida, en robots desarrollados por prestigiosas universidades y centros de investigación a nivel mundial. Se basan en sistemas diseñados para exploración de ambientes similares a los que este robot enfrentará, los

cuales ya han sido probados y por tanto se sabe de antemano que funcionan correctamente en los mismos. En algunas alternativas se trataría por lo tanto de un desarrollo de reingeniería.

- En todos se trata de hacer algún cambio o modificación para que el sistema de locomoción no sea idéntico al del robot en el que se basa.

Además de los sistemas de locomoción en los que se basan las cinco alternativas que fueron consideradas, otros conceptos de locomoción de *Walking Wheels Robots* con sistemas de suspensión pasiva fueron estudiados pero no se consideraron como alternativas de solución debido a que no se ajustaban adecuadamente a los requerimientos de diseño.

A. Alternativa N° 1: esta basada en el “RCL concept E” (**figura 23**) desarrollado para la misión AURORA de la Agencia Espacial Europea (ESA)³⁶. Esta alternativa se diferencia de la original en que el subsistema de suspensión es totalmente pasivo. La tabla 6 resume las características principales del sistema de locomoción de esta alternativa.

Tabla 6. Características del sistema de locomoción de la alternativa 1.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Nº de ruedas	6
Configuración geométrica ruedas	Tres ruedas en cada lado simétricamente distribuidas tal como se muestra en la figura 22 (izquierda)
Subsistema de suspensión	Bogies paralelogramos a lado y lado del cuerpo del robot uniendo las ruedas delantera y central respectivas. Bogie paralelogramo transversal uniendo las ruedas traseras de cada lado (Figura 23). Los bogies paralelogramos de

³⁶ RCL. Engineering support on rover locomotion for exomars rover phase A – “ESROL - A”. Executive summary prepared for the European Space Agency. Science & Technology Rover Company Ltd (RCL). 2004 Dec 13.

	cuatro barras, permiten elevar la superficie inferior del cuerpo del robot por encima de la altura de sus ruedas, dejando una buena distancia con el suelo tal como es requerido. Este sistema permite al robot superar obstáculos de alturas iguales al diámetro de sus ruedas y adaptarse a terrenos irregulares manteniendo todas sus ruedas en contacto con el suelo.
Chasis	Tres puntos de apoyo dados por los puntos de unión de los tres bogies al chasis, mantienen la estabilidad del cuerpo del robot. No es necesario un mecanismo diferencial. La parte frontal puede sostener fácilmente el mástil del sensor principal y soportes para sensores adicionales que se requieran.
Subsistema de dirección	Dirección independiente en las cuatro ruedas de las esquinas por medio de cuatro servos conectados directamente al eje de dirección de cada una de ellas. Capacidad de giro sobre su propio eje. Radios de giro pequeños sin deslizamiento de las ruedas (Figura 22 centro y derecha). Alta maniobrabilidad.
Subsistema de tracción	Cada rueda tiene acoplado directamente en su eje un motor-reductor DC. Los seis motores se podrían controlar por medio de cuatro señales independientes de PWM de la siguiente forma: PWM1: ruedas delantera y trasera derecha PWM2: rueda central derecha PWM3: rueda delantera y trasera izquierda PWM4: rueda central izquierda De esta forma las velocidades pueden adecuarse para evitar deslizamientos de las ruedas. Alta controlabilidad.

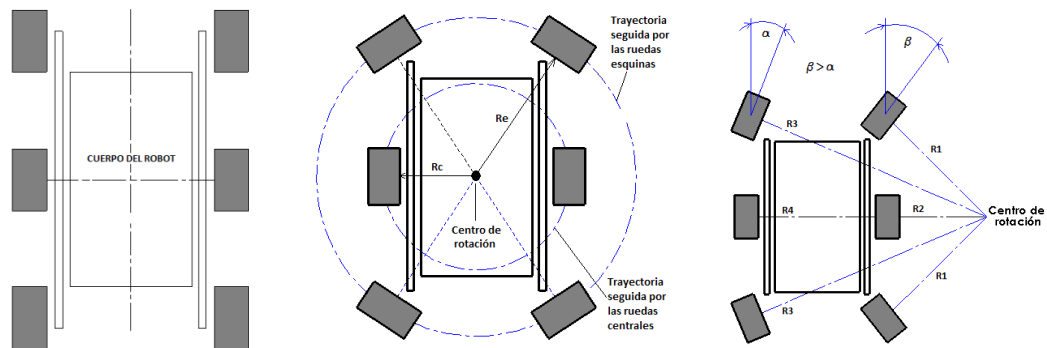


Figura 22. Configuración de las ruedas y maniobrabilidad de la alternativa 1.

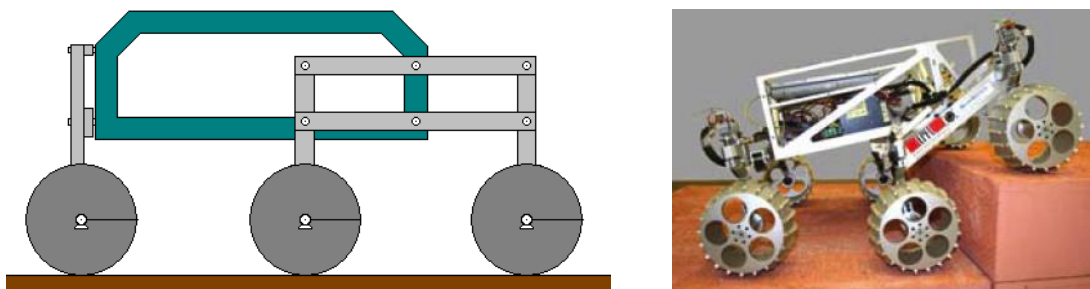


Figura 23. Sistema de suspensión alternativa 1³⁶.

B. Alternativa Nº 2: esta alternativa esta basada en el sistema de movilidad del “Shrimp robot”³⁷ desarrollado en el EPFL de Suiza, también usado en el “SOLERO robot”. La única modificación que se hace con respecto a “Shrimp”, es que esta alternativa propone el uso de solo cuatro motor-reductores en lugar de seis. La tabla 7 resume las características principales de esta alternativa.

³⁷ ESTIER, T, CRAUSAZ, Y, MERMINOD, B, LAURIA, M, PIGUET, R y SIEGWART, R. An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities. Institute of Robotic Systems, EPFL (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne), Switzerland.

Tabla 7. Características del sistema de locomoción de la alternativa 2.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Nº de ruedas	6
Configuración geométrica ruedas	Configuración en forma de rombo tal como se muestra en la figura 24.
Mecanismo de suspensión (Figura 25)	Bogies paralelogramos a lado y lado del cuerpo del robot uniendo las dos ruedas del lado respectivo. Articulación de cuatro barras con resorte para unir la rueda delantera con el chasis. El resorte garantiza el contacto de la rueda delantera con el suelo en todo momento y es necesario para superar los obstáculos. La rueda trasera esta unida rígidamente al chasis. Este sistema tiene la capacidad de superar obstáculos de hasta dos veces el diámetro de las ruedas y permite incluso subir escaleras.
Chasis	El cuerpo del robot mantiene su estabilidad gracias a tres puntos de apoyo principales que son: la unión del chasis con el bogie paralelogramo de la derecha, la unión con el bogie de la izquierda y la unión rígida con la rueda trasera. Además, dos de las barras del mecanismo de articulación de la rueda delantera se unen al chasis mediante pivotes simples. El mástil del sensor principal debe elevarse para que la rueda delantera no quede en su rango de visión.
Subsistema de dirección	Un servo controla la dirección de la rueda delantera y otro el de la rueda trasera. Las ruedas de los lados presentan un pequeño deslizamiento lateral debido a que no pueden orientarse perpendicularmente con respecto a su radio de giro, sin embargo sus

	<p>velocidades son adecuadas para evitar deslizamiento rotacional. Giro sobre su propio eje (Figura 24)</p>
<p>Subsistema de tracción</p>	<p>Las ruedas delantera y trasera tienen un motor-reductor directamente acoplado a su eje, mientras que las dos ruedas de cada lado pueden ser manejadas mediante un solo motor-reductor junto con una transmisión mecánica, debido a que siempre giran a la misma velocidad. Los cuatro motores se pueden controlar mediante tres señales:</p> <p>PWM1: ruedas delantera y trasera (W_1)</p> <p>PWM2: ruedas del lado derecho (W_2)</p> <p>PWM3: ruedas del lado izquierdo (W_3)</p>

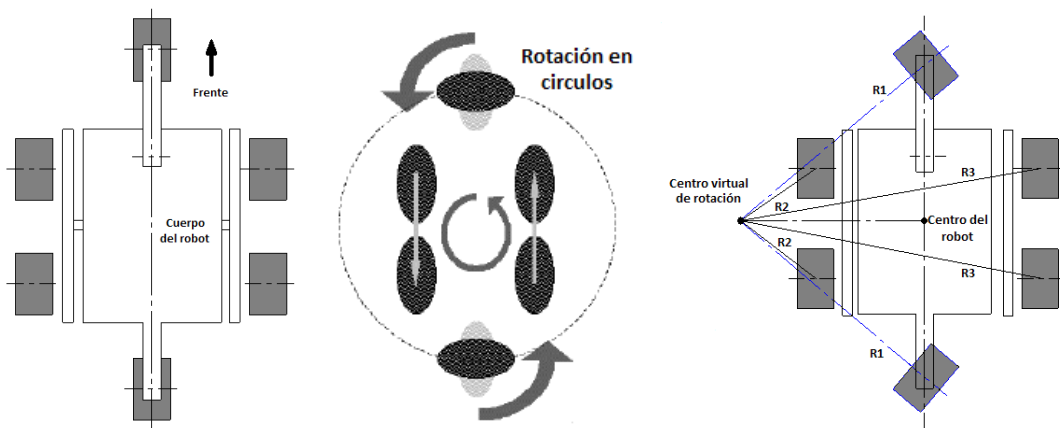


Figura 24. Configuración geométrica de las ruedas y dirección de la alternativa 2.

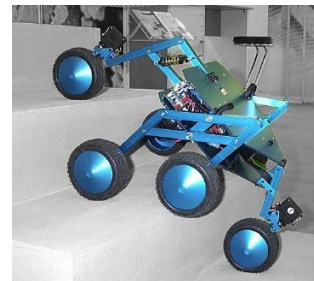
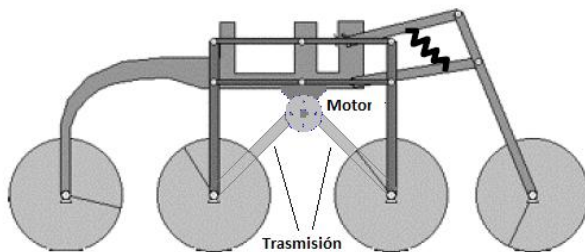


Figura 25. Esquema del subsistema de suspensión y de tracción³⁷ (Gráfico izquierdo modificado del original)

C. Alternativa N° 3: esta alternativa se basa en el sistema de movilidad utilizado en los robots planetarios desarrollados por la NASA, (“Sojourner Robot”, “FIDO robot”, “Rocky robots”, “MER”) algunos de los cuales fueron enviados en misiones de exploración a Marte³⁸. Esta alternativa utiliza todos los elementos de este sistema de movilidad y por lo tanto de ser seleccionada como la alternativa a desarrollar, se trataría de un problema de reingeniería, pues lo que se esta aportando al concepto original es muy poco. En la tabla 8 se resumen las características principales de todos los subsistemas de esta alternativa.

Tabla 8. Características del sistema de locomoción de la alternativa 3.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Nº de ruedas	6
Configuración geométrica de las ruedas	Tres rueda en cada lado simétricamente distribuidas a lo largo robot, igual que en la alternativa 1 (Figura 22).
Subsistema de suspensión (Figura 26)	Sistema de suspensión Rocker-Bogie en cada lado del cuerpo del robot. Ambos mecanismos se unen entre si por medio de un diferencial que mantiene el cuerpo del robot en una posición intermedia con respecto a la posición de los rockers de cada lado. Gran adaptabilidad a las irregularidades del terreno con mínimos movimientos del chasis y capacidad de superar obstáculos de alturas iguales a 1.5 veces el diámetro de sus ruedas [25].
Chasis	Un diferencial se une rígidamente al chasis por lo tanto el cuerpo puede mantenerse estable sin balancearse a

³⁸ WANG, SL. Case studies on NASA Mars rover’s mobility system. Paper, Department of Mechanical Engineering, North Carolina A&T State University, Greensboro (US): 2000

		pesar de estar aparentemente sostenido solo por un eje.
Subsistema de dirección	de	Dirección independiente en las cuatro ruedas de las esquinas por medio de cuatro servos. El centro de rotación queda alineado con las ruedas centrales y por lo tanto estas no necesitan modificar su orientación. La velocidad de todas las ruedas puede establecerse en el valor adecuado para evitar deslizamientos rotacionales al momento de dar una curva, gracias a las características del subsistema de tracción.
Subsistema de tracción	de	Cada rueda tiene acoplado directamente en su eje un motor-reductor DC. Solo se requieren cuatro señales de PWM para controlar los seis motores, tal como en la alternativa 1.

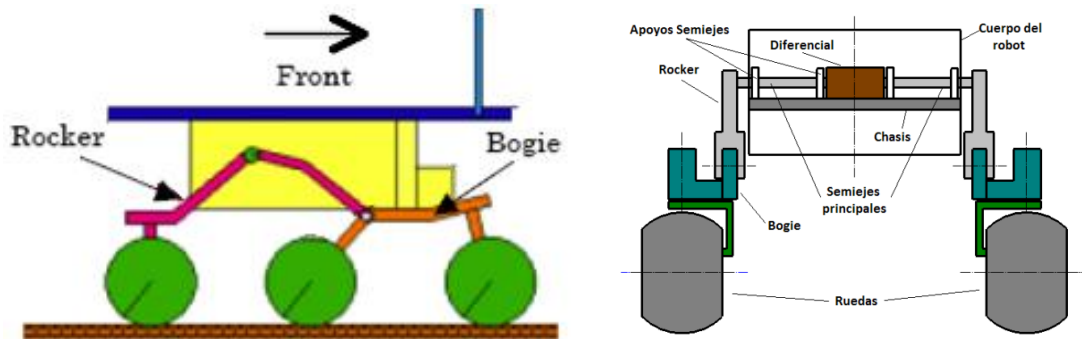


Figura 26. (Izquierda) Esquema del sistema de suspensión rocker bogie³⁸. (Derecha) Vista frontal del sistema de movilidad de la alternativa 3.

D. Alternativa N° 4: basada en el sistema de movilidad PEGASUS desarrollado en Japón³⁹. Este sistema de movilidad consta de 5 ruedas, un

³⁹ KURODA, Y, KONDO, K, NAKAMURA, K, KUNII, Y, KUBOTA, T. Low power mobility system for micro planetary rover "Micro5". Meiji University, Chuo University and The institute The institute of space and astronautical science (Japan). En: ISAIRAS 99. International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automatitaton in Space; 1999 Jun 1-3; Noordwijk, the Netherlands.

chasis partido en dos y una única junta que acopla las dos mitades del chasis, cada una de las cuales tiene dos llantas. La quinta rueda se ubica en el centro geométrico del robot. El sistema de suspensión de la alternativa N° 4, utiliza el concepto de superación de obstáculos empleado en dicho sistema de locomoción, pero a diferencia de PEGASUS, existe un único cuerpo en medio de dos sistemas de suspensión independientes cada uno con tres ruedas. Las características de esta alternativa se resumen en la tabla 9.

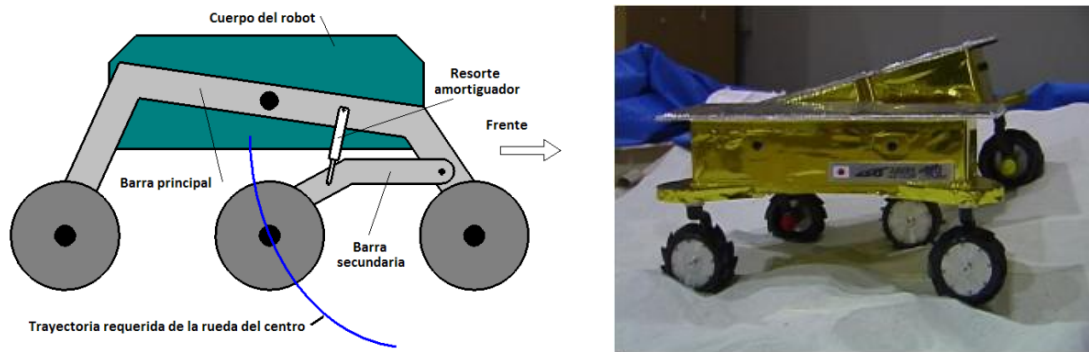


Figura 27. Esquema básico de la suspensión de la alternativa 4.

Tabla 9. Características del sistema de locomoción de la alternativa 4.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Nº de ruedas	6
Configuración geométrica de las ruedas	Tres ruedas en cada lado simétricamente distribuidas, tal como en las alternativas 1 y 3. (Figura 22)
Subsistema de suspensión (Figura 27)	Las ruedas delantera y trasera de cada lado se unen entre si por medio de una barra principal. Una barra secundaria que pivota en un punto cercano a la rueda delantera ubicado sobre la barra principal, sostiene la rueda central. Ambas barras principales se unen entre si por medio de un diferencial que mantiene el cuerpo

	del robot en una posición intermedia con respecto a la posición de las barras principales de cada lado. Este sistema permite la superación de obstáculos con alturas iguales al diámetro de las ruedas.
Chasis	El diferencial se une rígidamente al chasis por lo tanto el cuerpo puede mantenerse estable sin balancearse a pesar de estar aparentemente sostenido solo por un eje.
Subsistema de dirección	Dirección independiente de las cuatro ruedas de las esquinas por medio de cuatro servos conectados directamente al eje de dirección de cada una de ellas igual que en las alternativas 1 y 3.
Subsistema de tracción	Cada rueda tiene acoplado directamente en su eje un motor-reductor DC tal como se hace en las alternativas 1 y 3.

E. Alternativa N° 5: la alternativa 5 toma algunos elementos del SR2 desarrollado en la Universidad de Oklahoma⁴⁰. Esta configuración utiliza solo cuatro ruedas, por lo tanto tiene menores habilidades de superación de obstáculos que una configuración de seis ruedas, pero se tomó la decisión de considerarla porque su diseño resulta simple y económico. La descripción se resume en la tabla 10.

⁴⁰ MILLER, D, RAVINE, M, BELL, J, MALIN, M. Semi autonomous rover operation: a Mars technology program demonstration. Malin Space Science Systems, San Diego, CA; Cornell University, Ithaca, NY; School of aerospace & mechanical engineering, University of Oklahoma, Norman, OK, 2002.

Tabla 10. Características del sistema de locomoción de la alternativa 5.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Nº de ruedas	4
Configuración geométrica ruedas	Dos ruedas a lado y lado del cuerpo del robot. (Figura 28 izquierda)
Subsistema de suspensión (Figura 28 derecha)	Un bogie clásico que une las dos ruedas en cada lado del cuerpo del robot. Ambos bogies se unen entre si por medio de un diferencial que mantiene el cuerpo del robot en una posición intermedia con respecto a la posición de los mismos. Esta configuración solo permite la superación de obstáculos de alturas inferiores a la mitad del diámetro de las ruedas.
Chasis	El diferencial se une rígidamente al chasis por lo tanto el cuerpo puede mantenerse estable sin balancearse a pesar de estar aparentemente sostenido solo por un eje.
Mecanismos de dirección (Figura 29)	Dirección tipo ackerman, dos servomotores dan dirección independiente a las dos ruedas delanteras y las ruedas traseras hacen diferencial en el momento de dar una curva. Las velocidades de todas las ruedas y los ángulos de dirección de las ruedas delanteras se programan de tal forma que sean las adecuadas según los radios de giro de cada una de ellas. Puede girar alrededor de su propio eje haciendo girar las ruedas de un lado en sentido contrario a las ruedas del otro lado, aunque esto implica deslizamientos y mayores consumos de energía.
Subsistema de tracción	Cada rueda tiene acoplado directamente en su eje un motor-reductor DC los cuales se controlan por medio de cuatro señales independientes de PWM.

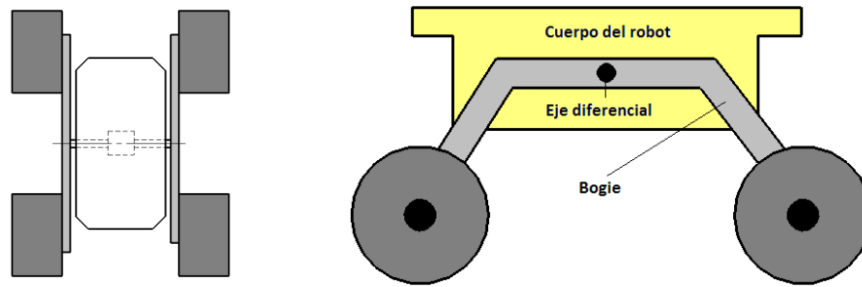


Figura 28. (Izquierda) Configuración geométrica de las ruedas alternativa cinco. (Derecha) Esquema básico de la suspensión.

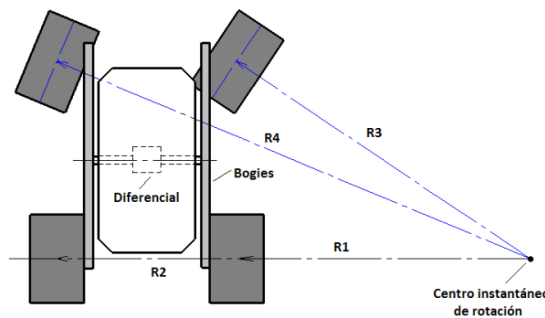
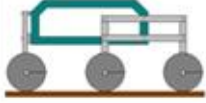

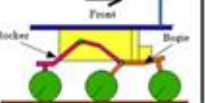
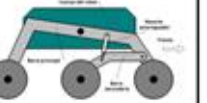
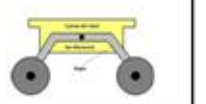


Figura 29. Sistema de dirección de la alternativa cinco.

3.3.2 Comparación entre las cinco alternativas. La figura 30 muestra un cuadro comparativo de las características principales de las diferentes alternativas consideradas. Las siguientes son características comunes entre las diferentes alternativas consideradas:

- La configuración geométrica de las ruedas y los subsistemas de tracción y dirección de las alternativas 1, 3 y 4 son idénticos.
- Las alternativas 3, 4 y 5 utilizan un diferencial para mantener el chasis y el cuerpo del robot en una posición intermedia con respecto a la posición de las barras a las que se conectan los semiejes principales del diferencial. El chasis en estas tres alternativas cumple la misma función y podría tener la misma forma en cualquiera de ellas.
- Las alternativas 3 y 4 solo se diferencian en el sistema de barras que utilizan para la suspensión.

Figura 30. Cuadro comparativo de las cinco alternativas de solución.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN CONSIDERADAS				
	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5
					
Número de ruedas	6	6	6	6	4
Configuración geométrica de las ruedas	Tres en cada lado	Dos en cada lado, una adelante y otra atrás	Tres en cada lado	Tres en cada lado	Dos en cada lado
Subsistema de suspensión	Tres mecanismos de cuatro barras, dos longitudinales y uno trasversal (trasero)	Un bogie paralelogramo en cada lado, un mecanismo de cuatro barras adelante y rueda trasera fija al chasis	Mecanismo de suspensión rocker bogie en cada lado, un diferencial que une los rockers	Un bogie y una rueda de asistencia para sobrepasar obstáculos en cada lado, un diferencial q une los bogies	Un bogie en cada lado unidos entre si por un mecanismo diferencial
Chasis	Se sostiene en tres puntos de apoyo dados por los tres mecanismos de cuatro barras	Se extiende hasta la rueda trasera, un punto de apoyo en cada lado y otro adelante	Estable y en una posición intermedia con los dos rockers gracial al diferencial.	Estable y en una posición intermedia con los dos bogies gracial al diferencial.	Estable y en una posición intermedia con los dos bogies gracial al diferencial.
Mástil sensor principal	Acoplado al chasis altura normal	Acoplado al chasis requiere de gran altura	Acoplado al chasis altura normal	Acoplado al chasis altura normal	Acoplado al chasis altura normal
Diferencial	No	No	Si	Si	Si
subsistema de dirección	4 servomotores	2 servomotores	4 servomotores	4 servomotores	2 servomotores
Deslizamiento de las ruedas en las curvas	NO	Si, en las cuatro ruedas de los lados del robot	NO	NO	Si, cuando gira sobre su eje
Giro sobre su propio eje	Si	Si	Si	Si	Si, por diferencia de velocidad de las 4 ruedas
Subsistema de tracción	6 motores	4 motores	6 motores	6 motores	4 motores
Numero aproximado de piezas	25	27	29	29	21
Altura aprox. de obstáculos superables (Nx Diam. ruedas)	1,25	2	1,25	1	0,4

3.3.3 Criterios de selección. Los criterios de selección se basan en los cuadros de los requerimientos establecidos en una de las secciones anteriores. A continuación se enumeran los criterios que serán utilizados para la selección de la alternativa adecuada

A. Innovación (20%): el diseño y la construcción del prototipo de robot móvil autónomo de exploración que se adelanta en este proyecto, se justifica porque se trata de un desarrollo propio que permite limitar en cierto sentido la dependencia tecnológica que se tiene con los países desarrollados. Teniendo en cuenta que las alternativas de solución consideradas se basan en prototipos desarrollados en diferentes instituciones del mundo, este criterio pretende evaluar las diferencias de las alternativas con respecto a dichos prototipos originales. Tales diferencias, en algunos casos como la alternativa 1 y 3 son muy pocas porque el diseño original no permite demasiados cambios, en otros casos como la alternativa 2 se pretende evaluar el comportamiento de la estructura reduciendo el número de motores.

La alternativa cuatro propone un sistema que toma elementos de varios robots dando como resultado un modelo original. La alternativa cinco también reúne algunas características de varios conceptos de locomoción y las combina para generar una propuesta única. Se pretende lograr un prototipo con algunas características particulares que lo diferencien de otros ya desarrollados; la innovación está en hacer algo diferente a lo ya realizado, hacer un aporte a los conceptos de locomoción o hacer una propuesta diferente en términos de su construcción.

Este criterio se considera uno de los más influyentes debido a que se quiere lograr un desarrollo original y con ciertas características únicas que lo distancien un poco de los robots que pueden encontrarse en el mercado.

B. Simplicidad en el diseño (20%): en ingeniería las soluciones más simples siempre son las mejores porque resultan ser las más económicas y fácilmente alcanzables o realizables. Sin embargo, no debe sacrificarse funcionalidad por simplicidad, se debe encontrar un diseño que combine adecuadamente estos dos conceptos. Un diseño simple puede favorecer factores como la facilidad en el control pero también puede desfavorecer otros como la maniobrabilidad y la capacidad de adaptación al terreno. En la medida de las posibilidades, se debe procurar, seleccionar un sistema de locomoción fácil de controlar, con buena maniobrabilidad, que brinde buenas habilidades de superación de obstáculos y cuyo diseño y funcionamiento sea simple.

Generalmente existe una relación directa entre sencillez y número de elementos o piezas necesarios. Entre mayor sea el número de piezas utilizado, el diseño y la construcción del prototipo resultan más complejos. Si las piezas están articuladas entre sí, la construcción se hace aún más crítica y más costosa pues se deben garantizar tolerancias en el mecanizado para lograr un correcto funcionamiento del ensamblaje. Además, al aumentar el número de piezas articuladas entre sí, disminuye la confiabilidad del prototipo. Por todas las razones anteriores se considera que este es un criterio muy influyente en la determinación de la solución y por consiguiente se le dio tal ponderación.

C. Costo (10%): aunque es difícil lograr un diseño de bajo costo cuando se trabaja en proyectos de robótica, no se puede desconocer que este es uno de los aspectos principales a tener en cuenta y que la parte económica juega un papel fundamental en la toma de decisiones trascendentales durante el desarrollo del proyecto. Teniendo en cuenta que a largo plazo se pretende reproducir el prototipo y formar un equipo de robots para utilizarlos en la realización de prácticas de laboratorio y en investigaciones de robots móviles

cooperativos, es necesario mantener un bajo costo del mismo, dadas las limitaciones económicas tanto de quienes lo están desarrollando como de la universidad, que asumiría los costos de los futuros modelos. Son muchos los aspectos que influyen en el costo del prototipo entre los cuales están: el número de motores y servomotores debido alto costo de estos componentes, formas complicadas que requieran de tiempos de mecanizado muy altos, uso de piezas complejas, uso engranajes, el número total de piezas requeridas.

Este factor no se le da una ponderación tan alta, debido a que se quiere dar mayor relevancia a otros aspectos como la innovación y los aspectos que tienen que ver con las habilidades del sistema de locomoción. Además hay que tener en cuenta que producir el primer prototipo siempre es más costoso que producir varios en serie. De otra parte la diferencia en costo de las diferentes alternativas no es tan considerable como para darle una ponderación más alta a este criterio. Por ejemplo, lo que se ahorra en la alternativa cinco al utilizar cuatro motores de tracción y no seis, se debe gastar en ruedas más grandes para poder superar los obstáculos de la altura requerida.

D. Capacidad de superación de obstáculos y adaptación al terreno (30%): debido a que el robot diseñado debe navegar a través del campus universitario (UIS), hay una diversidad de terrenos y obstáculos que puede encontrarse, los cuales fueron delimitados en la configuración de los requerimientos. Algunos de los sistemas de suspensión de las alternativas consideradas tienen mejores habilidades que otros. Las alternativas 1 a 4, cuentan con sistemas de suspensión que les permiten sobrepasar obstáculos de alturas iguales a uno o incluso dos veces (alternativa 2) el diámetro de sus ruedas. Adicionalmente, la alternativa dos tiene la capacidad de subir escaleras. El sistema de suspensión de la alternativa cinco le permite sobrepasar obstáculos cuya altura no exceda aprox. el 35% del diámetro de

sus ruedas. Los sistemas de suspensión de todas las alternativas tienen una buena adaptación a las irregularidades del terreno permitiendo que todas las ruedas estén en contacto permanente con el suelo.

E. Maniobrabilidad y controlabilidad (5%): la mejor alternativa de solución en términos de maniobrabilidad y controlabilidad es la que combina estos dos aspectos equilibradamente. La maniobrabilidad está altamente relacionada con el subsistema de dirección del móvil y con el tipo de ruedas utilizadas. En todas las alternativas consideradas se pueden utilizar ruedas estándar, por consiguiente, al utilizar el mismo tipo de ruedas, el desempeño en cuanto a maniobrabilidad y controlabilidad depende de la cinemática de los subsistemas de tracción y dirección de cada alternativa. Las alternativas 1, 3 y 4 utilizan el mismo sistema de dirección que mueve la rueda de cada esquina con un servo independiente lo que le da alta maniobrabilidad. La alternativa 2 utiliza solo dos servos al igual que la alternativa 5, sin embargo, es la única que presenta deslizamiento lateral de las ruedas de los lados en el momento de dar una curva. Todas las alternativas pueden realizar giro sobre su propio eje, pero la 5 tiene que hacerlo por diferencia de velocidades entre las ruedas de los dos lados, aceptando el deslizamiento lateral que esto conlleva. La maniobrabilidad de la alternativa 5 es limitada debido a que utiliza el sistema de dirección tipo ackerman.

Al utilizar mayor número de motores de tracción y servos de dirección aumenta la maniobrabilidad del móvil pero al mismo tiempo disminuye su controlabilidad. La controlabilidad se ve reducida cuando algún tipo de deslizamiento es ocurrido en alguna de las ruedas, tal como ocurre en las alternativas 2 y 5 (al girar sobre su propio eje). También, se deben tener en cuenta las señales de control requeridas, que dependen de la cinemática del móvil, pues en cierta medida de ellas depende la selección del controlador a usar. Entre menos señales sean requeridas el funcionamiento del controlador

es mejor. Las alternativas 1, 3 y 4 necesitan cuatro señales de control para los motores de tracción. La alternativa 2 requiere tres señales de control y la alternativa 5 requiere cuatro.

Debido a que la controlabilidad y maniobrabilidad son dos factores que se mantienen muy similares en todas las alternativas, este criterio no tiene gran influencia en la selección de la solución. Sin embargo, se consideraron estas características del sistema de locomoción como criterios de selección, porque existen algunas diferencias en el diseño y funcionamiento de los sistemas de dirección de las cinco alternativas consideradas.

F. Consumo de potencia (15%): este es un aspecto importante en el funcionamiento de un robot móvil. Se debe minimizar el consumo de energía del sistema de locomoción para lograr un funcionamiento continuo por mucho más tiempo. Para esto, lo principal es minimizar el peso total de la estructura del móvil, de esa forma se puede llevar una carga útil (payload) manteniendo un consumo de potencia moderado, que permita navegar por el tiempo requerido (una hora en este caso). La mayor parte de la potencia es consumida por el sistema de locomoción, es decir, los motores de tracción y los servomotores de dirección. Las alternativas 2 y 5 utilizan cuatro motores de tracción, lo cual hace pensar que pueden presentar un menor consumo de energía. El inconveniente que tiene la alternativa 2 es el deslizamiento lateral de las ruedas de los lados en las curvas y la consecuente pérdida de energía por fricción. De otra parte, estas dos alternativas utilizan solo dos servomotores para la dirección, contribuyendo aun más con el ahorro energético. Las alternativas 1, 3 y 4 utilizan seis motores de tracción y cuatro servomotores para la dirección, por lo tanto, podrían presentar consumos de energía muy similares entre si y mayores a los de las alternativas 2 y 5; no se puede decir que el consumo de energía es idéntico en estas tres alternativas, debido a que este también depende de la distribución de la carga sobre las

ruedas y del funcionamiento particular del sistema de suspensión de cada uno de ellos. La alternativa 5 podría utilizar ruedas más grandes (siempre se debe mantener una longitud inferior a 60 cm, la alternativa 5 solo tiene cuatro ruedas, dos en cada lado, mientras las otras alternativas tienen tres en cada lado), esto contribuiría a la disminución del hundimiento de las mismas cuando el robot se desplaza por suelos de arena ya que disminuye la presión de contacto, por lo tanto disminuye la potencia consumida¹. Sin embargo, al hacer giros sobre su propio eje, esta es la alternativa que presenta mayor consumo de potencia debido al deslizamiento lateral de sus cuatro ruedas.

En conclusión, se puede hacer una calificación cualitativa de las alternativas con respecto al consumo de potencia, teniendo en cuenta el número de motores y servos utilizados y considerando el funcionamiento esperado del sistema de suspensión de cada una de ellas como si tuvieran masas iguales.

3.3.4 Selección de la solución. La calificación se basa en análisis predictivo del desempeño esperado de cada alternativa frente a los diferentes requerimientos establecidos. El análisis puede ser cuantitativo si se utilizan ecuaciones o simulaciones, pero en este caso se hizo simplemente cualitativamente, con base en los resultados presentados en los diferentes documentos publicados por quienes desarrollaron los robots en los que se basaron las cinco alternativas.

En la tabla 11, se muestra la matriz de selección por medio de la cual se determinó la mejor alternativa de solución. La primera columna indica la prioridad que se le da al requerimiento, la cual sirve para definir cual es la mejor alternativa en caso de un empate. Por ejemplo, si dos alternativas quedan con el mismo puntaje final, se mira cual de las dos tiene mayor calificación en el criterio de prioridad uno, es decir el criterio de Innovación, si persiste el empate, se mira el segundo criterio y así sucesivamente. Si el

empate persistiera, un análisis más profundo que tenga en cuenta más criterios de selección, debe ser realizado a fin de establecer cual de las dos alternativas es la más conveniente. Existen cinco niveles de calificación cualitativa mostrados en la tabla 12.

Tabla 11. Matriz de selección de la solución.

	Criterios de selección	[%]	Alt 1		Alt 2		Alt 3		Alt 4		Alt 5	
1	Innovación	20	2	0,4	3	0,6	1	0,2	4	0,8	4	0,8
2	Simplicidad	20	3	0,6	1	0,2	4	0,8	4	0,8	4	0,8
3	Costo	10	4	0,4	3	0,3	3	0,3	3	0,3	5	0,5
4	Sup. obstáculos	30	4	1,2	5	1,5	4	1,2	4	1,2	2	0,6
5	Consumo de potencia	15	3	0,45	4	0,6	3	0,45	3	0,45	4	0,6
6	Maniob. y controlab.	5	4	0,2	3	0,15	4	0,2	4	0,2	3	0,15
Sumatorias totales		100		3.25		3.35		3.15		3.75		3.45

Según lo mostrado en la tabla 11, **la alternativa a desarrollar es la número cuatro**, pues combina de la mejor forma todas sus características para satisfacer los requerimientos planteados.

Tabla 12. Calificación cualitativa de las alternativas de solución.

Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

3.4 CONFIGURACIÓN DETALLADA

En esta etapa, también llamada diseño detallado, se lleva el concepto de locomoción de una simple idea a un estado en el cual están definidos en detalle todos los elementos necesarios para el funcionamiento adecuado del mismo. En el diseño se tuvieron en cuenta aspectos como la facilidad,

viabilidad del proceso de fabricación, el costo de fabricación, el ensamblaje con las demás piezas, la facilidad en el mantenimiento, la forma y la apariencia estética y la funcionalidad. Es posible definir varias sub-etapas dentro de esta parte del proceso de diseño, las cuales se muestran en la figura 31.

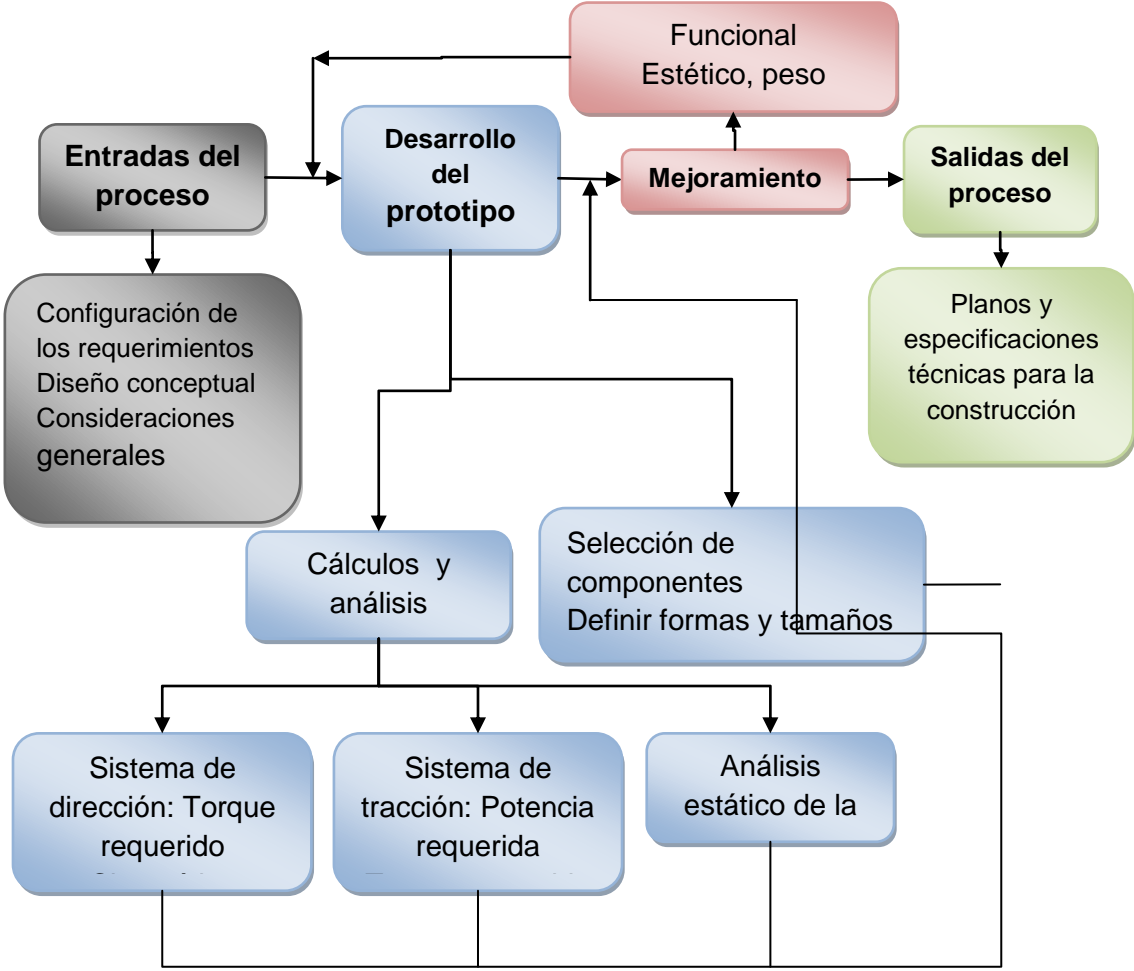


Figura 31. Diagrama de flujo del proceso de diseño detallado

3.4.1 Entradas del proceso.

A. Configuración de los requerimientos: todos los requerimientos consignados en las tablas 1 a 4 deben tenerse presentes en el proceso de diseño detallado. Además también deben tenerse presentes las relaciones establecidas entre algunos requerimientos y los subsistemas de locomoción que fueron tratadas en la sección 3.1.

B. Configuración fundamental: en la sección anterior se determinó que la alternativa 4 satisface todos los requerimientos de diseño y por lo tanto es la que debe ser desarrollada en detalle.

C. Consideraciones generales: son las pautas generales de diseño y se mencionan a continuación:

- *Material para las piezas a mecanizar:* aluminio estructural. Este material se seleccionó principalmente por su bajo peso y buena resistencia mecánica, además de que se puede mecanizar fácilmente y es ampliamente ofrecido en el mercado nacional en diferentes presentaciones. El aluminio estructural se consigue en muchas formas entre las cuales están:

- Varillas macizas de sección redonda en diámetros hasta 6", venta por cm.
- Varillas macizas de sección cuadradas de hasta 6" de lado, venta por cm.
- Platinas de hasta 1/2"x4" o 1/4"x6", venta por m.
- Láminas lisas de 90x210 cm², hasta 1" de espesor, venta lámina completa.
- Perfiles en L, C, H y muchos otros utilizados en diseños arquitectónicos, venta por metros.

Se determinó utilizar lámina o platina de 1/4" de espesor. También es necesario utilizar algunas varillas macizas para mecanizar los ejes. Para el

chasis se decidió utilizar tubo de sección cuadrada de 1/2" de lado, por resistencia y bajo peso.

- *Unir las piezas por medio de tornillos:* utilizar tornillo de cabeza bristoll (allen), en lo posible de un solo diámetro para que pocas herramientas sean necesarias en el ensamble y mantenimiento. La idea es que la estructura del robot sea fácilmente armable y desarmable. Teniendo en cuenta que el material a partir del cual serán mecanizadas la mayoría de las piezas de la estructura es de un cuarto de espesor, los tornillos deben ser de un octavo de diámetro.

- *Otros materiales:* para la construcción de engranajes, bujes y piezas que puedan sufrir desgaste, se plantearán dos opciones: la primera es el bronce por sus excelentes propiedades anti desgaste y su facilidad en el mecanizado; la segunda opción es utilizar teflón o algún otro tipo de plástico que se consiga fácilmente.

- *Maquinas necesarias para el mecanizado de las piezas:*

- Centro de mecanizado CNC: la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander cuenta con un centro de mecanizado CNC LEADWELL V20, disponible para la fabricación de las piezas con formas complicadas o que requieran de cierta precisión. Lo ideal, por la precisión que requiere la aplicación, es mecanizar las piezas planas de 1/4" de espesor en este centro de mecanizado. En el diseño de las piezas y el proceso de mecanizado se debe tener en cuenta el espacio máximo de trabajo que brinda esta maquina, igual a 350mmx508 mm².
- Torno convencional: los ejes y bujes son piezas con formas simples que pueden ser mecanizadas en tornos convencionales. La escuela también cuenta con un taller de máquinas, herramientas y operarios calificados que pueden mecanizar dichas piezas.

- Fresadora convencional: engranajes y algunas otras piezas que requieran operaciones simples de fresado pueden ser mecanizadas en fresadoras convencionales. En el taller de la escuela también existe una fresadora convencional disponible para la realización de dichas piezas.
- Taladro de árbol: los agujeros de las piezas planas que no pueden ser realizados en el centro de mecanizado, deben hacerse utilizando un taladro de árbol para garantizar la perpendicularidad con respecto a la superficie taladrada.

- *Distancia entre ruedas:* teniendo en cuenta que la longitud máxima del robot no debe exceder 60 cm, según lo establecido en los objetivos y que el diámetro de las ruedas es 14 cm, la distancia entre ruedas debe ser igual a:

$$Lr = \frac{L_{total} - D_{rueda}}{2} = \frac{60 - 14}{2} = 23 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 1})$$

- *Ajustes de las piezas:* los ajustes deben permitir un armado y desarmado manual, sin necesidad de prensas o extractores.

D. Ruedas: debido a que el diseño debe adaptarse a la forma y tamaño de estos elementos, las ruedas también son tratadas como entradas del proceso. La figura 32 muestra una imagen de las ruedas de cinco pulgadas y media de diámetro que fueron finalmente adquiridas. Las dimensiones reales de las ruedas son las siguientes:

Diámetro interno: 3" (77 mm)

Diámetro externo: 5,5" (140 mm)

Ancho externo: 3,3" (84 mm)

3.4.2 Desarrollo del prototipo. Una vez definidas las entradas del proceso de diseño, se puede iniciar el desarrollo del prototipo. Esta parte tiene por objetivo definir completamente los materiales, las formas y dimensiones

finales de las piezas, las uniones y acoples entre ellas y detallar la geometría de los mecanismos requeridos. Además, se realizan los cálculos o estudios necesarios para garantizar el correcto funcionamiento y durabilidad de todas las partes. El capítulo 4 esta dedicado a mostrar el desarrollo del prototipo.



Figura 32. Ruedas adquiridas para el prototipo.

3.4.3 Mejoramiento. Trata de optimizar la geometría y el diseño de los subsistemas de locomoción, es decir, la tracción, la transmisión, la dirección y la suspensión. En el mejoramiento de la estructura se trabajan tres aspectos:

Funcional: se busca mejorar la funcionalidad de todos los subsistemas individualmente e interactuando entre si. Además debe considerarse la interacción del sistema de locomoción con el sistema de sensores de percepción de entorno y demás componentes electrónicos.

Estético: este aspecto es algunas veces descuidado en los proyectos de ingeniería. Algunos de los conceptos aplicados fueron:

- Congruencia en las líneas que definen la forma de todos los elementos del sistema. Si se utilizan líneas curvas, hay que tratar de que todos los elementos tengan el mismo estilo de línea. Si se combinan líneas rectas con curvas, pensar que las líneas de una pieza sean la continuación de las líneas de la pieza contigua.

- Ciertos detalles pueden ser repetidos en varias piezas de la estructura para dar uniformidad al diseño de la misma.
- Hacer una estructura estilizada, discreta y el cuerpo del robot pequeño, de tal forma que las ruedas grandes y los rines de aluminio sobresalgan y resalten.
- Ocultar los cables. Además de tener un fin estético, los cables deben ocultarse para evitar que se enreden con elementos propios del ambiente explorado, tales como rocas, ramas, vegetación, etc.

Peso mínimo: como se ha dicho antes, al minimizar el peso se reduce el consumo de potencia y se obtiene un funcionamiento del robot por mayor tiempo haciendo uso de baterías recargables de bajo peso. Minimizar el peso implica reducir el tamaño de las piezas tanto como sea posible teniendo en cuenta su rigidez, resistencia mecánica y funcionalidad. También implica una mayor cantidad de material removido durante el mecanizado de las mismas. Como consecuencia de esto, los tiempos de mecanizado aumentan y por consiguiente el costo de la estructura también. Un software CAE es necesario para facilitar la verificación de resistencia de las piezas con condiciones de carga más críticas.

3.4.4 Salidas del proceso. Después del proceso de optimización se obtiene un diseño 3D en detalle de todas las piezas que conforman la estructura del vehículo. Las salidas del proceso en este caso son los planos de las piezas y los diseños tridimensionales de las mismas que son requeridos para ser tratados en software CAM para su construcción en el centro de mecanizado CNC.

4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DEL PROTOTIPO

Este capítulo muestra el desarrollo de todos los subsistemas que conforman el sistema de locomoción del robot móvil autónomo explorador. Inicialmente se exponen las diferentes versiones del diseño global del robot autónomo. Seguidamente se muestran los cálculos, estudios y análisis realizados en el diseño de cada subsistema, así como el desarrollo y mejoramiento al que fue sometido cada uno de ellos. En primer lugar se tratará el subsistema de suspensión, seguido de los subsistemas de dirección, diferencial, chasis y tracción. Finalmente se presenta la verificación estructural de las barras de suspensión, de los rines y del resorte de la suspensión.

4.1 VERSIONES GENERALES DE DISEÑO

El diseño CAD de la estructura de locomoción, desarrollado en **SolidWorks Office Premium 2007**, tuvo varias versiones en las cuales puede verse reflejada la evolución que tuvo cada uno de los subsistemas. Durante la etapa de diseño asistido por computador se trabajó en todos los subsistemas simultáneamente. Por consiguiente, cualquier cambio en uno de ellos significaba cambios en los demás. Esta es la razón por la cual surgieron en total cinco versiones de diseño. La figura 33 muestra las versiones inicial y final del diseño detallado del sistema de locomoción. Todas las versiones desarrolladas se diferencian en la forma de las barras de suspensión o en el sistema de dirección.

4.2 SUBSISTEMA DE SUSPENSIÓN

El subsistema de suspensión en los robots de exploración para ambientes externos, cumple las siguientes funciones:

- Brindar estabilidad estática y dinámica al robot.
- Brindar capacidad de superación de obstáculos y adaptación al terreno, para esto es necesario un nivel alto de escualización y un mecanismo que le facilite la superación de los obstáculos.
- Evitar vibraciones u oscilaciones del cuerpo del robot, para esto debe tener cierta capacidad de amortiguación.



Figura 33. (Izquierda) Versión inicial (Renderizada por Edwin Mosquera, Diseñador Industrial, UIS). (Derecha) Versión final (PhotoWorks).

4.2.1 Mecanismo de suspensión seleccionado. El subsistema de suspensión seleccionado es una combinación entre los sistemas de movilidad Rocker-bogie de los exploradores de la NASA y el sistema de movilidad PEGASUS, desarrollado por la agencia espacial japonesa. Del sistema de movilidad PEGASUS se tomó el principio de funcionamiento para la superación de obstáculos y del sistema de movilidad de los “MER” se tomó la idea de un cuerpo central y del diferencial que une a los dos mecanismos idénticos de suspensión ubicados a lado y lado de dicho cuerpo. Como los mecanismos de cada lado del robot son iguales, el análisis de la suspensión puede hacerse en dos dimensiones como si se estuviera viendo el mecanismo de un solo lado. El principio de funcionamiento de este sistema de suspensión se muestra en la figura 34 y se explica a continuación:

“El sistema PEGASUS fue diseñado para distribuir el peso igualmente en todas las ruedas cuando el robot esta subiendo un obstáculo. Esto significa que la rueda central soporta la carga tomada de la rueda delantera mientras esta se eleva para pasar sobre el obstáculo y también toma la carga de la rueda trasera cuando esta se encuentra superando el obstáculo. Como se muestra en la figura 34, una fuerza vertical hacia arriba es originada en el punto B, cuando la rueda delantera toca la pared del obstáculo. Esta fuerza surge como reacción a la fuerza de tracción de la rueda central. Cuando la rueda trasera sube el obstáculo, la fuerza hacia adelante generada por la tracción de la ruedas central y delantera (# 1 en la **figura 34**), empuja la rueda trasera hacia atrás (# 2 en la **figura 34**). Esas fuerzas producen un momento (#3) que eleva la parte trasera del móvil y que se convierte en una fuerza vertical sobre la rueda delantera (#4) incrementando su tracción y ayudando a la rueda trasera a superar el obstáculo”⁴¹.

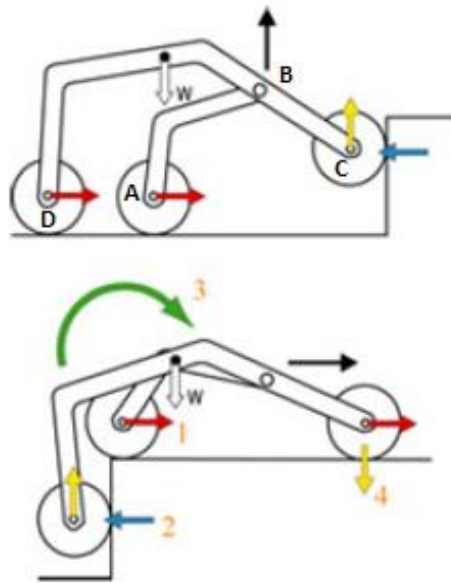


Figura 34. Fuerzas que intervienen en la superación de obstáculos⁴¹.

⁴¹ KURODA, Y, TESHIMA, T, SATO, Y. Mobility Performance Evaluation of Planetary Rover with Similarity Model Experiment. The Institute of Space and Astronautical Science Japan Aerospace Exploration Agency. IEEE ICRA2004 - Final Paper, April 26-May 1. 2004, New Orleans, LA, USA

En el Anexo B se muestra un análisis detallado de la cinemática y cinética de este mecanismo de suspensión, así como las conclusiones de las simulaciones que se hicieron en Working Model 2D. De estos análisis hay tres conclusiones principales que son:

- El punto de pivote de la barra secundaria debe quedar tan cercano a la línea vertical que pasa por el centro de la rueda delantera y tan bajo como sea posible.
- El centro de gravedad del robot debe quedar tan cerca de la mitad longitudinal del mismo y tan bajo como sea posible.
- Un resorte debe ser utilizado entre las barras principal y secundaria.

Por medio de un prototipo en madera (**Figura 35**) se verificó el funcionamiento del sistema de suspensión frente a la superación de obstáculos.



Figura 35. Prototipo preliminar del sistema de suspensión seleccionado.

4.2.2 Diseño de la geometría de las barras de suspensión. Las barras principales y secundarias de suspensión fueron diseñadas para ser obtenidas de una lámina o platina de un cuarto de pulgada de espesor, mediante un proceso de remoción de material en un centro de mecanizado CNC.

A. Barras principales: atornillados a estas barras deben ir los soportes para el sistema de dirección. Además, debe existir un punto de acople con la barra secundaria ubicado en una posición cercana a su extremo delantero, de tal forma que esta pueda pivotar libremente. También debe diseñarse un sistema de acople de cada barra con el eje principal del diferencial correspondiente.

Durante el diseño de las barras principales de suspensión se desarrollaron varias versiones antes de lograr una que fuera estéticamente agradable y que cumpliera con todos los requisitos de funcionalidad establecidos. Las versiones desarrolladas se muestran en la figura 36.

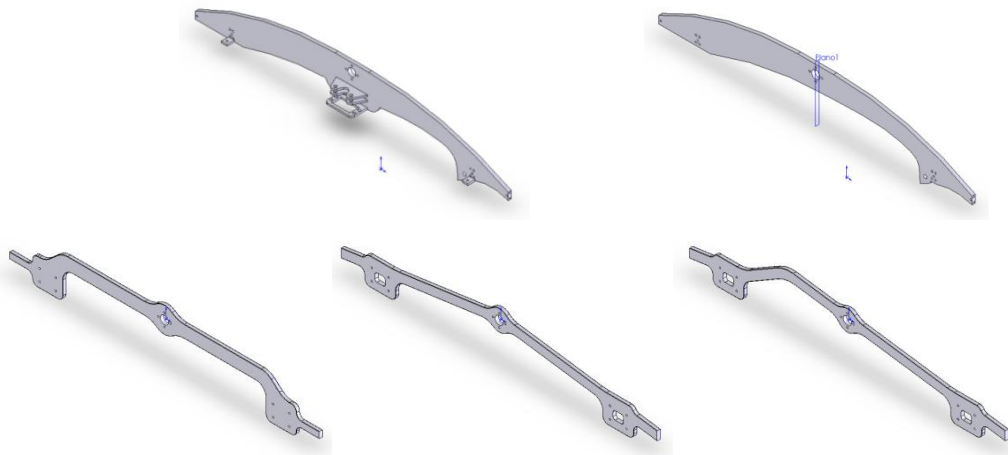


Figura 36. Diseños preliminares de las barras principales de suspensión.

La figura 37, muestra una imagen del diseño definitivo de las barras principales de suspensión. El vaciado pasante de la parte posterior de la pieza es un detalle que da uniformidad al diseño global del robot, pues como se verá mas adelante, la barra secundaria tiene un detalle muy similar. Además, se hizo un vaciado o adelgazamiento por la parte interna de la pieza (**Figura 37** - barra principal izquierda), con el objetivo de disminuir su peso y permitir el paso de los cables de los motores de tracción, servomotores de

dirección, encoders y sensores. Este diseño de las barras principales de suspensión será sometido a análisis estructural para verificar su resistencia y rigidez ante las cargas que debe soportar.

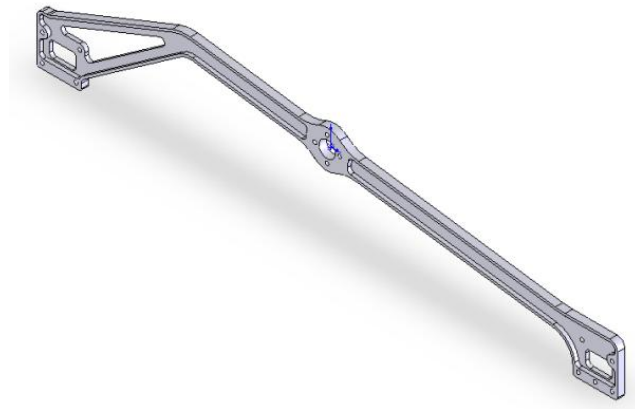


Figura 37. Versión definitiva de las barras principales de suspensión.

B. Barras secundarias: la **versión uno** del diseño de la barra secundaria (**Figura 38**) tiene una forma que tiende a mantener el tipo de curvas utilizadas en las versiones uno y dos del diseño de la barra principal. En esta versión el eje del pivote queda a doble corte ya que la barra principal está en medio de la horquilla, tal como puede apreciarse en la figura 38 derecha.

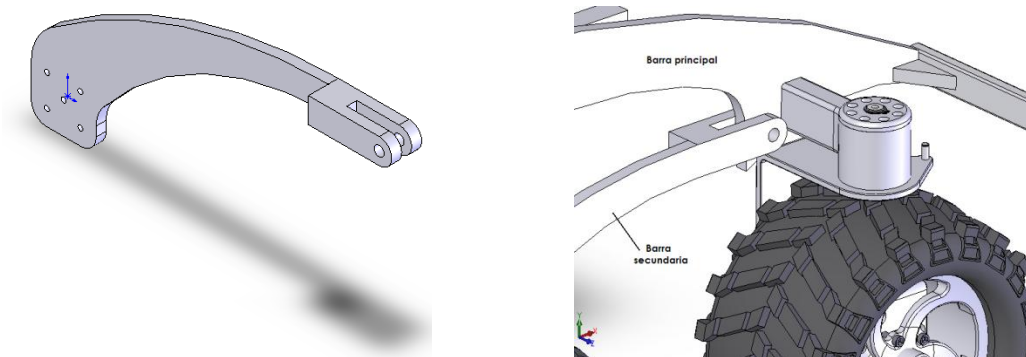


Figura 38. Versión uno del diseño de la barra secundaria de la suspensión

La versión dos del diseño de la barra secundaria es mostrada en la figura 39. Su forma resulta de una combinación de líneas rectas y curvas. También, se

agregó un vaciado interno o adelgazamiento para reducir su peso y pasar los cables del motor de la rueda central correspondiente. Como las cargas que soporta son pequeñas y su longitud también, no hay problemas con la rigidez y resistencia al hacer tal adelgazamiento y tampoco es necesario realizar análisis estructural. Las pestañas que quedan por todo el borde interno de la pieza (**figura 39** izquierda) ayudan a mantener la rigidez y resistencia de la misma. El eje del pivote sigue quedando a cortante doble gracias a que ahora se apoya en uno de los soportes de dirección de la rueda delantera (**figura 39** derecha). El pasador es un tornillo que atraviesa las barras primaria y secundaria hasta el agujero roscado del soporte de dirección. Un buje de bronce evita el desgaste del aluminio por fricción constante con el tornillo-pasador y/o con la barra principal y el soporte de dirección. La versión dos es la versión definitiva.

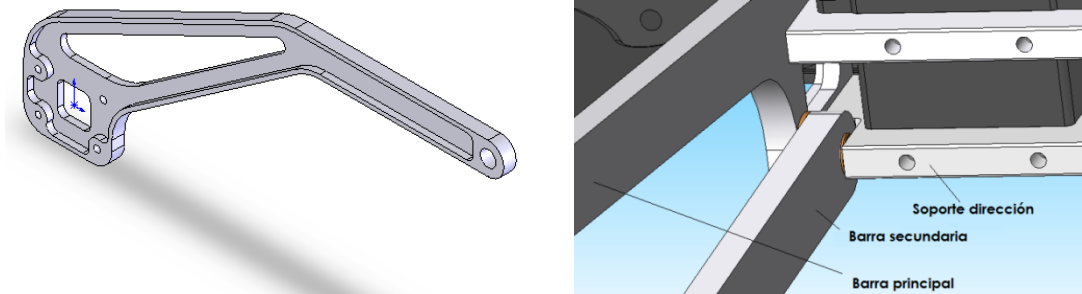


Figura 39. Versión definitiva del diseño de la barra secundaria de suspensión.

4.3 SUBSISTEMA DE DIRECCIÓN

Tal como fue definido en el capítulo anterior, las cuatro ruedas de las esquinas deben tener dirección independiente cada una de ellas movida por un servomotor. En esta sección se muestra la selección del tipo de rueda a utilizar, las alternativas de diseño que se consideraron para este subsistema,

el desarrollo de la alternativa seleccionada y la selección de los rodamientos y servomotores.

4.3.1 Tipo de rueda. El primer aspecto a considerar en el diseño detallado del subsistema de dirección es el tipo de rueda a utilizar. Tal como fue mencionado en el capítulo 2, existen varios tipos de rueda, entre los cuales están la rueda estándar, la rueda tipo caster, la rueda sueca y las ruedas esféricas (ver capítulo 2). La selección del tipo de rueda a utilizar para un robot móvil esta fuertemente ligada a la selección de la configuración de las ruedas [22] y al nivel de maniobrabilidad requerido.

Después de analizar los cuatro tipos de ruedas, se encontró que las ruedas estándar y las caster son las más adecuadas para las cuatro ruedas dirigibles de este robot, teniendo en cuenta la configuración de tres ruedas en cada lado, el sistema de suspensión y los terrenos variados a través de los cuales debe navegar. Las ruedas estándar se caracterizan por tener un eje de dirección vertical que pasa por el centro de la rueda, es decir tienen un ángulo caster igual a cero. En las ruedas caster el eje de dirección puede ser vertical y pasar por un punto por delante del punto de contacto de la rueda con el suelo o puede ser inclinado y tener un ángulo caster diferente de cero. Ambos tipos de rueda tienen tracción. La rueda estándar que presenta algunas ventajas y desventajas que son resumidas a continuación:

Ventajas.

- Cuando se da dirección a las ruedas, no existen fuerzas de deslizamiento lateral que sean transmitidas a la estructura de la suspensión del vehículo, en las ruedas caster si.

- La relación entre el ángulo de giro del eje de dirección y el ángulo de giro requerido para orientar el vehículo en la dirección deseada, es uno a uno, en las ruedas caster no.
- Menos potencia es requerida para dar dirección al vehículo debido a que se minimiza el deslizamiento de las ruedas en tal proceso. Las ruedas caster requieren mas potencia
- Cuando se da dirección, las ruedas estándar siempre permanecen verticales y por tanto pueden tener una periferia plana mientras que las caster requieren de una periferia curva para mantener una mayor área de contacto entre la rueda y el suelo.

Desventajas.

- Tiene poca estabilidad. El hecho de tener un ángulo caster igual a cero limita la estabilidad de la rueda.
- El servo que controla el ángulo de dirección de cada rueda es el único que puede mantener su estabilidad y por lo tanto va a soportar mayores esfuerzos.

Por simplicidad, facilidad en la construcción y dando relevancia a las ventajas, se tomó la decisión de utilizar ruedas tipo estándar. Además, se busca experimentar su comportamiento en terrenos irregulares y rugosos y también su funcionamiento durante la superación de obstáculos. A pesar de que el servo debe trabajar un poco más, se considera que una adecuada selección de éste, garantizará el correcto funcionamiento del subsistema de dirección y la estabilidad necesaria de cada rueda.

4.3.2 Diseño detallado del subsistema de dirección. Este subsistema tuvo dos versiones de diseño. La primera se relaciona con la versión uno y dos del diseño de las barras de suspensión y la segunda con las versiones tres, cuatro, cinco y seis.

La versión uno consideraba el uso de un solo servo de dirección ubicado en la parte central de la barra principal de suspensión, un par de engranajes y barras para dar dirección simultáneamente a las ruedas delantera y trasera del lado correspondiente. Esta opción tuvo que ser descartada por que se encontró que un solo servo no era suficiente para dar movimiento simultáneo a las dos ruedas, porque el sistema resultaba más costoso y menos confiable dada la cantidad de piezas y elementos móviles que requería. En la figura 40 pueden apreciarse los elementos principales que conforman este diseño, excepto la barra que une el engranaje con la pieza en forma de L.

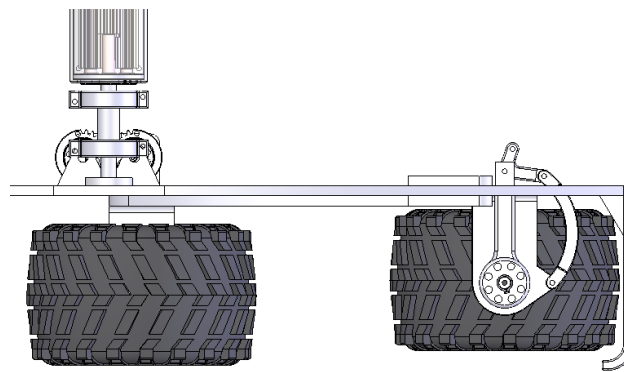


Figura 40. Versión uno del diseño del sistema de dirección.

La versión dos del diseño del subsistema retomó la idea que se había planteado inicialmente en el diseño conceptual, es decir, el uso de un servomotor para dar dirección a cada rueda. En la figura 41 pueden ser apreciados todos los elementos que conforman este diseño. Dos opciones fueron planteadas para acoplar el servo con el eje de dirección: acoplar el eje de salida del servo directamente al eje de dirección y/o utilizar una transmisión de engranajes rectos entre el servo y el eje de dirección. La primera opción tenía varias desventajas, entre ellas la principal era que el mecanismo de dirección quedaba muy alto y podía interferir en el campo de visión de algún sensor o en el espacio de trabajo de un manipulador. Además, no existía ninguna ganancia mecánica que facilitara el trabajo del servo.

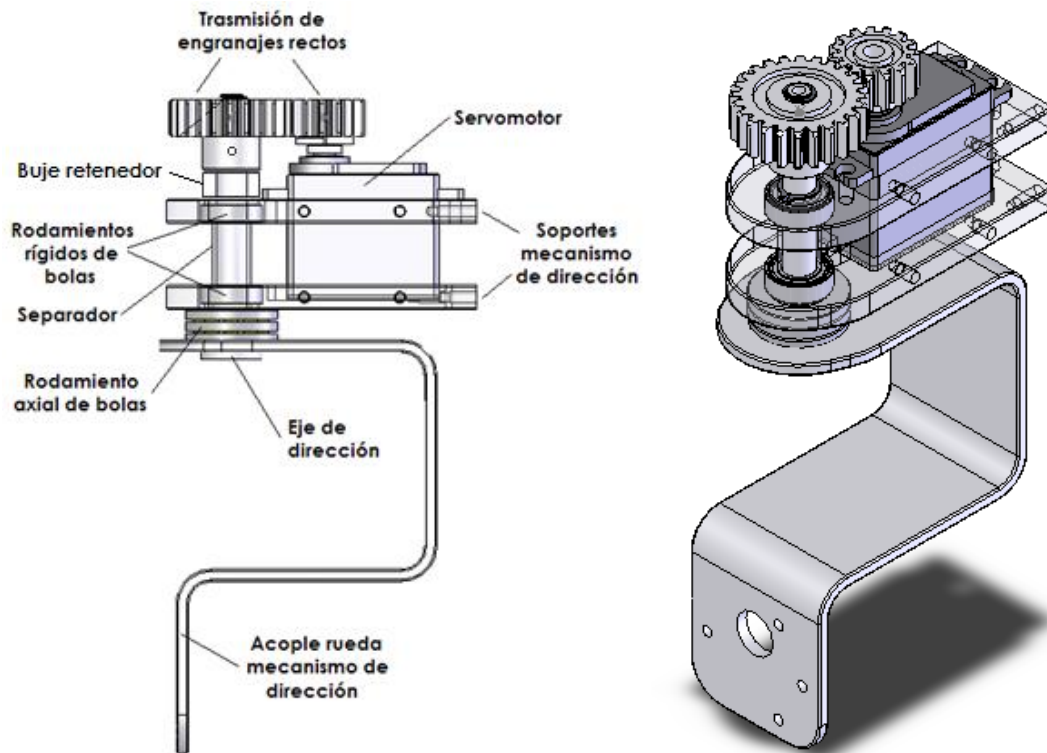


Figura 41. Elementos que conforman el mecanismo de dirección del robot.

La segunda opción elimina tales inconvenientes. El eje de salida del servo y el eje de dirección son paralelos y no colineales como en la primera opción, por lo tanto, el servo se puede colocar con la salida hacia arriba para que la altura total del mecanismo sea igual a la longitud del eje de dirección sumada a la altura de los engranajes. El mecanismo completo queda más compacto y con un mejor uso del espacio. Además, la transmisión se puede diseñar de tal forma que se obtenga una ganancia mecánica que facilite el trabajo del servo. Algunos otros detalles de la versión dos del diseño del sistema de dirección son mencionados a continuación:

- Un rodamiento axial de bolas es utilizado para minimizar la fricción y facilitar el movimiento entre la pieza doblada (acople rueda mecanismo de

dirección) y el soporte inferior del mecanismo de dirección (que va atornillado a la barra principal de suspensión). Este rodamiento es necesario pues soporta la carga vertical mientras permite el giro de la rueda alrededor del eje de dirección.

- En cada soporte de dirección, los cuales serán obtenidos a partir de una platina de aluminio de un cuarto de espesor por medio de un proceso de remoción de material en CNC, se inserta un rodamiento rígido de bolas (ajuste forzado), para dar dos apoyos al eje de dirección y permitir que gire suavemente soportando las cargas transversales que pueda tener.
- El buje retenedor evita que el eje se mueva hacia abajo (debido al peso de la rueda, el motor de tracción y la pieza doblada), cuando el robot sea levantado del suelo. Esto podría llegar a suceder porque los ajustes entre el eje de dirección y los rodamientos rígidos de bolas, que deben ser forzados suaves para permitir un montaje manual, pueden quedar demasiado sueltos.
- Un separador o buje de aluminio es utilizado para que la distancia entre los dos soportes de dirección se mantenga constante y para que la fuerza vertical sea soportada por ambos. El separador debe quedar en contacto con las pistas interiores de los rodamientos radiales y tener un ajuste giratorio con el eje.
- El servo pasa a través del soporte de dirección superior y debe asentar en el soporte de dirección inferior para que su carcasa también ayude a transmitir la carga vertical al soporte de dirección superior.
- El engranaje grande se ajusta al eje de dirección por medio de un tornillo prisionero. Dicho tornillo impide el movimiento axial y tangencial del engranaje con respecto al eje. El eje debe permanecer redondo en la zona que recibe el tornillo para permitir la alineación manual de la rueda y como medida de protección del servo, de tal forma que si la rueda recibe un fuerte impacto, el eje pueda girarse cuando el servo llegue a su tope.

- El “acople rueda mecanismo de dirección”, trasmite el giro del eje de dirección al motor de tracción (que va atornillado en su parte inferior y que esta acoplado a la rueda). Esta pieza debe ser fabricada en platina de aluminio de un octavo de espesor, con dobleces a noventa grados. El eje de dirección debe unirse rígidamente con esta pieza doblada por medio de tornillos o remaches.

4.3.3 Selección de rodamientos. Los rodamientos fueron seleccionados teniendo en cuenta las restricciones geométricas que limitaban su tamaño.

A. Rodamientos radiales: la restricción geométrica está impuesta por el espesor de la platina en la cual deben ser insertados, es decir, 6,35 mm (1/4”), por lo tanto la altura del rodamiento no puede exceder este valor. El rodamiento seleccionado soporta 570 N de carga radial estática, tiene una altura de 5 mm, diámetro interno 8 mm y diámetro externo 16 mm⁴². La selección de estos rodamientos se hizo pensando en que también pudieran ser utilizados en los apoyos de los ejes principales del diferencial que serán mostrados mas adelante. La figura 42 muestra las dimensiones principales de este rodamiento y las recomendaciones de montaje que se tuvieron en cuenta en la geometría de los soportes de dirección. Las tolerancias recomendadas serán mostradas en el capítulo 5.

B. Rodamientos axiales: estos rodamientos deben soportar carga en una sola dirección, por lo tanto, es requerido un rodamiento de una sola hilera de bolas. Los rodamientos axiales soportan una gran cantidad de carga estática razón por la cual la selección debe hacerse nuevamente pensando principalmente en las dimensiones geométricas. Teniendo en cuenta que el eje de dirección debe tener un diámetro igual a 8 mm para ajustar los rodamiento rígidos de bolas, el rodamiento axial debería tener el diámetro

⁴² www.skf.com

interno igual o ligeramente superior a este valor. Por tal razón se seleccionó el rodamiento de 10 mm de diámetro interno que puede soportar hasta 15300N de carga axial. Todas las dimensiones y las recomendaciones del montaje de este rodamiento, las cuales se tuvieron en cuenta en la definición de la geometría de las piezas con las que el rodamiento queda en contacto, se muestran en la figura 43.

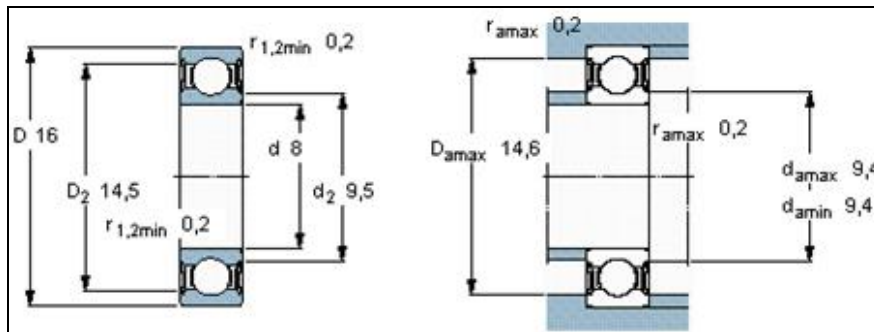


Figura 42. Rodamiento rígido de bolas seleccionado⁴²

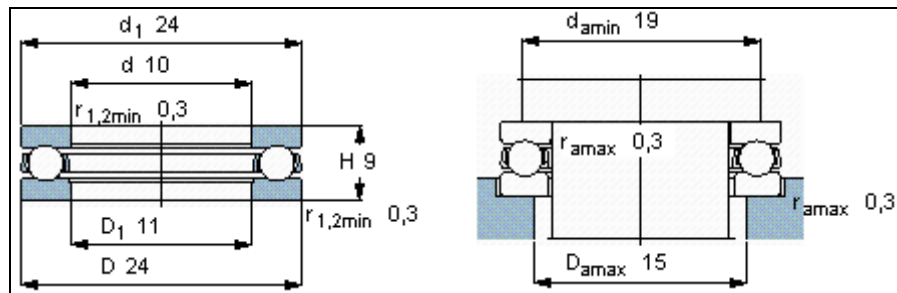


Figura 43. Rodamiento axial de bolas seleccionado⁴²

4.3.4 Cálculo de la transmisión de engranajes. Por facilidad en su construcción y simplicidad en el diseño, se resolvió utilizar engranajes rectos para la transmisión requerida en el mecanismo de dirección. Al calcular dicha transmisión de engranajes las condiciones que deben respetarse son las siguientes:

- Distancia entre centros de los engranajes entre 24 y 26 mm. La distancia entre centros no puede ser inferior a 24 mm teniendo en cuenta el tamaño del servo estándar y los rodamientos rígidos de bolas que fueron seleccionados. No puede ser superior a 26 mm pues se estaría agregando material innecesario, lo cual va en detrimento del peso mínimo que debe tener el robot.
- Angulo de barrido de la rueda mayor o igual a 110° (**Figura 44**). Por consiguiente, la relación de transmisión debe ser menor o igual a 1.6 ($180^\circ/110^\circ$ teniendo en cuenta que la mayoría de servos ofrecidos en el mercado tienen un ángulo de barrido igual a 180°). Es conveniente tener una relación de transmisión tan cercana a 1.6 como sea posible, para tener una mayor torque disponible en el eje de dirección.

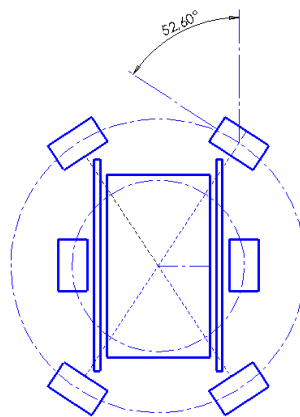


Figura 44. Ángulo máximo de dirección requerido.

Cuando el robot va a realizar un giro sobre su propio eje debe disponer las ruedas tal y como se muestra en la figura 44. La prolongación del eje de la rueda debe pasar el centro geométrico de la estructura, por consiguiente su ángulo de orientación debe ser $52,6^\circ$, teniendo en cuenta unas dimensiones externas iguales a 600×434 . Este valor fue obtenido gracias al modelo CAD desarrollado en *SolidWorks*. Teniendo esto en cuenta, el ángulo mínimo de barrido debe ser igual a $105,2^\circ$ ($2 \times 52,6^\circ$), sin embargo, previendo alguna

modificación posterior en el ancho del robot que cause un aumento en dicho ángulo, este valor se estableció en 110°.

Los engranajes requeridos fueron seleccionados del catálogo virtual de la empresa “*Stock Drive Products/Sterling Instrument (SDP/SI)*”. Como estos engranajes no soportarán grandes esfuerzos y deben ser livianos, y teniendo en cuenta que los engranajes de los servos que se utilizarán para dar los movimientos de dirección son plásticos, se decidió seleccionar también engranajes plásticos para esta transmisión. No obstante, se eligió módulo 1.25 para garantizar su resistencia y durabilidad. La selección se realizó con base en la relación de transmisión y la distancia entre centros requeridas.

Tabla 13. Resultados de los cálculos realizados para determinar el número óptimo de dientes de los engranajes del subsistema de dirección.

Módulo 1,25		[24-26]	>110°	Maximizar
N° dientes engranaje pequeño	N° dientes engranaje grande	Distancia entre centros	Angulo barrido [°]	Relación de transmisión
12	27	24,375	80	2,25
12	28	25	77,14	2,33
12	29	25,625	74,48	2,42
13	26	24,375	90	2
13	27	25	86,67	2,08
13	28	25,625	83,57	2,15
14	25	24,375	100,8	1,79
14	26	25	96,92	1,88
14	27	25,625	93,33	1,93
15	24	24,375	112,5	1,6
15	25	25	108	1,67
15	26	25,625	103,85	1,73
16	23	24,375	125,22	1,44
16	24	25	120	1,5
16	25	25,625	115,2	1,56

La tabla 13 muestra la distancia entre centros, la relación de transmisión y el ángulo barrido por el engranaje conducido, para varias combinaciones de engranajes rectos. Los cálculos comenzaron utilizando un engranaje conductor de doce dientes, que es el menor número de dientes que se consigue para engranajes plásticos de módulo 1.25 en el catálogo consultado. Todas las alternativas consideradas cumplen la condición de la distancia entre centros, sin embargo solo las cuatro resaltadas en gris cumplen la segunda condición. De esas cuatro alternativas, la que utiliza los engranajes de 15 y 24 dientes es la que ofrece la mayor relación de transmisión y por lo tanto es la seleccionada.

4.3.5 Torque necesario para la dirección de cada rueda. El torque necesario para hacer girar cada una de las ruedas de las esquinas alrededor de su eje vertical de dirección depende principalmente del tipo de terreno (los terrenos considerados son: arena, grama, asfalto, tierra suelta y compacta y concreto) sobre el cual se encuentre la rueda y de la carga soportada por la misma. Es necesario conocer el valor máximo que puede alcanzar este parámetro para poder hacer una selección adecuada de los servos de dirección y así garantizar que el robot pueda desplazarse sin inconvenientes por todos los terrenos considerados. Un dispositivo con características mecánicas semejantes al sistema de dirección diseñado para el robot móvil, fue construido para determinar experimentalmente el torque requerido para la dirección de cada rueda en función del tipo de terreno y la carga soportada. Las características del dispositivo, condiciones de las pruebas, elementos utilizados y datos recopilados se muestran en el Anexo C.

Gracias a esa pequeña investigación se pudo encontrar el valor del torque necesario para dar movimiento de dirección a las ruedas:

$$T_d = 7.22 \text{ [kgf x cm]} \quad (\text{Ec. 02})$$

4.3.6 Selección de los servomotores de dirección. Un servomotor es un motor eléctrico que tiene la capacidad de ser controlado tanto en velocidad como en posición [68]. El servomotor puede clasificarse dentro de un grupo más grande de actuadores llamados servomecanismos que pueden ser rotativos o no rotativos (como el caso de los cilindros hidráulicos o neumáticos), los cuales poseen los elementos suficientes de control para poder monitorear los parámetros de su actuación mecánica tales como posición, velocidad, fuerza, torque, etc.

En robótica es muy común el uso de servomotores eléctricos de tipo analógico, los cuales tienen muy buen desempeño y son ampliamente ofrecidos en el mercado a precios muy razonables, por lo tanto son adecuados para esta aplicación. En el Anexo D, se presentan las características principales de estos dispositivos, los elementos que los conforman y la manera en la que deben ser controlados.

La selección debe basarse principalmente en el torque requerido que se calcula de la siguiente forma:

$$T_s = T_d \div R = 7.22 \text{ [Kgf} \cdot \text{cm]} \div 1.6 = 4.51 \text{ [Kgf} \cdot \text{cm]} \quad (\text{Ec. 03})$$

Donde:

T_d: Torque necesario para la dirección de cada rueda (Anexo C).

R: Relación de transmisión de los engranajes que unen el servo con el eje de dirección.

Otros parámetros de funcionamiento como la velocidad del servo, la eficiencia y la corriente consumida, son muy similares entre servos de diferentes marcas, por lo tanto, la selección se hará teniendo en cuenta solo el torque y el costo. Dos marcas reconocidas de servos, FUTABA y HITEC, fueron puestas en consideración, por la confiabilidad, calidad y buenos

precios de sus productos. En la tabla 14 se muestran los torques obtenidos cuando se utilizan 4.8 V o 6 V, así como el precio de cada uno de los servos considerados⁴³.

Tabla 14. Información requerida para la selección de los servos de dirección.

MARCA	Ref	Precio servo (US \$)	Torque [Kgf x cm]		Torque eje dirección engranajes (24/15)	
			4,8 V	6 V	4,8 V	6 V
FUTABA	S3004	10,99	3,2	4,1	5,12	6,56
FUTABA	S3305	24,99	5,2	6,5	8,32	10,4
FUTABA	S3010	34,99	7,1	8,9	11,36	14,24
HITEC	HS-322HD	9,99	3	3,7	4,8	5,9
HITEC	HS-475HB	16,99	4,4	5,5	7,04	8,8
HITEC	HS-645MG	35,99	7,7	9,6	12,32	15,36



Figura 45. (Izquierda) FUTABA S3004⁴⁴. (Derecha) HITEC HS-475HB servomotor seleccionado.

Teniendo en cuenta que el torque requerido en el eje de dirección es de 7.22 Kgf x cm, el servo **HITEC HS-475HB** es el más económico dentro de los que cumplen con este requerimiento, por lo tanto es el seleccionado. Dado que los servos serán controlados a 5 V el torque disponible será superior a 7.04

⁴³ www.towerhobbies.com

⁴⁴ www2.gpmd.com

Kgfxcm (valor mostrado en la **Tabla 14** para 4.8 V) y podrá alcanzar el valor requerido.

4.4 DIFERENCIAL Y CHASIS

Esta sección trata acerca del diseño del sistema que promedia la posición del cuerpo del robot y lo mantiene estable y sin oscilaciones. Existen dos opciones para lograr esto, una de las cuales es el sistema diferencial que fue seleccionado, la otra utiliza resortes a lado y lado del cuerpo del robot. Estas dos opciones son estudiadas en el Anexo E. En esta sección también se mostrarán las diferentes versiones de diseño del chasis.

4.4.1 Diseño del mecanismo diferencial. El mecanismo diferencial requerido para esta aplicación tiene un funcionamiento un poco diferente al de los diferenciales utilizados en los automóviles y por ende sus diseños tienen algunas diferencias también. En los diferenciales de los automóviles la potencia entra por la corona y sale por los semiejes que van acoplados a las ruedas. En este mecanismo diferencial tal corona no es requerida porque el movimiento entra por los semiejes que van unidos rígidamente a las barras principales de suspensión y sale por el soporte de los engranajes planetarios. Tal soporte debe ir rígidamente acoplado al chasis del cuerpo del robot y por consiguiente el movimiento de cualquiera de los semiejes principales implica el movimiento de dicho cuerpo. Por lo tanto, si una de las barras principales de suspensión encuentra un obstáculo mientras la otra permanece en terreno plano, el cuerpo del robot solo se elevará un ángulo igual a la mitad del ángulo de elevación de la barra que está superando el obstáculo.

Al enfrentar el diseño de este mecanismo el primer aspecto que debió definirse fue el tipo de engranaje a utilizar. Los engranajes cónicos son típicamente utilizados en los diferenciales, pues tienen la ventaja de transmitir movimiento entre ejes perpendiculares entre si, razón por la cual se puede

diseñar un diferencial compacto, pequeño y con un número reducido de piezas, tal como el mostrado en la figura 46. Sin embargo, estos engranajes son costosos debido a la complejidad en su construcción. Adicionalmente, la disponibilidad en stock a nivel nacional de engranajes de este tipo es muy pequeña, por no decir nula, aun menos teniendo en cuenta que deben ser de tamaño reducido.

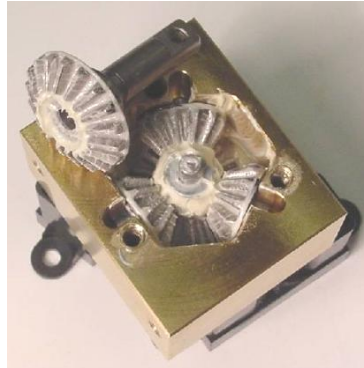


Figura 46. Diferencial basado en engranajes cónicos⁴⁵

Las figuras 47 y 48 muestran el diseño de un diferencial basado en engranajes rectos. Este mecanismo es algunas veces utilizado en vehículos a control remoto y carros de juguete. Su diseño es poco conocido, sin embargo, resulta ser una alternativa muy interesante y simple, que funciona igual que el diferencial basado en engranajes cónicos. Mecanizar un engranaje recto es una tarea muy simple que no requiere de mayores cálculos ni montajes complicados en la fresadora, caso contrario a lo que sucede con los engranajes cónicos. Un diferencial basado en engranajes cónicos requiere mínimo de dos engranajes planetarios o satélites pequeños y de dos engranajes centrales o soles de un mayor número de dientes que los anteriores. El diferencial basado en engranajes rectos debe utilizar dos engranajes centrales cortos acoplados a los ejes de salida y cuatro planetarios largos, todos con el mismo número de dientes y obviamente con el mismo módulo.

⁴⁵ www.cs.cmu.edu

El peso total del diferencial basado en engranajes rectos es ligeramente superior al peso del otro diferencial. La razón es que usa dos engranajes adicionales y los planetarios son más largos y sus ejes también. Sin embargo, un diseño adecuado podría reducir el peso de este mecanismo para evitar el incremento del peso total de la estructura y al mismo tiempo evitar que el centro de gravedad total se desplace hacia arriba, pues esto sería contraproducente para la estabilidad del móvil. Teniendo en cuenta solo el costo de fabricación de los engranajes, a pesar de requerir un mayor número de piezas (dos piezas adicionales), resulta más económico y más práctico construir el diferencial con engranajes rectos que con engranajes cónicos.

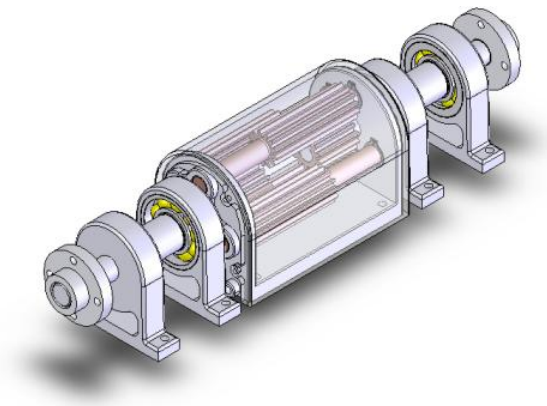


Figura 47. Diseño preliminar del diferencial basado en engranajes rectos.

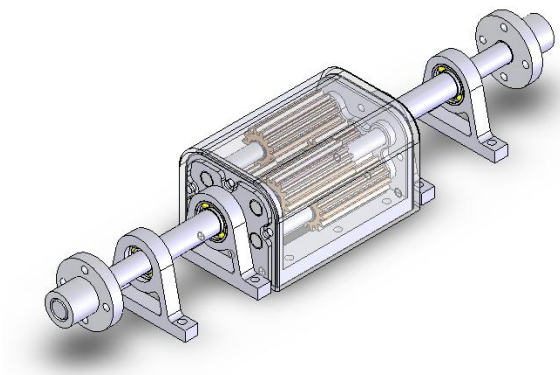


Figura 48. Diseño final del diferencial basado en engranajes rectos.

La figura 47 muestra la versión preliminar y la figura 48 la versión definitiva del diseño del mecanismo diferencial basado en engranajes rectos que presenta las siguientes características:

- Los engranajes planetarios y sus ejes son dos piezas independientes con ajuste giratorio entre si. Las chavetas retenedoras axiales se colocan a lado y lado de cada engranaje planetario. El ajuste entre los extremos de dichos ejes y los agujeros de los soportes debe ser forzado suave para facilitar el montaje y evitar que se giren o se deslicen. Estos engranajes tienen el doble de la longitud de los engranajes centrales.
- Todos los engranajes deben ser construidos en bronce al latón. El ajuste entre los engranajes centrales y los ejes principales debe ser forzado suave. Para evitar que el engranaje se gire o se deslice sobre el eje, se coloca un tornillo prisionero que actúa contra una superficie plana que se mecaniza en el eje.
- Con respecto a la versión preliminar, se cambió la posición de los agujeros en las piezas verticales que soportan los ejes de los engranajes planetarios. La nueva configuración (ver figura 49) reduce el tamaño de tales piezas, haciéndolas de una altura menor y por lo tanto más livianas.

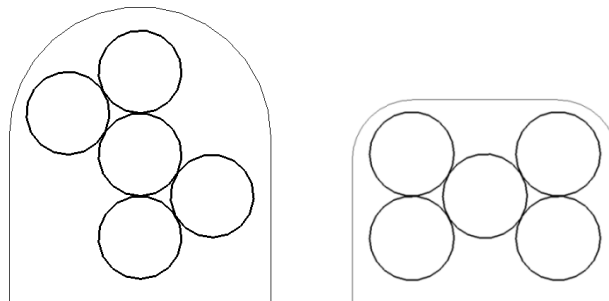


Figura 49. (Izquierda) posición engranajes diferencial versión preliminar. (Derecha) posición engranajes diferencial versión definitiva.

- Un buje de bronce que no es apreciable en la figura 48, se coloca en cada uno de los agujeros centrales de las piezas verticales que soportan los

ejes de los engranajes planetarios. Esto se hace con el objetivo de minimizar la fricción y el desgaste.

- Se removió material de la base del soporte del diferencial para eliminar la masa innecesaria de esta pieza y disminuir su peso.
- Los rodamientos rígidos de bolas utilizados en el subsistema de dirección son también adecuados para dar soporte a los ejes principales del diferencial, con la ventaja de que solo un tipo de rodamiento es requerido para toda la estructura favoreciendo el mantenimiento y recambio de piezas.
- Las chumaceras pueden ser mecanizadas a partir de la platina de un cuarto de pulgada de espesor igual que los soportes de dirección. Para minimizar su peso se eliminó el material innecesario igual que en las piezas de soporte del diferencial.
- El extremo externo de los ejes principales va rígidamente unido por medio de ajuste forzado suave (para facilitar el montaje) y tornillo prisionero (para garantizar la rigidez de la junta), con una pieza torneada que permite el acople entre cada eje y la barra principal de suspensión correspondiente. Una superficie plana debe mecanizarse en el extremo de dichos ejes para recibir el tornillo prisionero del acople.

4.4.2 Diseño de los engranajes del diferencial. Teniendo en cuenta que el peso de toda la estructura debe minimizarse, los engranajes del diferencial deben hacerse tan pequeños como sea posible. Por consiguiente, se debe determinar el mínimo número de dientes con el cual no se presenta el fenómeno de interferencia para el modulo seleccionado. También se debe calcular la relación de contacto que indica el número de dientes que siempre permanecen en contacto, con el fin de verificar si dicho valor se encuentra dentro del margen recomendado. Finalmente se puede realizar el cálculo de la longitud adecuada del engranaje para soportar las cargas estimadas. Los parámetros de entrada para este diseño son los siguientes:

A. Módulo: se tomó la decisión de utilizar módulo 1 por que en el taller en el que iban a ser mecanizados los engranajes (ITS “Dámaso Zapata”) se contaba con la fresa y porque se considera que es un tamaño adecuado para resistir las cargas estimadas.

B. Material: se determinó construir los engranajes en bronce al latón (nombre comercial), un material fácil de mecanizar y con buenas propiedades de resistencia al desgaste, de color amarillento similar al de algunos latones. Debido a que los comercializadores no tienen datos precisos a cerca de la composición y propiedades físicas y mecánicas del material que venden, se hizo una aproximación de la resistencia considerando los datos que aparecen en algunos libros de diseño de máquinas. El bronce de cañón (Cu-Sn) tiene una resistencia igual a 10000 psi, mientras que las varillas suaves de latón amarillo tienen una resistencia a la fluencia de 15950 Psi. Combinando estos dos datos y pensando conservativamente, se decidió trabajar con 11500 Psi como valor de resistencia a la fluencia para el cálculo de estos engranajes. En el Anexo F, se encuentran las tablas de las que fueron obtenidos dichos valores.

C. Cálculo del menor número de dientes para evitar la interferencia: este fenómeno se presenta en los engranajes con un reducido número de dientes y trae como consecuencia el desgaste de la raíz de los mismos, debido a la interferencia con la punta de los dientes del otro engranaje. La ecuación 4 [66], puede utilizarse para determinar si se presenta o no el fenómeno de interferencia.

$$r_{a \text{ calculado}} = \sqrt{r^2(\cos \emptyset)^2 + c^2(\sin \emptyset)^2} = \sqrt{r_b^2 + c^2(\sin \emptyset)^2} \quad (\text{Ec. 04})$$

$$r_{a \text{ real}} = r + a = \left[\frac{M \times Z}{2} + M \right] * \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} \quad (\text{Ec. 05})$$

Donde:

r_a = radio del círculo de adendo, plg

c = distancia entre centros del par de engranajes, plg

Φ = ángulo de presión, grados

r_b = radio del círculo base, plg

r = radio primitivo

a = adendo (igual al módulo)

“Se tendrá interferencia cuando el radio del círculo de adendo real, sea mayor al calculado por la ecuación antes mencionada. No se tendrá interferencia si el radio real del círculo de adendo es menor o igual al valor calculado” [66]. En la tabla 15 se muestran los resultados de la aplicación de la ecuación de interferencia para engranajes módulo 1 de 10 a 16 dientes.

D. Relación de contacto: el número de dientes en contacto se puede calcular por medio de la relación de contacto que esta dada por la siguiente ecuación:

$$Rel. de cont = \frac{\sqrt{(r_2+a_2)^2 - r_2^2(\cos\Phi)^2} - r_2 \sin \Phi}{P_b} + \frac{\sqrt{(r_1+a_1)^2 - r_1^2(\cos\Phi)^2} - r_1 \sin \Phi}{P_b} \quad (Ec. 06)$$

$$P_b = p \times \text{COS} (\Phi) \quad (Ec. 07)$$

Donde:

r_1, r_2 = radios primitivos de los engranajes, plg

a_1, a_2 = adendo de los engranajes, plg

p = paso circular, plg

De los resultados mostrados en la tabla 15 se pudo concluir que el mínimo número de dientes que debían tener los engranajes del diferencial para evitar el fenómeno de interferencia entre dientes es 13. Para engranajes con un número de dientes mayor no se presenta este problema. No obstante, se

encontró que era más conveniente hacer dichos engranajes de 14 dientes, para poder mecanizarlos por división directa, utilizando el plato de 56 ranuras que va fijo a la carcasa del aparato divisor de la fresadora y es concéntrico con su eje de salida. Al mecanizar los engranajes de esta forma, se reduce el riesgo de cometer errores, muy comunes cuando se utilizan los platos con círculos de agujeros. Además, el tiempo de mecanizado disminuye y por lo tanto el costo de cada engranaje también.

Tabla 15. Verificación de interferencia y relación de contacto para engranajes iguales módulo 1 de 10 a 16 dientes.

Modulo = 1; Angulo de presión = 20°				$r_{a \text{ calc}} < r_{a \text{ real}}$	1,2 < Rel cont < 1,6	
N° dientes	$r_{a \text{ real}}$ [mm]	$r_{a \text{ real}}$ [in]	$r_{a \text{ calculado}}$ [in]	Interferencia	Relación de contacto	
10	6	0,2362	0,2288	Si	1,37	ok
11	6,5	0,2559	0,2517	Si	1,40	ok
12	7	0,2756	0,2746	Si	1,42	ok
13	7,5	0,2953	0,2974	No	1,44	ok
14	8	0,3150	0,3203	No	1,46	ok
15	8,5	0,3346	0,3432	No	1,48	ok
16	9	0,3543	0,3661	No	1,50	ok

E. Resistencia como viga de los dientes del engranaje recto: debido a que el funcionamiento de los engranajes del diferencial es cuasi estático y no continuo, la verificación de la resistencia de los dientes actuando como viga es adecuada y suficiente. La ecuación básica de diseño de engranajes utilizando el método de la AGMA (*American Gears Manufacturing Association*), es la siguiente:

$$F_t = \sigma b \frac{Y}{p} \quad (\text{Ec. 08})$$

Donde:

Y = factor de forma de Lewis que depende del tamaño y forma del diente del engranaje y cuyos valores están tabulados.

P = paso diametral del engranaje, plg

Le = longitud del diente del engranaje, plg

$\sigma = 11500$ psi. (Resistencia a la fluencia del material seleccionado)

Mas detalles acerca de la obtención de esta ecuación en el libro de diseño de máquinas de Deutschman, capítulo 10 página 571. Para engranajes de 14 dientes, bajo carga en la parte superior del diente y ángulo de presión igual a 20° , el factor de forma de Lewis obtenido de la tabla 7 mostrada en el Anexo F es:

$$Y = 0.276$$

El paso diametral “P” se relaciona con el módulo de la siguiente forma:

$$P = \frac{25.4}{m} \left[\frac{1}{in} \right] \therefore P = \frac{25.4}{1} = 25.4 \left[\frac{1}{in} \right] \quad (\text{Ec. 09})$$

F. Determinación de las cargas sobre los dientes de los engranajes del diferencial: tanto los engranajes planetarios como los centrales soportan cargas en por lo menos dos dientes simultáneamente. Todos soportan las mismas cargas tangenciales debido a que tienen el mismo diámetro, sin embargo, los centrales son mas críticos debido a que su longitud es menor que la longitud de los planetarios. Por lo tanto, se deben determinar las cargas soportadas por dichos engranajes con base en la estimación de las fuerzas que actúan sobre el chasis, para poder verificar su resistencia, quedando verificada la resistencia de los engranajes planetarios también. La figura 50 es un diagrama de las fuerzas estimadas que actuarán sobre el chasis y su posición con respecto al eje principal del diferencial.

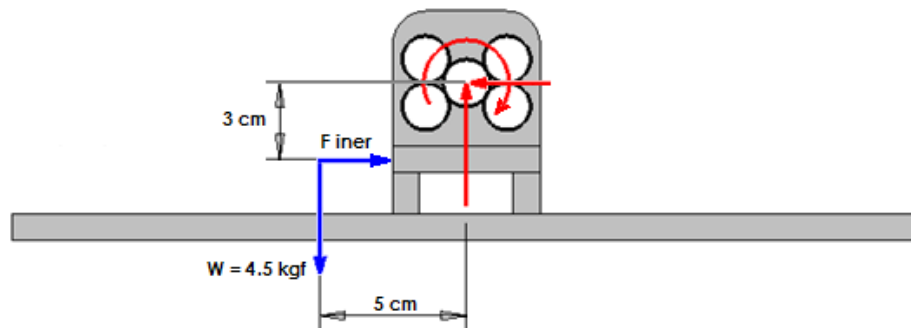


Figura 50. Cargas soportadas por el sistema diferencial.

Se sabe que lo ideal es mantener el centro de gravedad del cuerpo del robot sobre la línea vertical que pasa por el centro del diferencial, tal como se dijo anteriormente. Sin embargo, puede darse el caso de que se requiera colocar sobre el chasis algún instrumento o dispositivo para la realización de alguna práctica o investigación y que la carga no pueda ser centrada o distribuida adecuadamente. Considerando el peso de la estructura que hasta ahora ha sido diseñada (dado por *SolidWorks*), se estima que para mantener el peso total del robot (incluyendo la carga útil) por debajo de 10 Kgf, que fue el límite establecido en el capítulo dos, la carga útil podría alcanzar un valor máximo de 3.5 Kgf. Además, se considera que el centro de gravedad de dicha carga puede tener una excentricidad de cinco centímetros hacia atrás y tres centímetros hacia abajo (**Figura 50**).

Los siguientes dispositivos pueden ser considerados como carga útil:

- Tarjetas controladoras y de potencia adicionales a las que controlan los motores y servos del sistema de locomoción.
- Sensores de diferentes tipos, temperatura, humedad, calor, escáner láser, etc.
- Un portátil pequeño o una minicomputadora de alto rendimiento.
- Un brazo manipulador

- Baterías adicionales para dar energía a componentes especiales que no hagan parte del sistema de locomoción del robot.
- Paneles solares o una carcasa.

La situación más crítica que puede presentarse es un choque repentino del robot contra una pared a una velocidad de 1 m/s. Debido a la excentricidad de la carga útil, la fuerza impulsiva del choque incrementa el torque que debe soportar el diferencial. Para considerar el efecto de la masa del chasis, cuyo centro de gravedad también es excéntrico con respecto al eje del diferencial (esta justamente bajo dicho eje), y de la masa de las tarjetas electrónicas, sensores y elementos de apoyo a la navegación, se eleva el valor de la carga útil supuesta a 4.5 Kgf. Suponiendo que la fuerza impulsiva actúa durante 0.05 s, se tiene:

$$T_{central} = \frac{m_{util} \cdot v}{\Delta t} \times (3cm) + m_{util} \cdot g \cdot (5cm) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$T_{central} = \frac{4.5Kg \cdot 1 \frac{m}{s}}{0.05 s} \cdot 0.03m + 4.5Kg \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.05m = 4.9 N \cdot m$$

Se asume un factor de seguridad igual a 2 para este mecanismo por lo tanto el torque de diseño es igual a:

$$T_{diseño} = T_{central} \cdot 2 = 4.9 [N \cdot m] * 2 = 9.81 [N \cdot m] \quad (\text{Ec. 11})$$

Cada semieje del diferencial debe resistir la mitad de la carga, por lo tanto el torque que soporta cada uno de los engranajes centrales o soles es 4.9 N x m. Ese torque es producido en el engranaje central por las dos fuerzas tangenciales que le imprimen los dos engranajes planetarios que siempre están en contacto con él. Por lo tanto, cada una de las fuerzas tangenciales que actúan sobre los dientes del engranaje sol, es igual a:

$$F_{t \text{ req}} = \frac{T}{2 \cdot r} = \frac{4,9 \text{ N}\cdot\text{m}}{2 \cdot 0,007 \text{ m}} = 350 \text{ N} \quad (\text{Ec. 12})$$

Esta es la fuerza tangencial que debe ser soportada por los dientes de los engranajes. Conocido este valor, se puede determinar la longitud requerida para los engranajes soles mediante la aplicación de la ecuación 8. La tabla 16 muestra la fuerza que resiste el engranaje en función de su longitud, para longitudes entre 11 y 20 mm, calculadas así:

$$F_{t \text{ soport}} = \frac{(16 \text{ mm}) * (11500 \text{ Lbf}/\text{in}^2) * 0,276}{25,4 \text{ in}^{-1}} * \frac{1 \text{ in}}{25,4 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ Kgf}}{2,20462 \text{ Lbf}} * \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ Kgf}}$$

$$= 357,05 \text{ N}$$

Según lo mostrado en la tabla 16 los engranajes soles deben hacerse de 16 mm de longitud para poder garantizar su resistencia y durabilidad. Por consiguiente, los engranajes planetarios deben hacerse de 33 mm, pues deben tener el doble de la longitud de los soles mas 1 mm que se debe dejar de separación para que los planetarios de un lado no interfieran con el sol del lado contrario.

Tabla 16. Fuerza tangencial soportada por los engranajes soles en función de su longitud.

Longitud b [mm]	Ft resistente [N] > 350 [N]	Longitud b [mm]	Ft resistente [N] > 350 [N]
11	245,470005	16	357,0472799
12	267,78546	17	379,3627349
13	290,100915	18	401,6781899
14	312,4163699	19	423,9936449
15	334,7318249	20	446,3090999

De otra parte, se consideró innecesario realizar análisis estático o estudios estructurales adicionales para determinar las fuerzas soportadas por los ejes

principales y su resistencia, debido a que las cargas son muy pequeñas y tanto los ejes como los rodamientos en los que están soportados se diseñaron y seleccionaron para garantizar su correcto funcionamiento y durabilidad.

4.4.3 Diseño del chasis. El chasis es la estructura que soporta todos los elementos que deben ser ubicados sobre el cuerpo central del robot. En el caso de chasis para robots móviles cuyo cuerpo central se sostiene de un único eje, como en este caso, se requiere buena resistencia pero la flexibilidad no es tan necesaria debido a que no hay varios puntos de apoyo, por lo tanto el chasis puede ser rígido. Por tal motivo, se pensó en diseñar un chasis a partir de perfiles de aluminio soldados entre sí, para que tenga muy buena rigidez, a pesar de que uno de los requerimientos establece que deben evitarse las uniones soldadas. A continuación se mencionan los elementos que deben ser ubicados en el cuerpo central del robot y que fueron tenidos en cuenta en el diseño del chasis:

- Baterías, dimensiones: $180 \times 48 \times 25 \text{ mm}^3$, debe ubicarse en la parte central del chasis tan bajo como sea posible.
- Tarjeta de control, dimensiones: $140 \times 110 \text{ mm}^2$, puede ser ubicada en la parte frontal o trasera del chasis.
- Tarjeta de potencia, dimensiones: $120 \times 80 \text{ mm}^2$, ubicada bajo la tarjeta controladora.
- Brújula electrónica, dimensiones: $32 \times 32 \text{ mm}^2$, debe ubicarse en cualquier punto a lo largo de la línea longitudinal central del robot.
- GPS, dimensiones: $30 \times 30 \text{ mm}^2$, puede ubicarse en cualquier punto sobre el chasis.
- Xbee (comunicación inalámbrica), dimensiones: $40 \times 40 \text{ mm}^2$, puede ubicarse en cualquier punto.

Todos estos elementos y la carga útil que sea transportada deben ser ubicados adecuadamente para que el centro de gravedad del cuerpo del robot se mantenga lo más cerca posible del centro geométrico del mismo.

Versiones de diseño del chasis: se desarrollaron tres versiones que comparten las siguientes características:

- Están formados completamente por tubos cuadrados de aluminio estructural de media pulgada de lado.
- Los tubos de aluminio deben soldarse entre si para garantizar la rigidez de todo el conjunto. Se encontró que la opción más asequible en términos prácticos y económicos era utilizar soldadura oxiacetilénica.
- Algunos agujeros roscados son necesarios para el acople de los elementos que soporta el chasis.

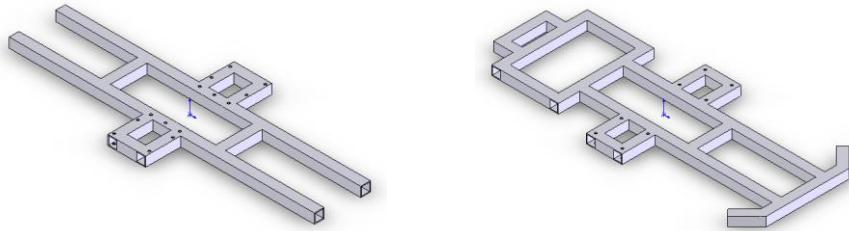


Figura 51. Diseño del chasis, versiones preliminares.

Las dos primeras versiones (**Figura 51**) solo se diferencian en su forma, siendo la versión uno más simple y por lo tanto más viable. La versión tres (**Figura 52**) se basó en la forma simple de la versión uno, pero se modificó para que solo el diferencial quedara en un nivel superior y los demás elementos en el nivel inferior y de esa forma tratar de mantener el centro de gravedad del cuerpo lo más bajo posible. Además, se agregaron unas platinas en la parte inferior central del chasis para soportar las baterías. Este diseño junto con el diseño de las barras principales de suspensión fue concebido de tal forma que debajo del cuerpo central del robot hubiera un

espacio de quince centímetros para permitir el paso de objetos de tamaño reducido, tal como fue establecido en los requerimientos.

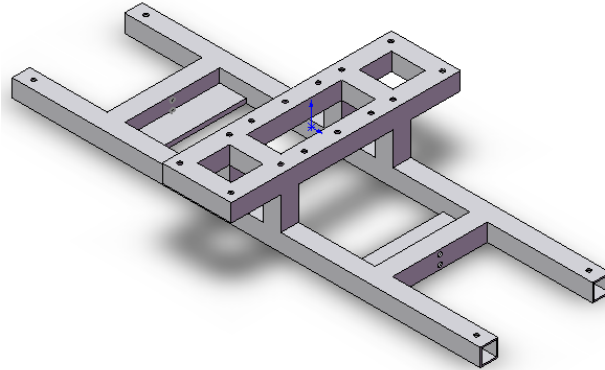


Figura 52. Diseño definitivo del chasis.

4.5 SUBSISTEMA DE TRACCIÓN.

El sistema de tracción esta conformado por todos los elementos que permiten el desplazamiento o locomoción del móvil a través de los terrenos explorados. En este caso, el subsistema de tracción está conformado por las seis ruedas que ya han sido mostradas y seleccionadas y por los seis motores de tracción acoplados directamente a cada una de ellas. Esta sección contiene la determinación las cargas soportadas por cada rueda así como los cálculos de la potencia y el torque requerido para el desplazamiento del móvil. Además, se hace la selección del motor-reductor mas adecuado según los requerimientos particulares de esta aplicación.

4.5.1 Análisis estático del sistema de locomoción. Para calcular la resistencia al desplazamiento del móvil y la resistencia al giro de las ruedas alrededor del eje de dirección, es necesario conocer la carga soportada por cada una de ellas. De antemano se sabe que la mayor parte del peso debe ser soportado por las ruedas de las esquinas y que la carga debe distribuirse de manera uniforme sobre las mismas. Esto se logra manteniendo el centro

de gravedad de toda la estructura tan cerca de su centro longitudinal y transversal como sea posible. La presencia del resorte, tal como se concluyó en el Anexo B, ayuda a disminuir la carga soportada por cada una de dichas ruedas e incrementa la carga soportada por las ruedas centrales, mejorando su tracción, la capacidad de superación de obstáculos de todo el sistema y disminuyendo la energía consumida por el subsistema de tracción.

Cuando se completó el diseño, se encontró que era más fácil y práctico utilizar un resorte de torsión con centro en el pivote de la barra secundaria y no el resorte de compresión que se había pensado inicialmente. Por practicidad el resorte debe actuar sobre la parte horizontal de la barra secundaria y en una posición tan cercana a la rueda central como sea posible. Por consiguiente, se decidió dejarlo a 115 mm del centro del robot. Sobre la barra primaria se debe crear una superficie horizontal para recibir el resorte y para que la fuerza de contacto sea vertical, tal como se va a suponer.

Tabla 17. Masas asignadas conocidas y estimadas de algunos componentes del sistema.

Componente	Masa unitaria	Cantidad	Masa total
Servos (Estimado por promedio)	50 g	4 (Dirección)	200 g
Rodamientos radiales bolas	3.6 g	8(Direc.)+4(Difer.)	43.2 g
Rodamientos axiales bolas	20 g	4 (Dirección)	80 g
Llantas con insertos	150 g	6	900 g
Motores (Estimado por promedio)	200 g	6	1200 g

Con los cálculos realizados en *SolidWorks*, se pudo conocer la masa aproximada de la estructura y la posición de su centro de gravedad. Dicho cálculo se hace con base en los volúmenes de las piezas y en la densidad de los materiales seleccionados para las mismas. También se tienen en cuenta los valores de masa asignados a piezas como motores, servomotores, llantas y rodamientos, previamente conocidos o estimados y ubicados en los centros

geométricos de las mismas. La tabla 17 muestra los valores de dichas masas que fueron asignadas.

La figura 53 es un diagrama de cuerpo libre de la estructura ignorando los subconjuntos de las ruedas centrales. Según datos obtenidos de *SolidWorks*, esta sección tiene una masa de 3883,92 g con centro en $X = - 0,2$ mm (despreciable), $Y = - 97,75$ mm, medidos con respecto al eje del diferencial. La masa se redondea a 4000 g previendo algún aumento en las masas de las barras principales de suspensión que serán analizadas estructuralmente o un incremento en la masa de los motores que sean seleccionados. Según el diagrama de la figura 53 se tiene:

$$\sum \text{Fuerzas en } y = 0 \quad \therefore (W1 + W_{\text{útil}}) + Dy = Ay + By + Fre \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\sum M_A = 0 \quad \therefore (W1 + W_{\text{útil}}) \cdot 23 + Dy \cdot 44,5 = Fre \cdot 34,5 + By \cdot 46 \quad (\text{Ec. 14})$$

La figura 54 muestra un diagrama de cuerpo libre de los subconjuntos de las ruedas centrales. Los dos subconjuntos suman 1179,2 g (redondeado a 1200 g) de masa, con centro en $X=9.1\text{mm}$ y $Y=5.18\text{mm}$ medidos con respecto al eje de dichas ruedas.

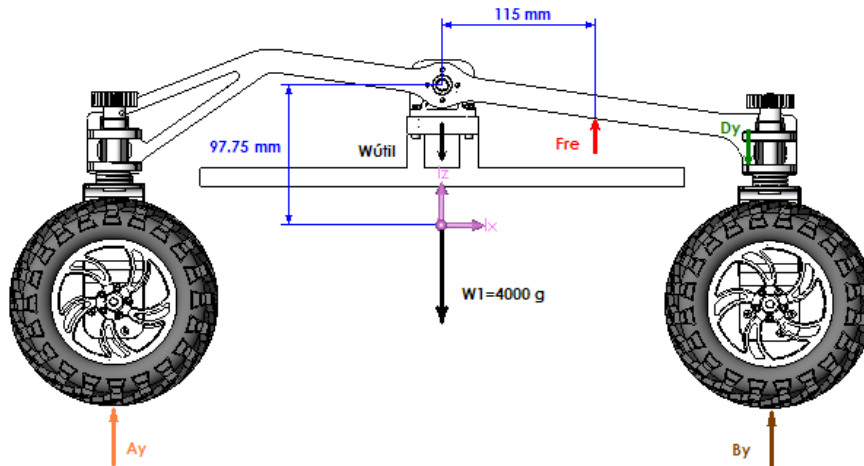


Figura 53. Diagrama de fuerzas parte 1.

Para el subconjunto de la rueda central mostrado en la figura 54:

$$\sum \text{Fuerzas en } y = 0 \quad \therefore E_y + D_y = F_{re} + W_2$$

(Ec. 15)

$$\sum M_E = 0 \quad \therefore W_2 \cdot 0.91 + F_r \cdot 11,5 = D_y \cdot 21,5$$

(Ec. 16)

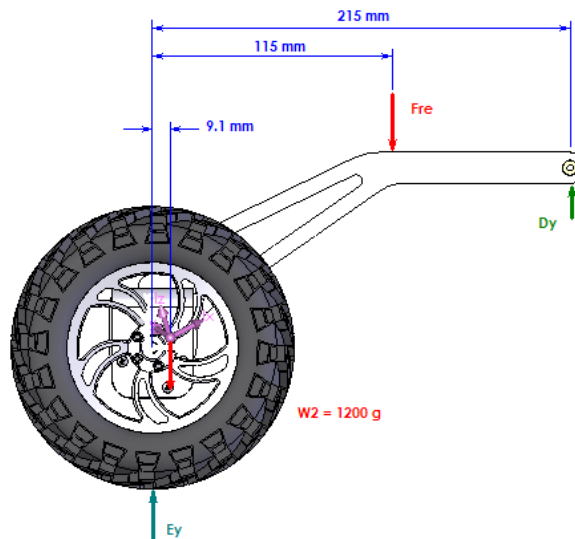


Figura 54. Diagrama de fuerzas parte 2.

El peso de los elementos electrónicos y baterías se estima en 1 Kgf actuando en el mismo punto de la carga útil. Para efectos de estos cálculos se considerará que la carga útil esta distribuida adecuadamente de tal forma que actué como se muestra en la figura 53. Dicha fuerza se establece en 3.8 Kgf para que el peso total del robot no supere 10 Kgf (4000 g+1200 g+1000 g+3800g), limite establecido. Reemplazando estos valores en las ecuaciones anteriores y considerando tres valores diferentes para la fuerza del resorte, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados del análisis estático del sistema de locomoción.

F resorte [Kgf]	Ay [Kgf]	By [Kgf]	Ey [Kgf]
1	4.1691	4.21658	1.61433
2	3.93654	3.98402	2.07944
3	3.70398	3.75146	2.54456

Se eligen los resortes que ofrecen 2 Kgf de fuerza por medio de los cual se logra que la carga soportada por las ruedas centrales sea aproximadamente la mitad de la que soportan las traseras o las delanteras. La fuerza del resorte no debe ser tan grande pues dificultaría la superación del obstáculo con la rueda central. Por lo tanto se puede concluir:

Fuerza de cada resorte: 1 Kgf

Carga soportada por cada una de las ruedas de las esquinas: 2 Kgf

Carga soportada por cada una de las ruedas centrales: 1Kgf

4.5.2 Estimación de la potencia requerida para el desplazamiento. Para la estimación de la potencia requerida se aplicará una parte de la teoría de Bekker⁴⁶ que establece una serie de ecuaciones relacionadas con el desplazamiento de vehículos a través de terrenos arenosos. En los cálculos que se realizan a continuación se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Carga soportada por cada una de las cuatro ruedas de las esquinas: 2 Kgf*
- *Carga soportada por cada una de las ruedas centrales: 1 Kgf*
- *Tiempo utilizado en alcanzar la velocidad máxima partiendo del reposo: 2s*
- *Inclinación máxima del terreno explorado: 15°*
- *Tipo de suelo considerado para el cálculo: Arena seca.*

⁴⁶ PATEL, N, SCOTT, G, ELLERY, A. *Application of Bekker Theory for Planetary Exploration through Wheeled, Tracked and Legged Vehicle Locomotion*. Surrey Space Centre, University of Surrey, Guildford, UK

- *Deslizamiento de las ruedas*: no se considera.
- *Dimensiones de las ruedas*: $D_w = 14$ cm, $B_w = 8.4$ cm (Diámetro y ancho respectivamente)

Se consideró la arena seca debido a que dentro de los terrenos contemplados en los objetivos como suelos por los cuales debe desplazarse el robot, la arena seca es el que mayor resistencia al desplazamiento opone. Por consiguiente, si el móvil es capaz de desplazarse sobre suelos de esta naturaleza, con mayor facilidad y menos consumo de potencia se desplazará sobre los otros terrenos considerados en los requerimientos. Además, existe información suficiente para realizar los cálculos de la potencia consumida para la tracción por medio de ruedas sobre terrenos de este tipo.

A. Cálculo de la aceleración del móvil: se puede esperar que el móvil tenga el siguiente comportamiento:

- Desplazamiento a baja velocidad en terrenos como arena y grama que le oponen gran resistencia. Máxima velocidad esperada: 0.5 m/s
- Desplazamiento a alta velocidad en terrenos que le oponen menor resistencia como el concreto, asfalto o la tierra compacta. Máxima velocidad esperada: 1 m/s

De esta forma la potencia requerida para el desplazamiento no es tan elevada.

Como los cálculos de resistencia al movimiento serán realizados considerando el desplazamiento del móvil a través de arena, el valor de la aceleración que se tendrá en cuenta en dichos cálculos es:

$$A = \frac{V_f}{t} = \frac{0.5m/s}{2s} = 0.25m/s^2 \quad (\text{Ec. 17})$$

B. Cálculo de la máxima resistencia al movimiento⁴⁶: la resistencia al movimiento tiene varios componentes que se mencionan a continuación:

- *Soil compaction resistance* (R_c): resistencia debida a la compactación de la porción de tierra ubicada delante de las ruedas debido a la presión que las ruedas aplican sobre el terreno.
- *Soil bulldozing resistance* (R_b): resistencia por el hundimiento de las ruedas; su valor es significativo cuando las ruedas tienen un ancho considerable y el hundimiento de estas en la arena es mayor de 0.06 veces su diámetro.
- *Rolling resistance* (R_r): resistencia al rodamiento, debida a la fricción entre la rueda y el suelo en el punto de contacto, la deflexión de la llanta, el deslizamiento, etc.
- *Resistencia gravitacional* (R_g): debida a la componente del peso paralela a la pendiente del terreno.
- *Acceleration resistance* (R_a): resistencia inercial, que surge solo en el periodo transitorio entre el reposo y la velocidad máxima. Ésta es despreciable para un movimiento lento del robot.

La resistencia total es la suma de todos los anteriores componentes.

$$R_{all} = R_c + R_b + R_r + R_g + R_a \quad (\text{Ec. 18})$$

Para el cálculo de las resistencias antes mencionadas es necesario conocer algunas propiedades del tipo de suelo en consideración, las cuales pueden encontrarse en el Anexo F. Resaltado aparece la arena seca material considerado para el cálculo de la potencia del robot móvil. A continuación se muestran las ecuaciones empleadas para calcular cada una de dichas resistencias y en la tabla 19 se presentan los resultados de los cálculos.

Soil compaction resistance (Rc): ésta resistencia puede calcularse para ruedas de alta deflexión, como las que serán utilizadas para este prototipo, por medio de la siguiente ecuación en la que intervienen el peso del móvil, algunas propiedades del suelo y el ángulo de inclinación máxima del terreno por el cual se desplazará el robot:

$$R_{cew} = \frac{\left(\frac{W_w \cos(\theta)}{l_w} \right)^{\frac{(n+1)}{n}}}{\left((n+1)(k_c + B_w k_\phi)^{\frac{1}{n}} \right)} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

θ : ángulo de inclinación del terreno = 15°

W_w : peso soportado por cada rueda = 2 Kgf x 4 ruedas + 1 Kgf x 2 ruedas

l_w : longitud del área cargada de la rueda (figura 55) 45@2kgf y 30@1kgf

n : coeficiente de deformación del suelo considerado =1.1(**Tabla 10** Anexo F)

K_c : módulo de cohesión del suelo considerado=990 (**Tabla 10** Anexo F)

K_ϕ : módulo de fricción del suelo considerado=1528000 (**Tabla 10** Anexo F)

B_w : ancho de la rueda = 0,084 m

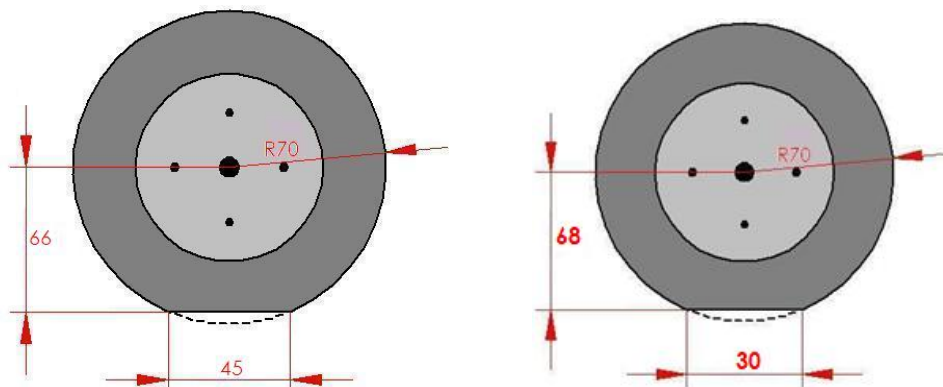


Figura 55. Geometría de la deflexión de la rueda. Dimensiones en mm

Bulldozing resistance (Rb): para este cálculo se tendrá en cuenta la siguiente ecuación:

$$Rb = 0.5\alpha B_w Z_{ew}^2 \left(\tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \right)^2 + 2CoB_w Z_{ew} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (Ec. 20)$$

Donde:

φ : soil internal angle of friction = 28° (Tabla 7)

Co : cohesive strenght of soil =1040Pa. (Tabla 7)

$$\alpha : Approach angle = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot Z_{ew}}{D_w} \right) \quad (Ec. 21)$$

D_w : diámetro de la rueda

Z_{ew} : hundimiento de las ruedas en el suelo.

El hundimiento de las ruedas en el suelo, (sinkage en ingles) se puede calcular por medio de la siguiente relación de Bernstein-Goriatchkin [62]:

$$Z_{ew} = \left(\frac{\frac{W_w}{l_w \cdot B_w}}{\left(\frac{Kc}{B_w} + K\varphi \right)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (Ec. 22)$$

Resistencia debida a la componente del peso paralela a la pendiente del terreno: teniendo en cuenta que el robot sube a través de un terreno con 15° de inclinación se tiene:

$$Rg = W \sin(\theta) = (W_{4w} + W_{2w}) \cdot \sin(\theta) \quad (Ec. 23)$$

Acceleration resistance: considerando la aceleración calculada en la sección (4.5.2.A) se tiene:

$$Ra = m \cdot A = (m_{4w} + m_{2w}) \cdot A \quad (Ec. 24)$$

C. Empuje del suelo (*Soil Thrust*): es la fuerza de tracción disponible para el desplazamiento del móvil a través del suelo explorado. Esta fuerza debe ser mayor a la resistencia total que opone el terreno, para que pueda existir desplazamiento del robot. Depende principalmente del peso del móvil, del área de contacto de sus ruedas con el suelo y de las propiedades de este último. La ecuación que se muestra a continuación no tiene en cuenta los elementos superficiales que puede tener la rueda para mejorar su tracción, por lo tanto, si el resultado de esta fuerza es mayor que la suma de todas las resistencias, el comportamiento real de las ruedas utilizadas será muy superior debido al labrado profundo que mejora considerablemente su tracción sobre suelos arenosos. Los resultados del cálculo de este parámetro son mostrados también en la tabla 19.

$$H_o = N_w(B_w l_w C_0 + W_w \tan \phi) \quad (\text{Ec. 25})$$

N_w : número de ruedas

D. Drawbar Pull: es una medida del desempeño del sistema de tracción. Es igual a la diferencia entre la fuerza de tracción disponible o empuje del suelo y la resistencia total al movimiento. Obviamente debe ser positivo, de lo contrario debe modificarse la geometría de los elementos impulsores, en este caso las ruedas, para mejorar el desempeño en los suelos considerados. En el caso del robot que estamos desarrollando, las ruedas se seleccionaron, sin embargo, en los robots de exploración que deben navegar a través de terrenos arenosos para desarrollar misiones específicas, el diseño de las ruedas es uno de los aspectos principales que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño del sistema de locomoción. Hay que tratar de mantener este parámetro tan alto como sea posible minimizando el peso del robot y se debe evaluar en todos los tipos de arena que pueda encontrarse el aparato durante su travesía, para garantizar la navegación exitosa a través de todas

ellas. Los resultados de los cálculos de este parámetro son mostrados también en la tabla 19.

$$DP = H_0 - R_{all} \therefore Dp > 0 \quad (\text{Ec. 26})$$

Tabla 19. Resultados cálculos resistencias al movimiento del móvil.

Resistencia	Ruedas esquinas (4)	Ruedas centrales (2)
<i>Ww</i> (Peso por rueda) [N]	19.6	9.8
<i>Lw</i> (Longitud área cargada) [m]	0.045	0.030
<i>Rd</i> (Radio después de la deform.) [m]	0.066	0.068
<i>Zw</i> (Hundimiento cada rueda) [m]	0.0056	0.0043
α [°]	23.19	20.32
<hr/>		
<i>Soil compaction resistance</i> (<i>Rc</i>) [N]	4.3962	1.2692
<i>Soil bulldozing resistance</i> (<i>Rb</i>) [N]	6.5785	2.5323
<i>Rolling resistance</i> (<i>Rr</i>) [N]	7.5806	1.8951
<i>Resistencia gravitacional</i> (<i>Rg</i>) [N]	20.3121	5.0780
<i>Acceleration resistance</i> (<i>Ra</i>) [N]	2	0.5
Total [N]	40.87	11.27
Soil Thrust (<i>Ho</i>) [N]	57.41	15.66
Draw bar pull [N] > 0	16.54 ¡ok!	4.39 ¡ok!
Resistencia total móvil [N]	52.1421	

E. Cálculo del máximo torque requerido en cada rueda: los motores se deben seleccionar con base en el torque requerido para cada una de las ruedas de las esquinas que son las que deben vencer la mayor resistencia debido a que soportan mas peso. Los motores de las ruedas centrales deben ser iguales a los demás, sin embargo, estos solo tendrán trabajo considerable (similar al trabajo que normalmente tienen los motores de las ruedas de las esquinas) cuando el robot intente superar un obstáculo.

$$T_w = \frac{R_{4w}}{N_w} \left(\frac{D_w}{2} - \delta \right) = \frac{40.87N}{4} (0.066) = 0.67 N \cdot m \cong 6.88 \text{ Kgf} \cdot \text{cm} \quad (\text{Ec. 27})$$

N_w : número de ruedas

δ : deformación de la rueda

F. Cálculo de la potencia máxima requerida para el desplazamiento del móvil: conociendo las fuerzas de resistencia al movimiento que debe vencer el sistema de tracción del robot y la velocidad de navegación del mismo, se puede calcular la potencia total requerida para su desplazamiento.

$$P_o = R_{total} \cdot V = 52.14N \cdot 0.5m/s = 26.07 [\text{watt}] \quad (\text{Ec. 28})$$

4.5.3 Selección de los motores de tracción. La selección de los motores de tracción del robot móvil debe hacerse siguiendo unos criterios que se mencionan a continuación en orden de importancia. Información básica acerca de este tipo de motores se agregó al Anexo D.

A. Torque máximo requerido: calculado en la sección anterior mediante la ecuación 27.

$$T_{rueda} = 6.88 [\text{Kgf} \times \text{cm}]$$

B. Velocidad máxima requerida en el eje de salida: como se ha mencionado antes, la velocidad máxima que debe tener el robot es 1m/s. Para lograr tal velocidad, la velocidad angular de los motores debe ser igual o superior a la calculada a continuación:

$$\omega_{motores} = \frac{V_{\max}}{D_w/2} = \frac{1m/s}{0.070m} = 14.28 \text{ rad/s} = 136.4 \text{ rpm} \quad (\text{Ec. 29})$$

C. Encoder: un requerimiento adicional es que los motores de tracción tengan encoder o la posibilidad de adaptarle uno fácilmente. Todos los seis motores deben ser iguales, sin embargo, no es necesario que todos tengan encoder, se requiere que al menos uno en cada lado del robot lo tenga. La razón de esto es que los tres motores de cada lado del robot serán controlados con la misma señal, por lo tanto si se puede controlar la velocidad de uno, es suficiente para controlar la velocidad de todos. El encoder brinda la señal de feedback necesaria para establecer un control en lazo cerrado para mantener constante la velocidad del motor a pesar de las fluctuaciones en su carga. Además, es útil en la medición de parámetros como la velocidad o distancia recorrida por el móvil y otros.

D. Corriente y voltaje: es importante tener en cuenta la corriente y el voltaje del motor durante su selección. La mayoría de curvas de desempeño de motores DC están en función del torque, por consiguiente es fácil conocer la corriente consumida para el torque con el que se están seleccionando los motores. También se debe tener en cuenta la corriente cuando el eje queda bloqueado (stall torque o locked torque) y la corriente sin carga. Es mejor un motor que maneje un nivel de corriente menor, pues los cables a utilizar pueden ser más delgados, los puentes H sufrirán un menor aumento de temperatura y las baterías funcionaran por más tiempo. De otra parte el voltaje nominal de los motores debe estar entre 6 y 12 voltios que es el voltaje que generalmente manejan las baterías pequeñas.

E. Eficiencia: se debe tratar de seleccionar el motor con mayor eficiencia en el punto de funcionamiento.

F. Dimensiones: las dimensiones relevantes para la selección de los motores son:

➤ Diámetro del eje de salida: entre 4 y 6 mm.

- Longitud total del motor con caja reductora y encoder: menor de 80 mm.
- Radio externo máximo más excentricidad del eje: menor de 40 mm.

G. Peso: otro aspecto importante que debe aplicarse en caso de tener dos motores muy similares en prestaciones y precio es su peso. Se deben seleccionar los motores más livianos, para mantener bajo el consumo de potencia y de esa forma obtener un funcionamiento por más tiempo.

H. Costo: los motores están entre los elementos más costosos que deben ser adquiridos para el robot. Los seis motores pueden sumar fácilmente 1000 USD (Dólares americanos) si se elige utilizar motores de precisión y alta calidad, sin embargo, también pueden adquirirse por unos 250 USD, motores buenos pero de menor calidad y precisión.

I. Motores considerados: las especificaciones técnicas de los motores considerados para la selección se muestran en el Anexo F, así como una lista de empresas que los ofrecen. La tabla 20 resume las características principales consideradas en la selección de los motores.

Cualquiera de los motores considerados puede dar el torque requerido para el desplazamiento del móvil. El GHM-04 presenta una disminución significativa en las RPM y un consumo de corriente alto a dicho torque, sin embargo, permite el uso de encoder óptico y es el más económico. El GHM-13 tiene el inconveniente de no permitir el uso de un encoder y es el más pesado de los cuatro. Los motores RA-37GM y RB-37GM son los más costosos y tampoco permiten el uso de un encoder. Se decidió adquirir el **GHM-04** debido a que es el único que brinda la posibilidad de colocar un encoder.

Tabla 20. Características principales de los motores considerados para la tracción.

Motor	GHM-04	GHM-13	RA-37GM	RB-37GM
Max. Torque [Kgf*cm]	8.1	16.7	10.1	16.25
RPM (No load)	175	152	200	124
Voltaje [V]	7.2	12	12	12
Diámetro eje [mm]	6	6	6	6
Corriente a Treq [A]	2.8	1.4	1.4	1
Eficiencia a Treq [%]	15	30	30	29
RPM a Treq	40	80	65	76
Encoder (Tipo)	SI (Óptico)	NO	NO	NO
Peso [g]	155	231	168	175
Precio [USD]	21.95	29.95	36.90	35.50

4.6 VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS BARRAS PRINCIPALES DE SUSPENSIÓN

En esta sección se verificará la resistencia y rigidez de las barras principales de suspensión diseñadas. Esta verificación se justifica en el hecho de que las barras principales de suspensión son los elementos que soportan la mayor parte de las cargas de la estructura y que aportan un peso considerable que debe minimizarse. Primero se presenta el análisis por medio del cual se determinaron las cargas y finalmente las simulaciones estructurales realizadas.

4.6.1 Cargas soportadas por las barras principales. Las barras principales deben soportar una combinación de cargas de torsión y flexión. La superficie vertical de las barras se considera el plano XY, con el eje X horizontal. Para determinar las cargas del análisis estructural se harán las siguientes suposiciones:

- El móvil (10 kg masa) choca contra una pared a una velocidad de 1 m/s y las fuerzas impulsivas del choque que actúan durante 0.05s (tal como se supuso en la sección 4.4.2) lo detienen.
- Las barras principales están empotradas en su zona central. Por lo tanto solo serán aplicadas las fuerzas que actúan en la porción delantera de la barra.
- La fuerza vertical que actúa en el extremo delantero de la barra principal es igual a la carga que soporta la rueda delantera, la cual fue calculada en la sección (4.5.1).
- No fueron consideradas las fuerzas de tracción ni de dirección que se transmiten de las ruedas a las barras, porque se está suponiendo una situación más crítica que es el choque del robot contra la pared.

Aplicando el principio de impulso y cantidad de movimiento se tiene:

$$F_{Bx} = -\frac{m \cdot V_0}{\Delta t} = \frac{10Kg \times 1m/s}{0.05s} = 200 N \quad (\text{Ec. 29})$$

Esta fuerza actúa sobre las dos ruedas frontales por lo tanto cada rueda recibe 100 N. Según el diseño CAD realizado, la distancia e_4 mostrada en la figura 55 es igual a 68 mm.

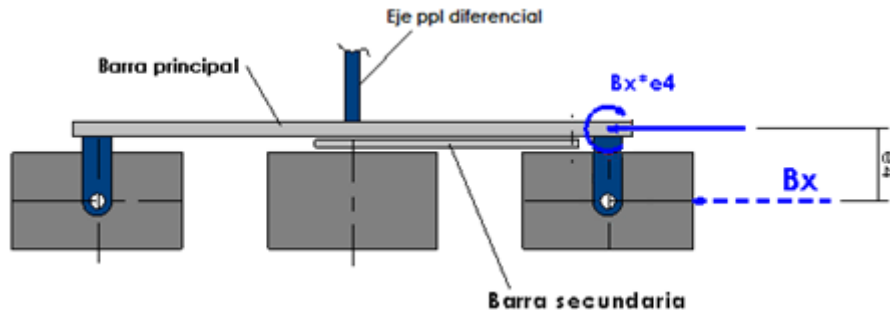


Figura 56. Cargas de flexión en el eje z sobre la barra principal

4.6.2 Análisis estructural de la barra principal. Para hacer este análisis se utilizó el software CAE, *ANSYS WORKBENCH V11*. El análisis estructural es

indispensable para saber si es necesario hacer modificaciones geométricas para garantizar la rigidez y resistencia de la pieza. Las condiciones que se deben respetar son las siguientes:

- **Deformación máxima admisible:** 2 mm
- **Factor de seguridad mínimo:** 3

A. Tipo de análisis: se realizó un análisis estructural estático, suficiente para verificar la resistencia y rigidez de la barra principal. Un análisis de fatiga no es adecuado dado que las cargas no son de naturaleza cíclica.

B. Material: las propiedades del material utilizado en el análisis estructural son mostradas en la figura 57.

Aluminum Alloy > Constants	
Structural	
Young's Modulus	7,1e+010 Pa
Poisson's Ratio	0,33
Density	2770, kg/m ³
Thermal Expansion	2,3e-005 1/°C
Tensile Yield Strength	2,8e+008 Pa
Compressive Yield Strength	2,8e+008 Pa
Tensile Ultimate Strength	3,1e+008 Pa
Compressive Ultimate Strength	0, Pa
Thermal	
Specific Heat	875, J/kg·°C
Electromagnetics	
Relative Permeability	1,
Resistivity	5,7e-008 Ohm·m

Figura 57. Propiedades y constantes del material utilizado en la simulación.

C. Enmallado de la pieza: se hizo utilizando el *CFX – Mesh Method* de *Ansys Workbench*. La figura 58 muestra el resultado de este proceso. Las características del enmallado realizado son:

Forma de los elementos: Tetraedros

Número de elementos: 10541

Número de nodos: 4059

Máximo espacio entre elementos: 0.008 [m]

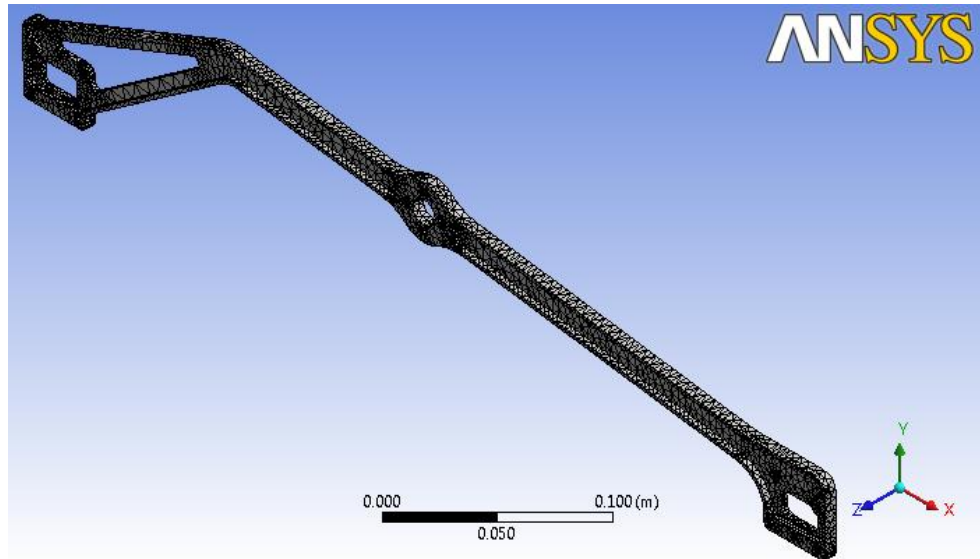


Figura 58. Enmallado realizado mediante el *CFX – Mesh method*.

D. Cargas y soportes: las cargas y soportes utilizados se caracterizan a continuación y se pueden visualizar en la figura 59.

[A] Soporte cilíndrico: fijo en todas las direcciones, axial, radial y tangencial. El agujero central está rígidamente acoplado con el eje del diferencial y puede considerarse que está fijo en todas las direcciones mientras que los extremos de la barra tienen desplazamientos libres. Es como si se tratara de dos vigas en voladizo, una hacia adelante del agujero central y la otra hacia atrás tal como se está suponiendo.

[B] Gravedad estándar de la tierra: actúa en la dirección $-Y$ (9.8066 m/s^2)

[C] Fuerza remota: corresponde a la fuerza vertical de reacción de la rueda delantera considerada (la izquierda). Se ubicó en el punto $(0.23, -0.06, -0.11)$. En Z se colocó a once centímetros debido a que en cualquier momento podría quedar en contacto con el suelo solo el borde externo de la rueda. El origen de coordenadas coincide con el centro del agujero central de la pieza.

Según los resultados obtenidos en el análisis estático desarrollado en la sección 4.5.1 esta fuerza es igual a $3.984/2$ Kgf o 20 N aproximadamente.

[D] Fuerza remota: corresponde a la fuerza de impacto considerada. El valor de esta fuerza es de 100 N tal como fue calculado anteriormente.

[E] Fuerza: es la fuerza debida al extremo del resorte de torsión que actúa contra la barra principal. Su valor es de 10 N tal como fue establecido en la sección 4.5.1.

[F] Fuerza: es la fuerza que actúa en el punto de pivote de la barra secundaria.

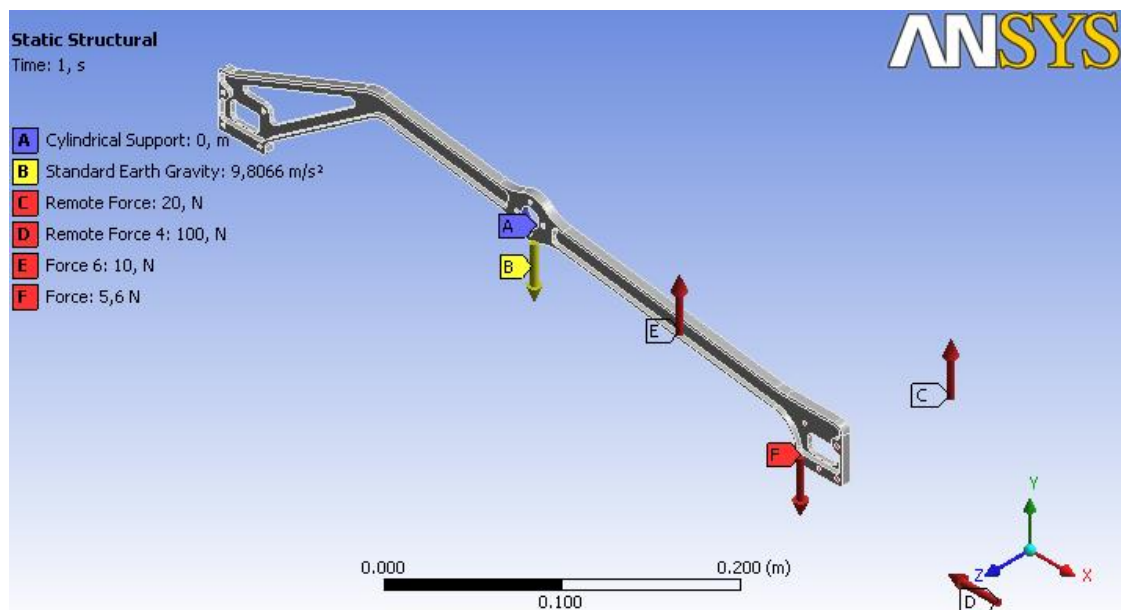


Figura 59. Cargas aplicadas al modelo simulado.

E. Resultados del análisis estructural: las gráficas de las figuras 60 y 61 revelan el comportamiento de la barra principal diseñada, bajo las cargas consideradas. La deformación alcanza un valor máximo de 8,9 mm, por consiguiente, deben hacerse modificaciones geométricas para dar mayor rigidez a la pieza. De otra parte, el factor de seguridad mínimo es 1,73 incumpliendo la condición establecida de mantener el factor de seguridad por encima de tres.

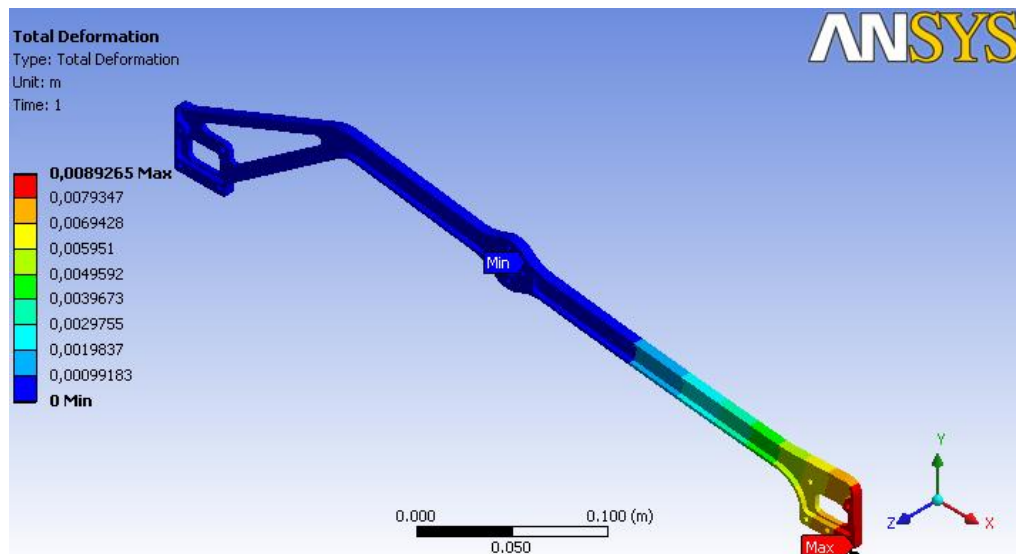


Figura 60. Deformación total de la barra bajo las cargas estipuladas.

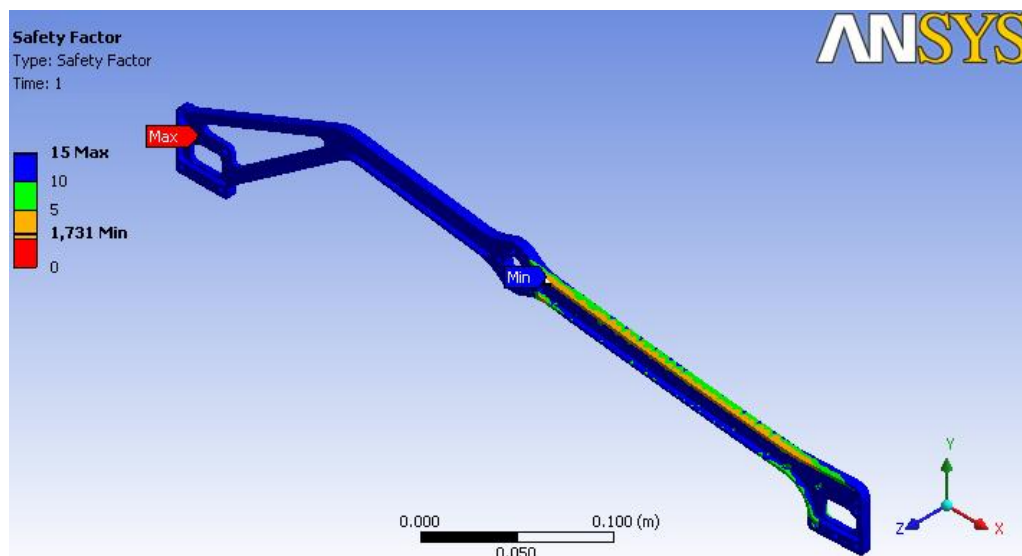


Figura 61. Factor de seguridad de esfuerzos ante las cargas estipuladas.

Según los resultados anteriores, es evidente que el vaciado redujo la rigidez y resistencia de esta pieza, por tal razón, las características geométricas del diseño actual de la barra principal de suspensión no son adecuadas para cumplir con los requerimientos establecidos. Como consecuencia de esto, la

pieza debe ser modificada para mejorar su desempeño ante las cargas estipuladas

Después de varias pruebas adicionales realizadas modificando el ancho de la parte recta de la barra, su espesor y la profundidad y ancho del vaciado, se encontró que manteniendo la forma original de la barra pero partiendo de una platina de media adelgazada en su parte interna hasta tres octavos, se alcanzaba la rigidez y resistencia necesarias. Sin embargo, surgió la idea de formar cada barra de suspensión a partir de dos piezas idénticas dispuestas en tándem, cada una de las cuales debía adelgazarse internamente tanto como se pudiera. Los esfuerzos cortantes longitudinales se podrían mantener gracias a los trece tornillos que unen las dos barras, cinco en su parte frontal, cuatro en la parte central y cuatro en la parte trasera. Una vez considerada esta opción, se descubrió que brindaba una ventaja enorme: al unir las dos piezas adelgazadas se genera una cavidad interna a través de la cual podrían pasarse todos los cables de los motores, servomotores, encoders y sensores. Teniendo en cuenta esta ventaja adicional, el bajo peso y alta resistencia y rigidez que podrían lograrse y a pesar de que el costo de mecanizar estas piezas sería un poco mayor comparado con el costo de mecanizar la platina de media pulgada, debido a que debe ser removido mas material, se decidió utilizar esta opción y los resultados de los análisis estructurales pueden ser apreciados en las figuras 62 y 63.

Las piezas se adelgazaron internamente a 2,35mm, es decir, se removieron 4 mm de material, por consiguiente la cavidad interna quedó de 8 mm de ancho. La deformación total máxima obtenida fue de 1,77mm y el factor de seguridad mínimo igual a 6,98. Esta pieza podría adelgazarse un poco más pero se decidió dejarla así para no incrementar más los costos del mecanizado.

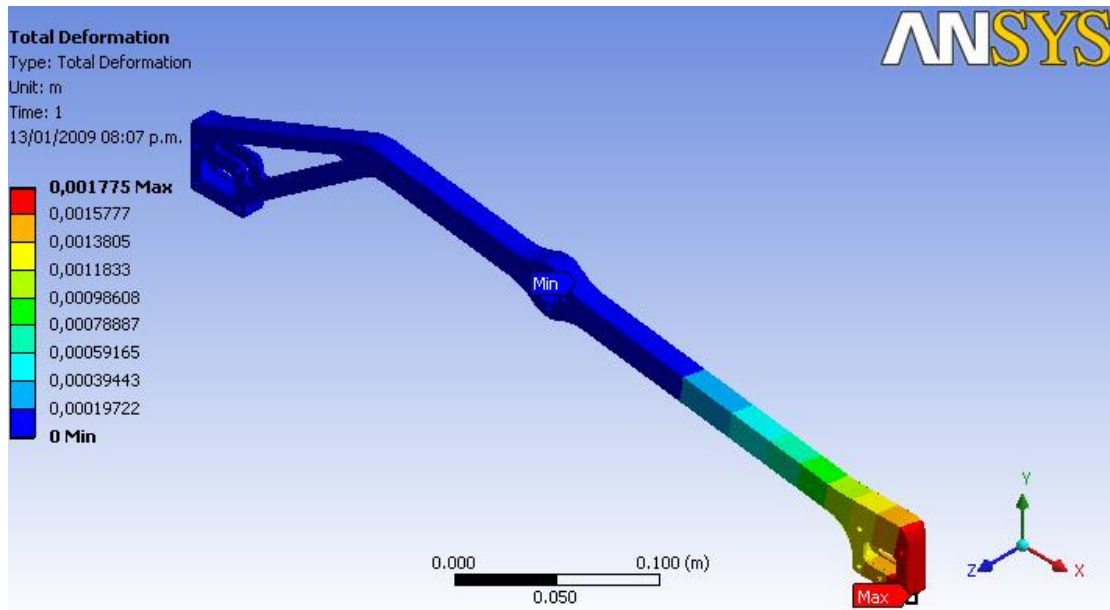


Figura 62. Deformación de la barra principal de suspensión, configuración en tándem

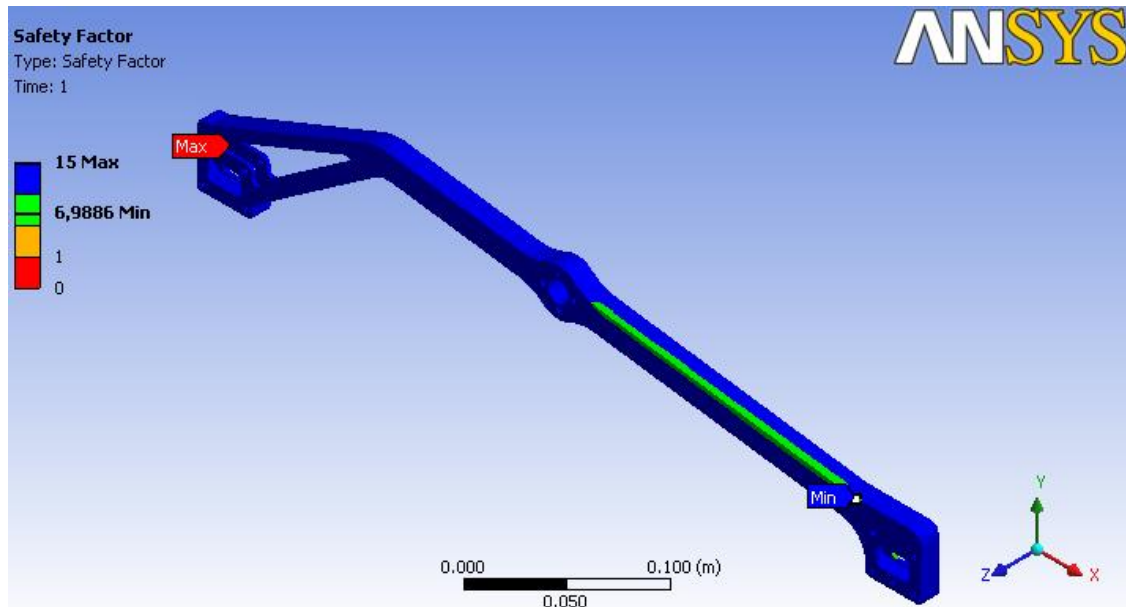


Figura 63. Factor de seguridad de esfuerzos de la barra principal de suspensión, configuración en tándem.

4.7 DISEÑO DE LOS RESORTES DEL SUBSISTEMA DE SUSPENSIÓN

La figura 64 muestra un esquema básico de un resorte de torsión. A continuación se mencionan las condiciones que deben respetarse en el diseño de los resortes que serán utilizados para mejorar el comportamiento del sistema de suspensión.

Fre = 1 Kgf, después de haberse deformado un ángulo de 35°

L = 10 cm

Altura del resorte < 6.35 mm

Diámetro medio del resorte < 18 mm

Por medio de la ecuación 30 se calculó la constante elástica del resorte y con la ecuación 31 se calculó el esfuerzo que soporta [66].

$$K_{torsional} = \frac{T}{\beta} = \frac{E D_a^4}{128 N_a R_s} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$\sigma = \frac{32 K_f \cdot F_{re} \cdot L}{\pi D_a^3} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

T = Fre*L (Figura 63)

β : deformación angular del resorte

E: Modulo de elasticidad del material del alambre (30×10^6 Lbf/in² para aceros)

Da: Diámetro del alambre

Na: número de vueltas

Rs: radio medio del resorte

Kf: factor de concentración de esfuerzo

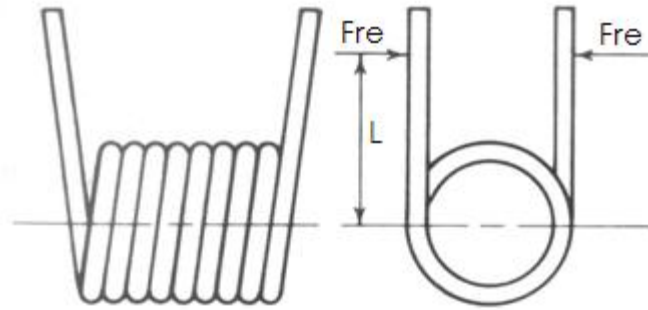


Figura 64. Esquema básico de un resorte de torsión⁴⁷.

El material seleccionado para estos elementos es Acero revenido para resortes ASTM A229 cuya curva de resistencia a la fluencia versus diámetro del alambre puede encontrarse en el Anexo F. En los cálculos se consideraron resortes de 1.5, 2.5 y 3.5 vueltas y alambres de calibres 15, 14, 13, 12 y 11. En total se evaluaron 15 resortes diferentes, calculando su radio medio y el esfuerzo producido. El factor de concentración de esfuerzos se calculó teniendo en cuenta los siguientes valores presentados en el libro de diseño de máquinas de Deutschman.

$K_f = 1.23$ para $C = 4$ y $K_f = 1.14$ para $C = 6$. Donde C es el índice del resorte ($2R_s/D_a$). Se supuso una relación lineal entre K_f y C y el resultado es el siguiente:

$$K_f = -0.045C + 1.41 \quad (\text{Ec. 32})$$

Según los resultados mostrados en el anexo G el resorte que cumple todas las condiciones establecidas es el de 2.5 vueltas con alambre calibre 14 el cual debe ser construido con un diámetro medio igual a 15.4 mm.

⁴⁷ DEUTSCHMAN, Aaron, MICHELS, Walter, WILSON, Charles. Diseño de máquinas teoría y práctica. Editorial CECSA "Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México". Novena reimpresión. México, 1999. Página 773.

4.8 DISEÑO DE LOS RINES

Las figuras 65 y 66 (izquierda) muestran imágenes renderizadas en PhotoWorks (Aplicación de SolidWorks) de las diferentes versiones de diseño de los rines. Básicamente se buscaba obtener un diseño estéticamente agradable, resistente y de bajo peso y pensando en ello se seleccionó el aluminio para su fabricación.

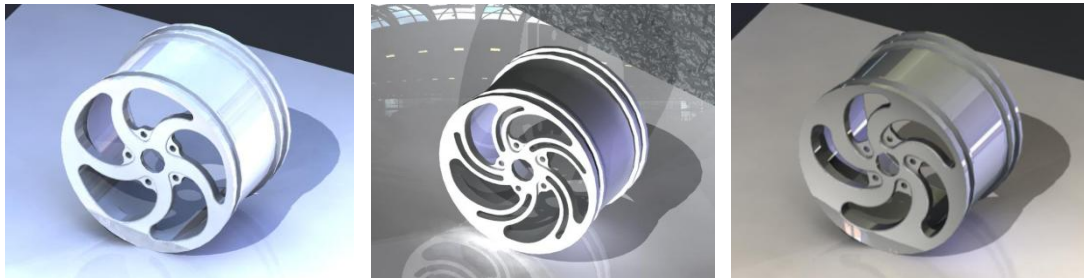


Figura 65. Diseño de los rines versiones uno, dos y tres.



Figura 66. (Izquierda) Diseño definitivo de los rines. (Derecha) Rin original

Las dimensiones relevantes del rin, tales como, los diámetros de las pestañas externas, la distancia entre pestañas y demás, se obtuvieron de un rin plástico que se compró, el cual es mostrado en la figura 66 (derecha) y que es especial para las ruedas seleccionadas.

Se tomó la decisión de construir los rines en lugar de comprarlos básicamente por las siguientes razones:

- Se quería un diseño original de los rines que le diera más personalidad a las ruedas del robot.
- Para sentar un precedente en cuanto al proceso de fabricación de los rines, con el objetivo de dar una guía inicial en futuros proyectos de investigación en los que el diseño de las ruedas juegue un papel importante dentro del diseño del sistema de locomoción del robot. En la parte de futuros trabajos se propone el diseño de unas ruedas construidas completamente en aluminio cuyos radios están especialmente concebidos para funcionar como resortes y suavizar los impactos que sufra el móvil. Este tipo de ruedas son las que utilizan los “MER” de la NASA.

4.8.1 Verificación de la resistencia de los rines diseñados. Para garantizar la resistencia de los rines diseñados se hizo un breve análisis en *ANSYS Workbench V11* que es presentado a continuación.

A. Material: las propiedades del material son las que vienen por defecto en *Ansys* para el aluminio aleado y que fueron ya mostradas en la figura 57.

B. Fuerzas aplicadas: Las fuerzas aplicadas mostradas en la figura 67 son:

- La fuerza radial de 30 N es igual a 1.5 veces la carga que debe soportar cada una de las ruedas de las esquinas. Tiene una pequeña inclinación con respecto a la vertical para simular la fuerza real que surge cuando la rueda y el terreno se deforman (manual de estática Alfredo Parada) y está aplicada en solo una porción del cilindro externo del rin. No se considera la fuerza de impacto porque se realizará un análisis de fatiga.

- La fuerza remota “B” de 15 N corresponde a la fuerza de tracción de la rueda y esta aplicada tangencialmente a 70 mm del centro del rin, que es el radio de la rueda de caucho. $15 \cong \frac{Ho}{4} = \frac{57.41}{4} = 14.35N$ (Tabla 19)
- Para tener en cuenta las fuerzas inerciales debidas a la rotación de la rueda, se agregó la velocidad de rotación calculada en una de las secciones anteriores igual a 14,2 rad/s.
- El soporte se colocó en los cinco agujeros centrales de la rueda (a través de los cuales el rin se une al acople motor-rin) y esta fijo en todas las direcciones.

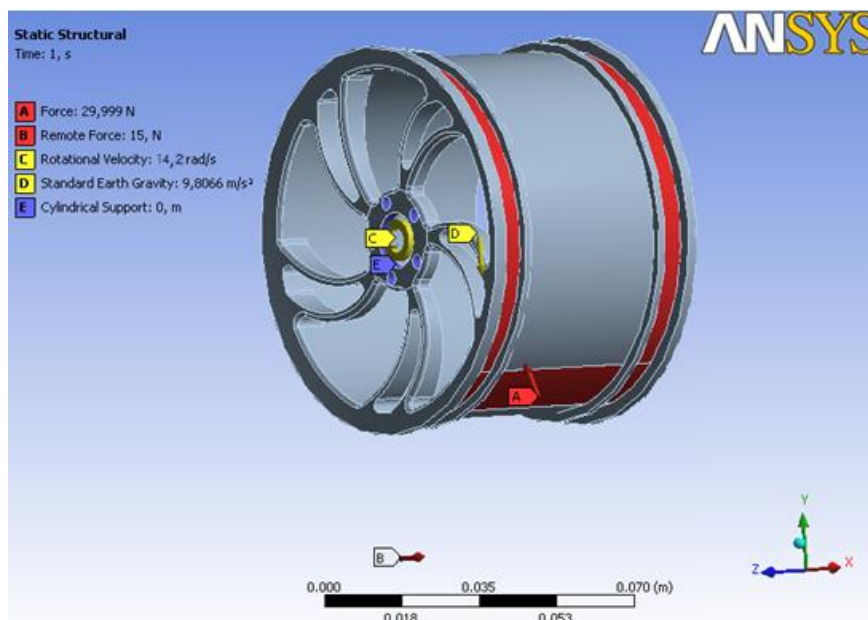


Figura 67. Fuerzas aplicadas en el análisis estructural del rin.

C. Tipo de análisis: dado que en este caso las cargas si son de naturaleza cíclica debido a que el rin trabajará en permanente rotación, un análisis de fatiga es requerido. El criterio utilizado para el análisis de fatiga fue el de Mises-Goodman.

D. Enmallado: la figura 68 muestra el enmallado de la pieza. Un refinamiento del tamaño de los elementos fue necesario en la parte de los radios curvos que es la zona en la que se presentaron los mayores niveles de esfuerzos para mejorar la confiabilidad de la solución.

E. Solución: las figuras 69 a 71 muestran los resultados del análisis realizado. Como era de esperarse los máximos esfuerzos se presentan en la base de los radios curvos, zona en la que hay concentradores de esfuerzos. El factor de seguridad a la fatiga del material es igual a 3.89 tal como puede verse en la figura 69. Este valor es aceptable, sin embargo no es lo suficientemente alto como para pensar en modificar la geometría.

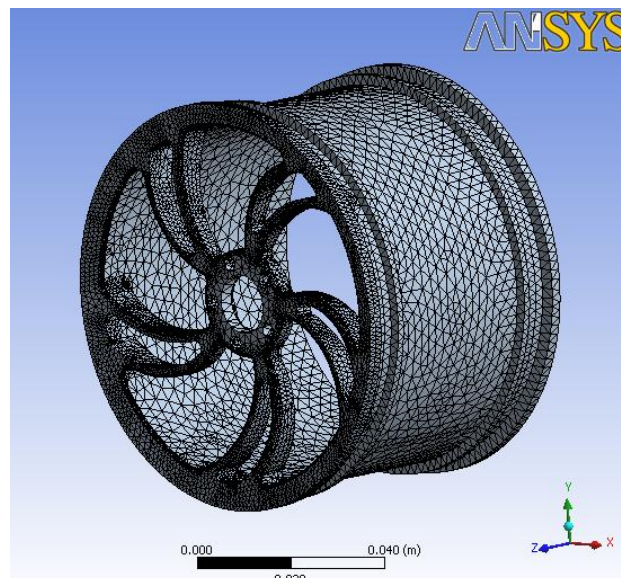


Figura 68. Enmallado del modelo 3D del rin analizado.

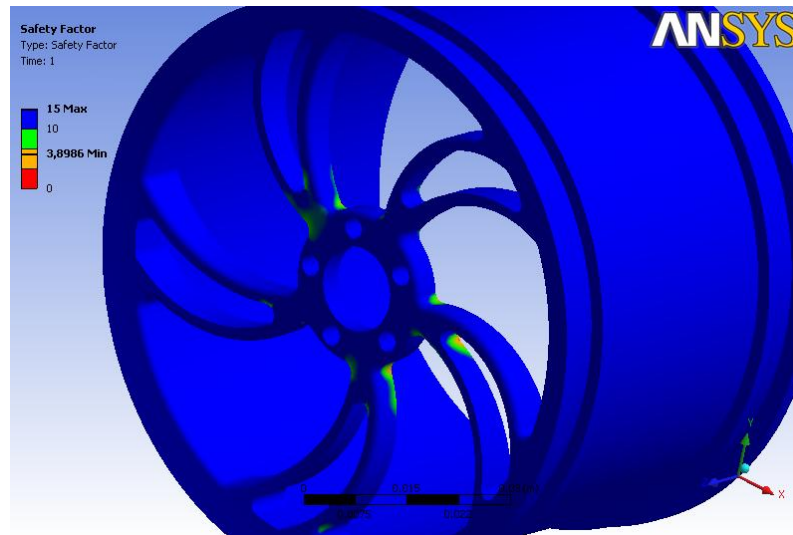


Figura 69. Factor de seguridad a la fatiga

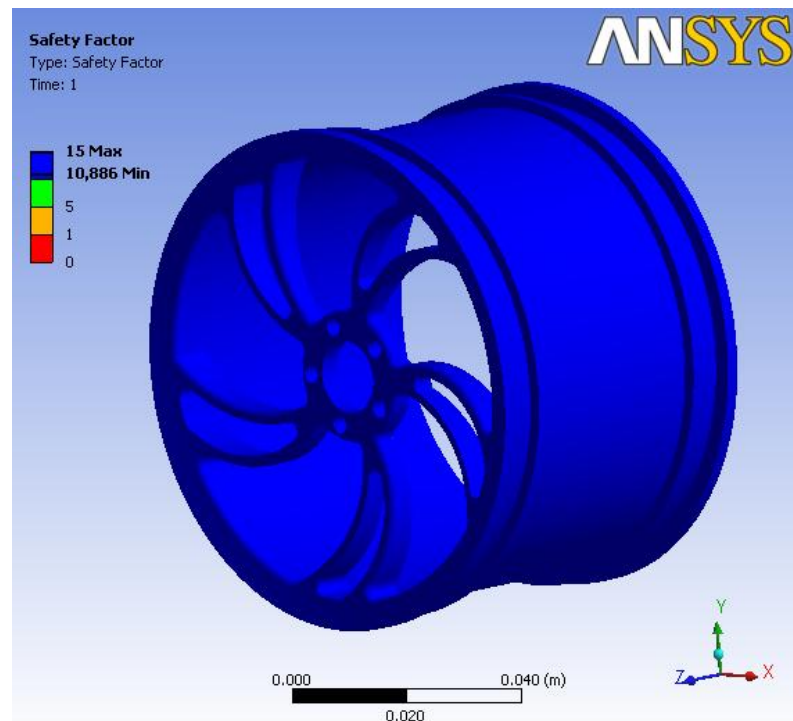


Figura 70. Factor de seguridad de los máximos esfuerzos equivalentes

Según la grafica de la figura 70, el valor mínimo del factor de seguridad de los máximos esfuerzos equivalentes es 10,88, razón por la cual se puede decir que los rines resistirían impactos que produjeran fuerzas del orden de

los 300 N (en la sección 4.6.1 se consideró una fuerza de impacto del móvil de 200 N). En la figura 71 se puede apreciar que la deflexión máxima que sufre el rin ante las cargas estipuladas es del orden de 4.4×10^{-2} mm, por lo tanto es altamente rígido y se puede esperar que resista fuerzas muy superiores a las consideradas manteniendo su deformación máxima por debajo de 1mm.

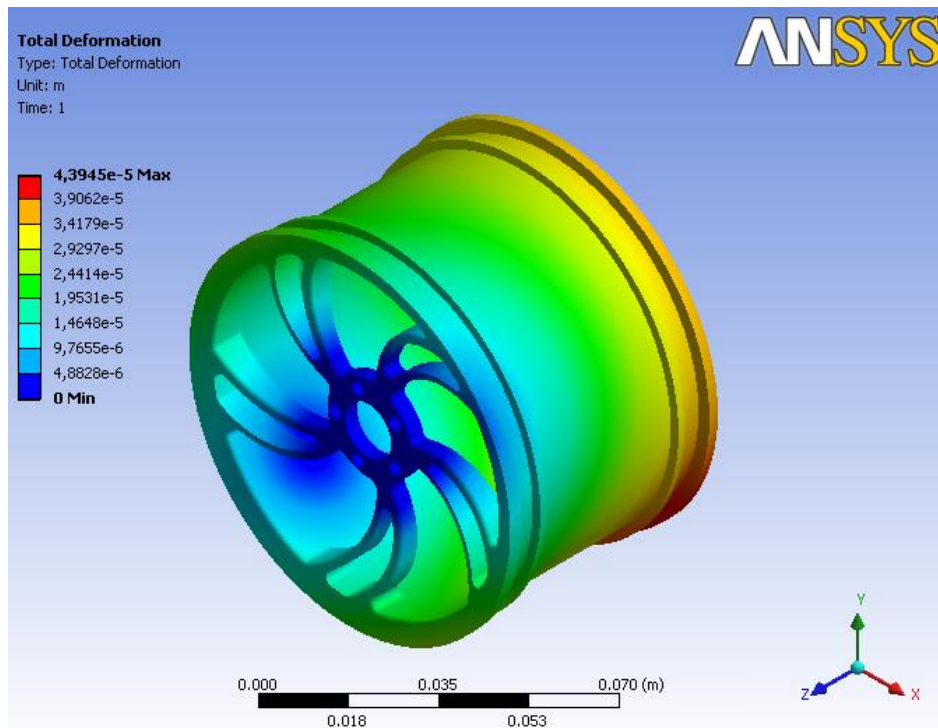


Figura 71. Deformación total del rin bajo las cargas aplicadas.

En conclusión, los resultados demuestran que la geometría es apta para resistir las fuerzas y el trabajo al que serán sometidos los rines y que pueden ser construidos tal y como fueron diseñados.

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Este capítulo trata todo lo relacionado con la construcción y montaje de los componentes del sistema de locomoción del robot móvil explorador. Inicialmente se muestra el proceso de fabricación de las piezas planas mecanizadas en CNC. Seguidamente se presenta el proceso de fabricación de los rines y de los engranajes del diferencial, así como algunos detalles relevantes del proceso de construcción de los ejes, bujes, chasis, accesorios y piezas complementarias.

5.1 FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS PLANAS

Las piezas que fueron diseñadas para ser cortadas a partir de una lámina o platina de un cuarto de pulgada de espesor se mencionan a continuación y se muestran en la figura 72.

- Barras principales y secundarias del sistema de suspensión: seis piezas
- Soportes del sistema de dirección: ocho piezas
- Chumaceras que soportan los ejes del diferencial: Cuatro piezas
- Soporte del diferencial: tres piezas

5.1.1 Máquina utilizada. El laboratorio de Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS cuenta con un centro de mecanizado *CNC LEADWELL V20* (**Figura 73**), en el que fueron mecanizadas estas piezas. Esta máquina tiene las siguientes características relevantes:

- *Numero de ejes:* tres, X y Y horizontales y Z vertical.
- *Autómata:* FANUC

➤ *Espacio de trabajo: X = 508 mm, Y = 350 mm*

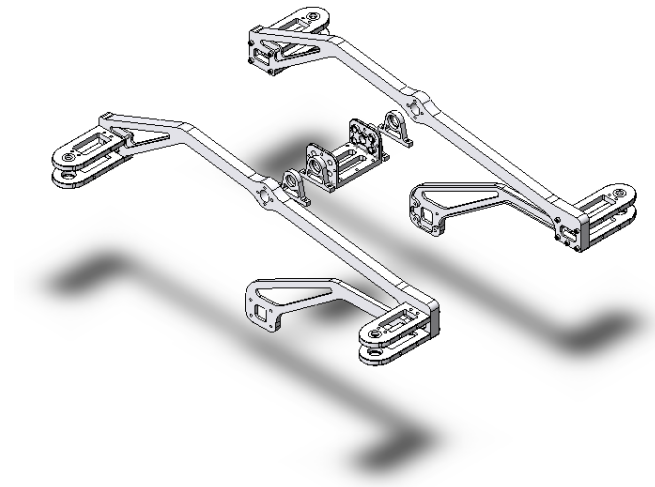


Figura 72. Piezas planas que deben ser construidas en CNC



Figura 73. Centro de mecanizado *CNC LEADWELL V-20*.

Las piezas mecanizadas tienen formas que combinan líneas rectas y curvas (arcos de circunferencia), simples para realizarlas en un centro de mecanizado CNC por medio de movimientos simultáneos de los ejes X y Y, pero complejas para una fresadora convencional. Esto justifica el uso de la máquina CNC, además de la precisión requerida por tratarse de un sistema robótico.

5.1.2 Estrategia general de mecanizado. Dadas las características similares de todas las piezas se pensó que podían ser mecanizadas en un solo montaje distribuyéndolas adecuadamente en una lámina del espesor requerido (1/4"). De esa forma se ahorraría tiempo de "*setting*" de la máquina y se haría más eficiente el proceso de construcción. Sin embargo, una lámina de aluminio de dicho espesor, de 210 cm x 90 cm, tiene un valor aproximado de \$500.000 en la ciudad de Bogotá y solo venden la lámina completa, casi cuatro veces la cantidad de material requerido. Por lo tanto, se resolvió emplear platina de seis pulgadas de ancho del mismo espesor y mecanizar las piezas en tres montajes. Esto además de facilitar la compra de solo el material requerido, resultó ser lo más adecuado dado que otros estudiantes demandaban el uso de la máquina para el desarrollo de las actividades propias de la materia CNC y por lo tanto ésta no debía ser ocupada por más de dos días seguidos. El tiempo promedio aproximado de mecanizado de cada platina fue 14 horas teniendo en cuenta el tiempo de *setting*. La figura 74 resume la estrategia de mecanizado de cada platina.

La idea de la estrategia planteada es hacer los agujeros y los vaciados de todas las piezas y después de esto definir los contornos de las mismas dejando solo algunas porciones de material remanente estratégicamente ubicadas para que al final del mecanizado, cada pieza tenga varios puntos de apoyo. Esto se hace con el fin de evitar que las fuerzas propias del mecanizado las desprendan de la platina antes de tiempo, poniendo en riesgo la vida de la herramienta de corte. Al profundizar la herramienta verticalmente en vacío, se evitan los movimientos en espiral o en rampa lineal que típicamente se utilizan para alcanzar la profundidad de corte de cada pasada y por consiguiente se disminuye el riesgo de partir la herramienta, se minimiza el desgaste de la misma y se ahorra tiempo de mecanizado. El resultado final será una lámina con una serie de cortes pasantes, agujeros y vaciados tal como la mostrada en la figura 75.

Taladrado broca de centrar	<ul style="list-style-type: none"> • Se utiliza una broca de centrar N° 1 para hacer los centros de todos los agujeros, tanto los agujeros propios de las piezas como los utilizados para la entrada de los escariadores.
Taladrado broca de 1/8"	<ul style="list-style-type: none"> • Una broca de 1/8" se pasa por todos los centros marcados en la operación anterior. Los agujeros a través de los cuales pasaran los tornillos de fijación de las piezas se dejan de este diámetro, los demás se deben agrandar en la siguiente operación.
Taladrado broca de 6,5mm	<ul style="list-style-type: none"> • Se taladran solo los agujeros de diámetro mayor a 6,5mm y los agujeros a través de los cuales la herramienta profundiza. Se escogió la broca de éste diámetro porque a través de ese agujero pasa fácilmente el escariador de 1/4" con el que van a ser mecanizados los vaciados y los contornos.
Otros taladrados	<ul style="list-style-type: none"> • Agujeros centrales de las barras principales de suspensión (broca de 1/2") y agujeros centrales piezas verticales del diferencial (broca de 5/16")
Vaciados	<ul style="list-style-type: none"> • Se utiliza un escariador de 1/4" que profundiza verticalmente a través de los agujeros de 6,5 mm previamente taladrados en áreas donde los vaciados son pasantes. En algunas piezas que requieren radios mas pequeños es necesario utilizar también un escariador de 1/8".
Contornos	<ul style="list-style-type: none"> • Por medio de esta operación se define la forma externa de todas las piezas. La entrada de la herramienta se hace verticalmente a través de los agujeros de 6,5 mm previamente taladrados tangentes a los bordes externos de las piezas.

Figura 74. Estrategia general de mecanizado.



Figura 75. Resultado del mecanizado aplicando la estrategia propuesta.

Las piezas deben ser separadas de la platina cortando las pequeñas porciones de material remanente, operación que se puede hacer manualmente con una sierra o con un pequeño disco de corte de motor-tool. Las figuras 76, 77 y 78 muestran la distribución de las 21 piezas requeridas, en los tres segmentos de platina. Dicha distribución se hizo en

SolidWorks plano. En estas figuras pueden apreciarse unos puntos rojos que corresponden al cero de pieza que debe coincidir en los tres casos con el cero de máquina en X y Y (no necesariamente en Y).

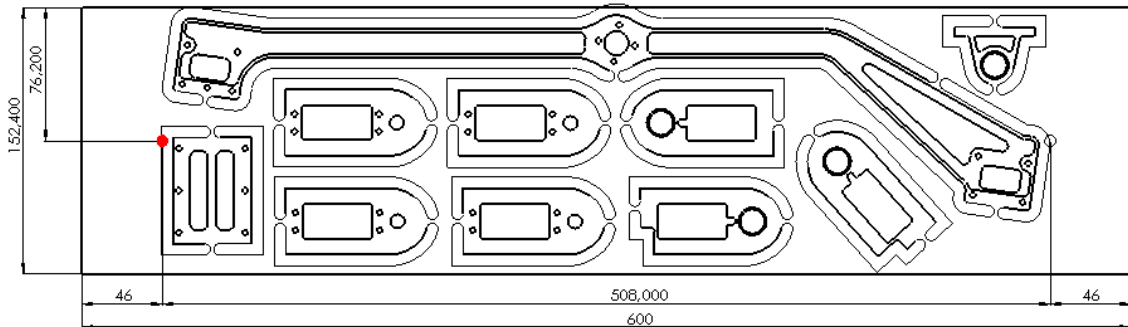


Figura 76. Distribución de las piezas para el primer montaje.

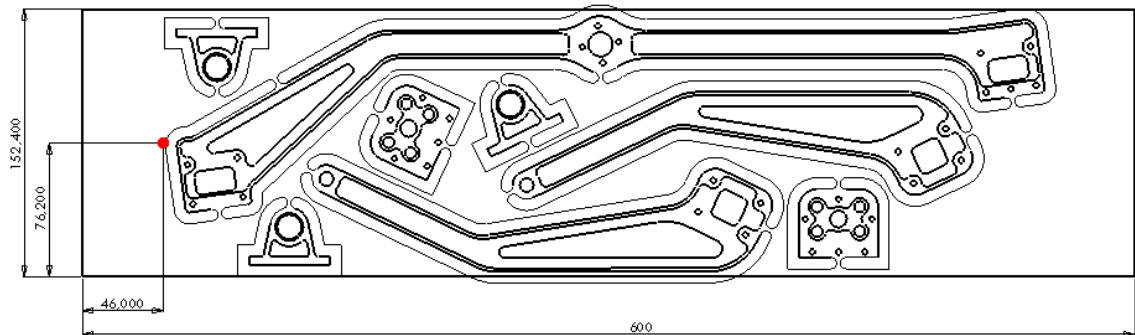


Figura 77. Distribución de las piezas para el segundo montaje.

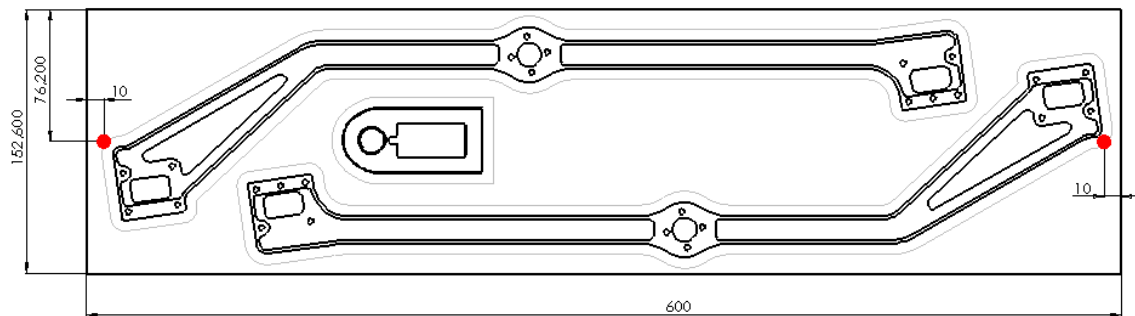


Figura 78. Distribución de las piezas para el tercer montaje.

5.1.3 Sujeción de la pieza. Las platinas se fijaron a la mesa de trabajo por medio de uñas de sujeción en sus esquinas y un tornillo en su parte central. De esta forma se logró que quedaran bien asentadas a lo largo de toda su longitud y a nivel para evitar vibraciones y/o deflexiones que hubieran podido

causar un mecanizado defectuoso o poner en riesgo la integridad de la herramienta. Dado que las piezas tienen agujeros pasantes y que para definir el contorno de las mismas la herramienta debe llevarse a una profundidad que sobrepase el espesor de la platina, es necesario colocar una pieza de sacrificio debajo de esta para no causar daños a la mesa de la máquina. Por facilidad y costo se utilizó una pieza de triplex de 25 mm de espesor. La figura 79 muestra una foto del tercer montaje.



Figura 79. Sujeción de la platina por medio de uñas y tornillo.

5.1.4 Condiciones de corte. Es importante resaltar la influencia de las condiciones de corte en el acabado superficial de las piezas, por consiguiente, a continuación se mencionan algunos aspectos importantes que fueron tenidos en cuenta:

A. Calidad de la herramienta de corte: la calidad del acabado superficial de una pieza obtenida mediante un proceso de remoción de material depende en gran medida de la calidad de la herramienta de corte utilizada. Durante el proceso de mecanizado de las piezas de este proyecto se pudo comprobar lo anterior. Inicialmente se trabajó con un escariador de $\frac{1}{4}$ " con recubrimiento de titanio, el cual, a pesar de tener uno de sus filos en mal estado, daba un buen acabado superficial. La última platina tuvo que ser mecanizada con una

herramienta de menor calidad y fue evidente el aumento en la rugosidad superficial. En el Anexo F, aparece una tabla con los recubrimientos recomendados según el material de trabajo y la operación de mecanizado a realizar.

B. Fluido de corte: el fluido de corte evita que las partículas de metal removido se peguen en la punta de los filos de la herramienta (lo que acarrearía un empeoramiento en el acabado superficial de la pieza) pues funciona como lubricante impidiendo el contacto directo de la viruta con la herramienta. El aluminio en particular, se pega con facilidad a la herramienta al igual que otros metales blandos como el cobre. Para trabajar este tipo de metales, el fluido de corte recomendado es el aceite de corte. Sin embargo, se trabajó con aceite soluble, más conocido como “taladrina”, el cual también tiene un comportamiento aceptable refrigerando y lubricando herramientas al cortar aluminio.

C. Velocidad de avance y de giro de husillo adecuadas: como las piezas no requerían de una determinada rugosidad superficial, este parámetro no fue considerado en los cálculos de las velocidades de corte y simplemente se siguieron las recomendaciones dadas por los fabricantes de las herramientas. No obstante, se hicieron pasadas de afinado para tratar de mejorar el aspecto final del mecanizado, pero las velocidades de tales pasadas se determinaron empíricamente. En la tabla 21 se presentan las características principales de las herramientas que fueron empleadas en el mecanizado de las piezas en cuestión.

D. Cálculos de velocidades de corte: debido a que en algunos casos no se tenía certeza de la marca de las herramientas de corte con las que se iba a trabajar, se utilizaron catálogos de fabricantes reconocidos de los que se obtuvieron las velocidades de corte recomendadas para herramientas similares. En el Anexo F, se muestran las secciones utilizadas de los

catálogos de los fabricantes consultados, *Blue-Master* (para las brocas) y de *Melin tool Company* (para los escariadores).

Tabla 21. Herramientas utilizadas.

HERRAMIENTA	DIÁMETRO	Nº DE FILOS	Nº Magazín	MATERIAL
Broca de centrar	1/8"	2	T1	HSS
Broca	1/8"	2	T2	HSS
Broca	6.5 mm	2	T3	HSS
Broca	1/2"	2	T4	HSS
Escariador	1/4"	4	T6	HSS (con TIN)
Escariador	1/8"	4	T7	HSS

Escariadores: de la página 116 del catálogo de *Melin tool Company* mostrada en el Anexo F, se obtuvieron los datos requeridos para calcular la velocidad de avance y de giro de husillo de los escariadores de 1/4" y de 1/8" resumidos en la tabla 22. La tabla consultada corresponde a escariadores de extremo plano (*End Mill Flat*) de acero rápido (HSS) y los parámetros de corte vienen para una gran variedad de materiales, entre los cuales está el aluminio. En la figura 80 aparecen las fórmulas por medio de las cuales se puede calcular la velocidad de avance de la herramienta.

Tabla 22. Datos obtenidos del catalogo consultado para el cálculo de las velocidades de corte de los escariadores.

Parámetro	Escariador de 1/4"		Escariador de 1/8"	
	Rango recomendado	Valor seleccionado	Rango recomendado	Valor seleccionado
RPM	3056 - 9168	3056	6112 UP	6112
FEED (Lead per tooth)	0.0005 – 0.002	0.0015	0.0002 – 0.001	0.0005

Para el escariador de 1/4" se estableció una velocidad de giro de husillo igual a 3056 RPM, la más baja dentro del rango recomendado porque se está

considerando una operación de desbaste. De la misma manera se escoge 6112 RPM para el escariador de 1/8". Además, para el parámetro "Chip load", en los dos casos se escogió un valor intermedio de los rangos recomendados. Los resultados del cálculo de la velocidad de avance teniendo en cuenta los valores escogidos de la tabla 22 y las fórmulas presentadas en la figura 80 se pueden apreciar en la tabla 23.

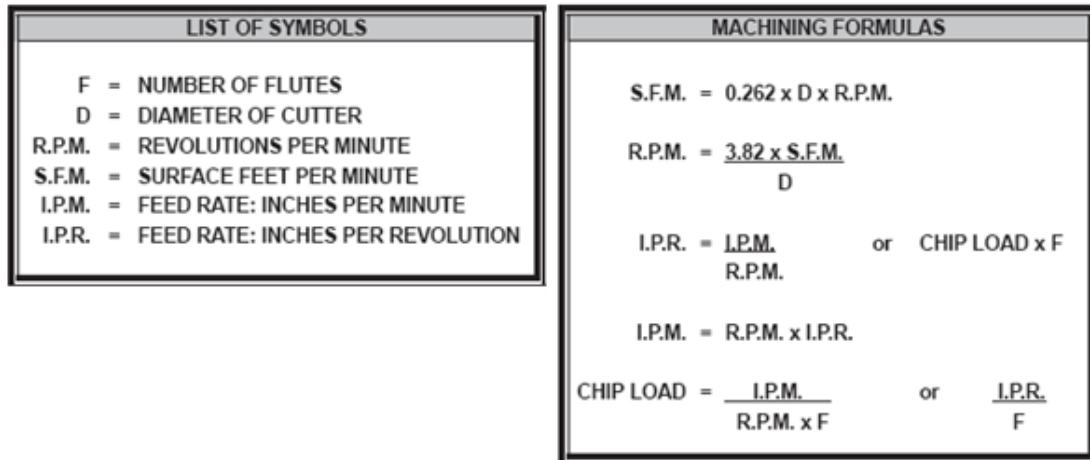


Figura 80. Fórmulas utilizadas en los cálculos de velocidades de corte en escariadores. Fuente: catálogo *Melin tool company*.

Tabla 23. Velocidades calculadas y utilizadas para los escariadores.

Herramienta	S calculado [RPM]	F calculado [mm/min]	S utilizado [RPM]	F utilizado [mm/min]
Escariador 1/4"	3056	466	2500	400
Escariador de 1/8"	6112	310	4000	200

Dado que uno de los filos del escariador de un cuarto estaba en malas condiciones, se decidió reducir un poco la velocidad de giro de husillo recomendada y establecerla en 2500 rpm. Igualmente se redujo la velocidad de avance a 400 mm/min. Como el escariador de un octavo que se compró para esta aplicación era de un acero rápido económico, se decidió disminuir la velocidad de corte buscando prolongar su vida útil. Por tanto, se estableció la velocidad de giro de husillo en 4000 rpm y se redujo la velocidad de

avance a 200 mm/min. Estos valores también pueden visualizarse en la tabla 23 en las columnas de valores utilizados.

Brocas: el catálogo de Blue-Master presenta una guía muy precisa y fácil de manejar acerca de las velocidades de giro de husillo y velocidades de penetración que deben tener las brocas para taladrar diferentes tipos de materiales. En dicho catálogo se mencionan además las condiciones que se deben cumplir para que los valores mostrados en las tablas sean válidos y las fórmulas que deben aplicarse. Las páginas relevantes son mostradas en el Anexo F y los resultados de los cálculos realizados con base en dichos datos en la tabla 24. Casi en todos los casos, los valores finalmente utilizados o valores reales según la tabla 24, fueron disminuidos conservativamente con respecto a los valores calculados, pensando en cuidar la herramienta y prolongar su vida útil.

5.1.5 Cálculos de tolerancias para los ajustes de las piezas. Algunas dimensiones de algunas piezas deben tener tolerancia adecuada para facilitar el ensamble con otras piezas o para garantizar su correcto funcionamiento. Tales dimensiones son presentadas a continuación. Información acerca de teoría y cálculo de tolerancias y ajustes fue consultada en el manual del profesor Hernán Rojas.

A. Soportes de dirección y chumaceras: en estas piezas son insertados los rodamientos radiales de 16mm de diámetro externo. El diámetro del agujero en el que serán insertados los rodamientos debe tener la tolerancia adecuada para que el ajuste sea forzado, pues la pista externa debe quedar fija y estática. Se deben tener en cuenta las tolerancias recomendadas por el fabricante, en este caso SKF.

Tabla 24. Velocidades de giro de husillo y de avance recomendadas en el catálogo de Blue-Master y las finalmente utilizadas.

Herramienta	S calculado [RPM]	F calculado [mm/min]	S real [RPM]	F real [mm/min]
Broca de centrar 1/8"	4010	80	4000	65
Broca de 1/8"	4010	80	3500	50
Broca de 6.5 mm	1958	125	1950	125
Broca de 1/2"	979	220	850	200

En el Anexo F se muestra una tabla de tolerancias recomendadas por SKF para sus rodamientos radiales de bolas. Según dicha tabla, la tolerancia que debe ser aplicada para los rodamientos utilizados es la M6. Tal calidad o nivel de precisión puede ser obtenido en el centro de mecanizado CNC, por lo tanto no hay ningún inconveniente para seguir esta recomendación. Una vez conocida la tolerancia recomendada (M6), se puede proceder a verificar las dimensiones del agujero en una aplicación gráfica e interactiva presentada por SKF en su sitio WEB, que facilita la comprensión de los resultados. La figura 81 muestra el resultado obtenido después de correr tal aplicación.

Según la figura 81 la tolerancia del agujero de 16mm debe ser:

$$16M6 = 16_{-15}^{-4} \text{ (Tolerancia en } \mu\text{m)}$$

B. Otras piezas: los ajustes y las tolerancias de otras dimensiones como el diámetro del agujero central de las barras principales de suspensión, el diámetro del agujero de las barras secundarias y los agujeros de las piezas verticales que soportan los ejes de los engranajes del diferencial serán mostradas en la tabla 26.

Housing tolerances and resultant fits

Bearing **628/8-2RS1**

Bearing tolerance class

Normal, CLN, CL7C
 P6
 P5
 P7
 P4, P4A, P7

P9, PA9A
 SP
 UP

Note: Please check if the specific bearing is available in the requested tolerance class. See also the relevant text section for the bearing type

Housing tolerance class

F7
 G6
 G7
 H4
 H5
 H6
 H7
 H8
 H9
 H10
 J6
 J7
 JS4
 JS5
 JS6
 JS7
 K4
 K5
 K6
 K7
 M4
 M5
 M6
 M7
 N6
 N7
 P6
 P7

Bearing outside diameter tolerance, μm

0	max
-8	min

Housing bore tolerance, μm

-4	max
-15	min

D, mm **16**

Tolerance bars are scaled 1/2 for diameters > 120 mm and 1/4 for diameters > 1 250 mm.

Fits, μm

positive=interference
negative=clearance

	max	min
theoretical	15	-4
probable	12	-1
medium	5.5	

Shaft tolerances and resultant fits
Recommended fits

Figura 81. Tolerancia del agujero de la chumacera⁴⁸.

5.1.6 Generación de los códigos de mecanizado. Para generar los códigos o programas de mecanizado se utilizó el software *MasterCAM X* (Versión 10).

A. Geometría importada: *MasterCAM* permite importar la geometría de piezas modeladas en *SolidWorks*, es decir, archivos con extensión *.SLDPRT*. Sin embargo, los planos de la distribución de las piezas en cada platina mostrados en las figuras 76, 77 y 78, los cuales definen por completo la geometría a mecanizar y que están guardados en archivos con extensión *.SLDDRW*, no pueden ser importados directamente desde este programa. Teniendo esto en cuenta se aplicó el procedimiento mostrado en la figura 82 para poder importar la geometría del mecanizado.

B. Lista de operaciones: en Anexo G se muestra una tabla con las operaciones correspondientes al primer montaje. Los listados de operaciones de mecanizado de las otras dos platinas son similares a este.

⁴⁸www.skf.com



Figura 82. Procedimiento para importar la geometría desde *MasterCAM*.

C. Simulación: la simulación del programa es indispensable para detectar posibles errores que pueden causar geometrías erróneas en la pieza mecanizada, daños en las herramientas, daños en la máquina por colisiones a alta velocidad e incluso lesiones al operador. Para verificar las trayectorias seguidas por las herramientas, se utilizó la opción “Backplot”. Para visualizar el aspecto que iba tomando el bloque de material base, a medida que pasaba la herramienta haciendo los cortes seleccionados se utilizó la opción de simulación denominada “verify”. La figura 83 muestra el resultado final de la simulación de todas las operaciones del primer y del segundo montaje.

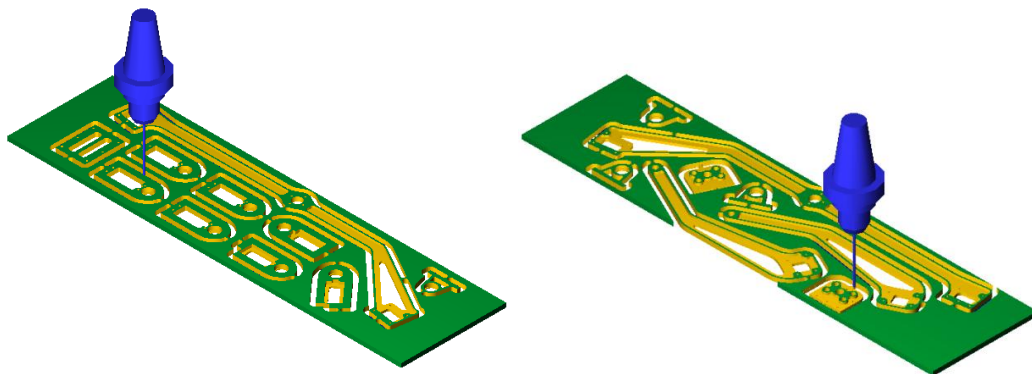


Figura 83. Resultado final de las simulaciones de los montajes uno (izquierda) y dos (derecha).

5.2 FABRICACIÓN DE LOS RINES.

La fabricación de los rines involucró varios procesos de manufactura que son presentados en el diagrama de la figura 84 y detallados a continuación.

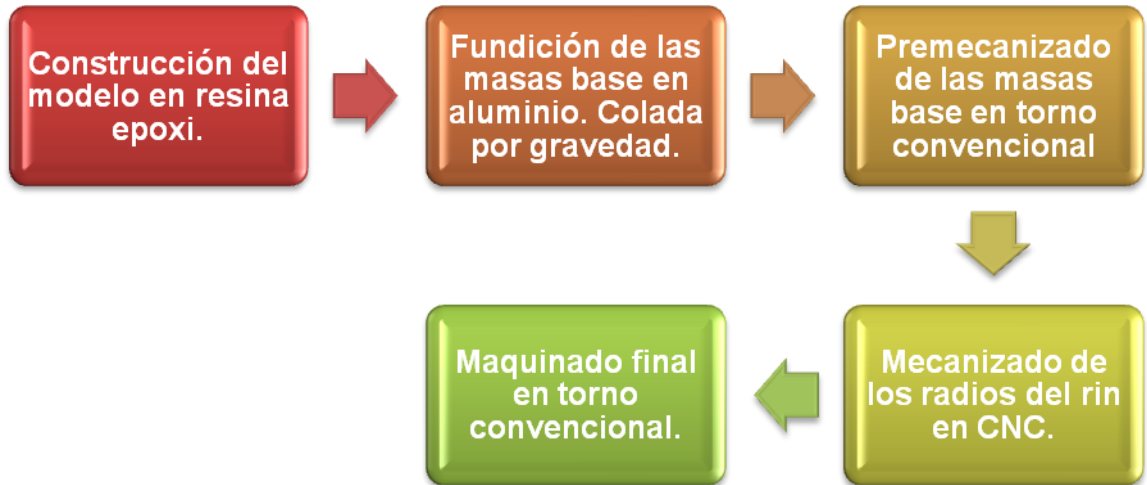


Figura 84. Proceso de fabricación de los rines.

5.2.1 Construcción del modelo en resina epoxi. En la fabricación del modelo para la fundición de las masas base de los rines se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Ángulos de salida externos e internos de 2° para no dañar el molde de arena durante la extracción del modelo.
- Dimensiones externas mayores a las dimensiones finales deseadas para la masa base, teniendo en cuenta la contracción del material después de la fundición.
- Dimensiones internas menores a las dimensiones finales deseadas para la masa base, teniendo en cuenta la contracción del material después de la fundición.

- Mazarota (protuberancia) en la parte superior del modelo para evitar el rechupe del metal fundido en la parte del macho.
- Material: resina epóxica. Este material es comúnmente utilizado como aglutinante en las piezas que se construyen en fibra de vidrio. La resina se “suavizó” con harina de trigo para disminuir su fragilidad y aumentar su maquinabilidad. Se escogió este material por su facilidad para el mecanizado, resistencia, consistencia y durabilidad.
- Mecanizado apropiado en un torno convencional garantizando que todas las superficies sean concéntricas.

La figura 85 muestra una imagen del modelo construido. En las referencias [71, 72] se puede encontrar información detallada sobre construcción de modelos y otros aspectos relacionados con el proceso de fundición.



Figura 85. Modelo para la fundición de las masas base construido en resina.

5.2.2 Fundición de las masas base. La fundición de las seis masas bases para los seis rines fue llevada a cabo en la Planta de Aceros de la UIS. Del proceso de fundición realizado se pueden mencionar los siguientes aspectos:

- El material fundido fue chatarra de aluminio (pistones de motores de automóvil, aluminio arquitectónico y alambre de aluminio).

- Un horno de crisol fue utilizado para fundir el aluminio. Temperatura alcanzada 700°C.
- Los moldes se hicieron en arena utilizando el modelo construido en resina.
- Los seis moldes elaborados fueron sacados de las cajas metálicas y se colocaron los bloques de arena compactada sobre el suelo.
- Se hizo colada por gravedad.

5.2.3 Torneado preliminar. El torneado preliminar de las masas base fue realizado por el operario del taller de maquinas herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS en un torno convencional. La figura 86 muestra el resultado de este proceso que fue realizado en el siguiente orden:



Figura 86. Resultado del proceso de pre mecanizado de las piezas en torno convencional

- Se agarró la pieza por su diámetro externo utilizando la copa con las mordazas invertidas.
- Se refrentó y cilindró la mazarota.
- Se agarró la pieza por la mazarota ya rectificada utilizando las mordazas normales.
- Se cilindró la parte interna, solo hasta el diámetro interno final que debía tener el rin, pues esa zona no podía ser mecanizada posteriormente.

- Se refrentó la cara interna solo lo suficiente para dejar una superficie uniforme y sin marcas del proceso de fundición.
- Se **cilindró** la parte externa dejando la pared del cilindro tan gruesa como fue posible, teniendo en cuenta que la pieza debía ser agarrada posteriormente en la copa del centro de mecanizado CNC.
- Se refrentó la cara anular hasta que el cilindro interno alcanzó la longitud final.
- Se hizo una perforación de 5/8" de diámetro en el centro del rin.
- Nuevamente se agarró la pieza desde la parte externa opuesta a la mazarota.
- Se eliminó la mazarota y se refrentó la cara resultante hasta que el espesor de esa pared alcanzó sus dimensiones finales.

5.2.4 Mecanizado en CNC de los agujeros que forman los radios. Dada la forma en espiral de los radios de los rines diseñados, su construcción solo era posible mediante el empleo de una maquina CNC. Nuevamente se utilizó el centro de mecanizado *CNC LEADWELL V20* del laboratorio FMS de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

A. Sistema de sujeción de las piezas: teniendo en cuenta su forma cilíndrica, la manera más idónea de sujetar estas piezas a la mesa del centro de mecanizado, es por medio de una prensa de mordazas radiales, similar a la copa de un torno. La figura 87 muestra una imagen del montaje realizado. Como puede ser apreciado en tal figura, fue necesario utilizar las mordazas invertidas para sujetar las piezas desde su parte externa.

B. Verificación de la horizontalidad de la cara superior de la pieza: esta operación fue realizada con ayuda de un nivel. Gracias al correcto mecanizado de las piezas, las caras planas superior e inferior quedaron paralelas y por tanto la cara superior quedo horizontal después del montaje y el eje del agujero vertical.

C. Estrategia general de mecanizado: la estrategia adoptada es similar a la utilizada en la fabricación de las piezas obtenidas de la platina de 1/4". La similitud está en que se trata de un mecanizado en dos dimensiones y que también serán taladrados unos agujeros para la entrada vertical de los escariadores evitando de esa forma una serie de inconvenientes que ya fueron mencionados en la sección anterior. La figura 88 resume las operaciones principales de esta estrategia en orden de ejecución.



Figura 87. Sujeción de las masas pre-mecanizadas de los rines por medio de una prensa de mordazas radiales

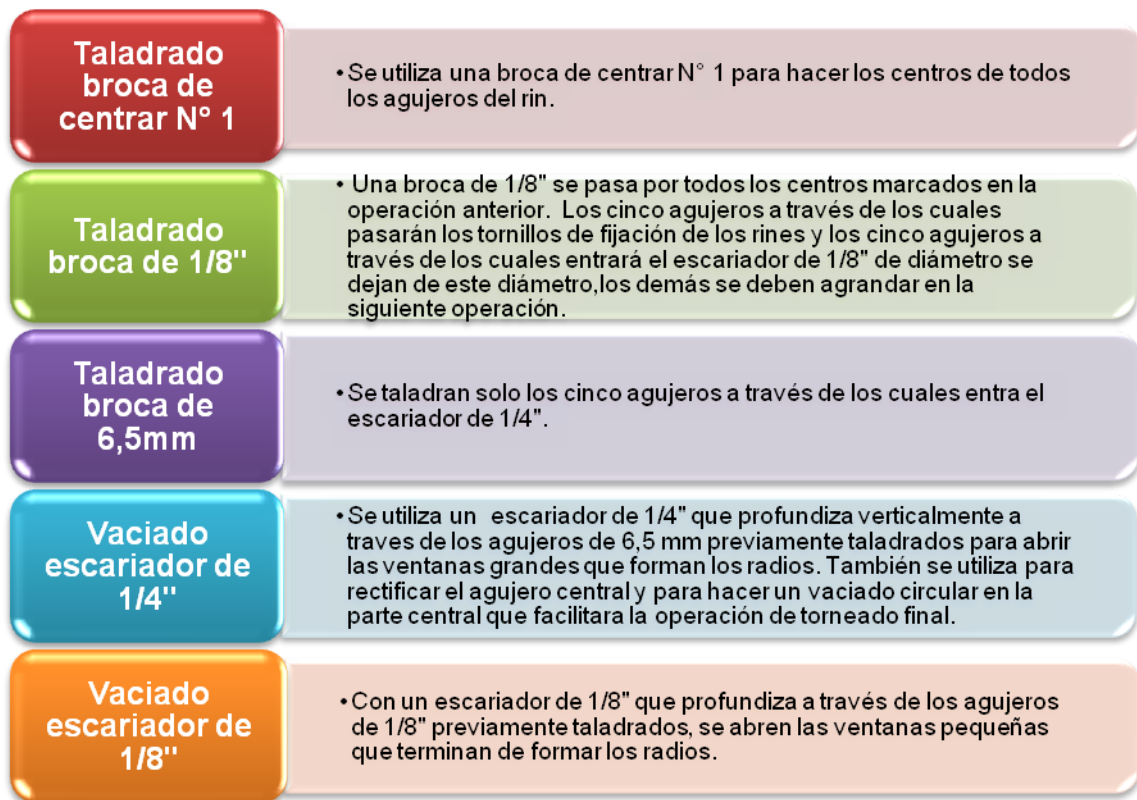


Figura 88. Operaciones de mecanizado de los rines.

D. Generación del código de mecanizado: nuevamente se utilizó *MasterCAM* para generar las trayectorias de la herramienta y los códigos de mecanizado. Este caso es más sencillo que el anterior pues se trata de mecanizar solo una pieza a la vez. Se dibujó un plano en *SolidWorks* en el que se detalló toda la geometría de lo que se deseaba mecanizar. Este plano se guardó en formato de *AutoCAD*, es decir, con extensión .dwg (o .dxf) y luego se importó desde *MasterCAM*.

Realmente dos programas de mecanizado fueron necesarios debido a que se quería que los rines de cada lado tuvieran los radios en espiral orientados de la misma forma. Sin embargo, *MasterCAM* permite crear geometrías simétricas a una geometría existente trasladando no solo tal geometría sino todas las operaciones ligadas a ella. Por lo tanto, al final si se tenían dos

archivos diferentes para el mecanizado de los rines pero solo se tuvo que seleccionar la geometría, las herramientas, los parámetros de corte y demás en uno solo.

La transmisión del programa desde el computador al autómata de la máquina se hizo, al igual que en el caso de las platinas de 1/4", utilizando el software CIMCO V5. Se utilizó la opción de enviar datos "On line", es decir, existe una conexión permanente entre el PC y la máquina y las líneas de programa se envían a medida que se van ejecutando.

D. Listado de operaciones: el listado de operaciones con las herramientas empleadas y sus parámetros de corte es mostrado en el Anexo G. Las velocidades de giro de husillo y velocidades de avance fueron calculadas en la sección anterior y se utilizaron los mismos valores allí calculados. La figura 89 muestra unas fotografías de una de las piezas después de las operaciones de taladrado (izquierda) y después de abrir las ventanas grandes y hacer el vaciado en la parte central (derecha).



Figura 89. Aspecto de la pieza después de los taladrados (izquierda) y después de abrir las ventanas grandes y hacer el vaciado en la parte central (derecha).

E. Simulación: la simulación del programa de mecanizado se hizo en *MasterCAM* y el resultado final puede apreciarse en la figura 90.

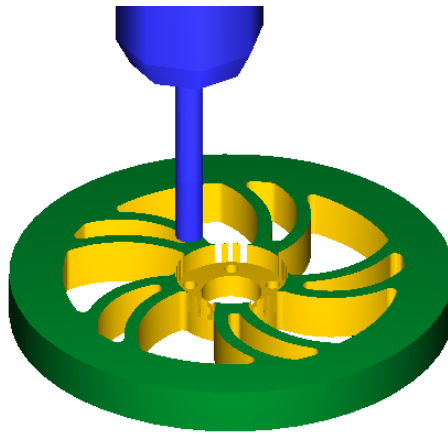


Figura 90. Resultado de la simulación del programa de mecanizado de los rines.

5.2.5 Torneado final de las piezas. Después de abrir las ventanas y definir la forma de los radios se torneó la parte externa del rin para eliminar el material remanente y hacer los canales que permiten el acople con las llantas. También se torneó la cara frontal (cara de los radios) para crear la conicidad definida en el diseño. La figura 91 muestra un esquema del montaje realizado y la figura 92 una imagen del montaje real.

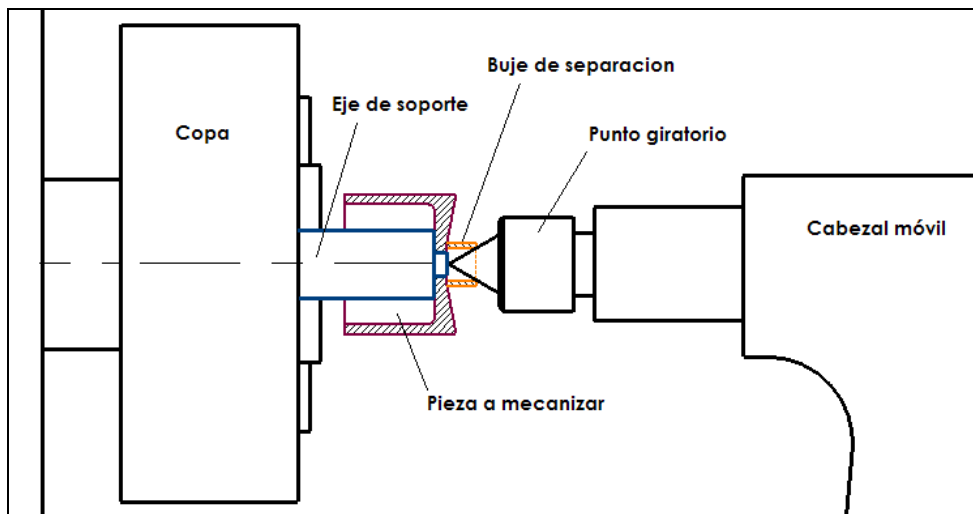


Figura 91. Montaje en torno convencional para mecanizado final de los rines.



Figura 92. Montaje de los rines en torno para su mecanizado final.

Eje de soporte: un eje de 2" de diámetro se montó en la copa del torno de tal forma que quedara un voladizo de aproximadamente 12 cm. Su extremo se cilindró a 1/2" de diámetro, una longitud de 5 mm para que coincidiera con el agujero central de los rines. Además, se refrentó la superficie plana que marca la transición del diámetro mayor al diámetro menor recién mecanizado. Sobre esa superficie plana asienta la cara plana del interior del rin. Se seleccionó un eje de gran diámetro para obtener una superficie plana de gran área y minimizar de esa forma la vibración de rin cuando se mecanice el extremo que está más cerca de la copa del torno.

Buje de separación: este buje permite mantener una fuerza horizontal que empuja al rin contra la cara plana del eje de soporte, ejercida por el punto giratorio cuando se saca el husillo del cabezal móvil. El buje asienta en la cara plana del vaciado mecanizado en la parte central de la pieza (**Figura 89** derecha). Tal fuerza horizontal, incrementa la fricción entre el rin y el eje de soporte impidiendo que se giren durante el mecanizado.

En este proceso de torneado se utilizaron dos buriles de acero rápido, uno para desbastar y otro para tronzar (hacer los canales). Las condiciones de corte se establecieron sobre la marcha según los resultados generales que

se iban obteniendo, tanto de los buriles, acabado superficial y ruido producido en el mecanizado. Por ejemplo, al mecanizar el rin en su parte posterior (cerca de la copa) se disminuyó la profundidad de corte y la velocidad de giro debido a que se producían vibraciones y ruido excesivo. La figura 93 muestra el aspecto final del rin después de la última operación de torneado.



Figura 93. Aspecto final del rin después de todas las operaciones de mecanizado.

5.3 FABRICACIÓN DE LOS ENGRANAJES DEL DIFERENCIAL

En total se requieren seis engranajes rectos modulo 1 de 14 dientes, cuatro de 33 mm de longitud y dos de 16mm. Todos los engranajes deben tener un agujero central de 1/4" de diámetro, por lo que se contemplaron dos opciones para su construcción:

1. Tallar todos los seis engranajes requeridos en un solo montaje en la fresadora y luego cortarlos y perforarlos.
2. Tallarlos uno por uno montando cada masa rectificadora a la longitud y al diámetro externo en un torneador.

Se decidió aplicar la segunda metodología debido a que la primera aunque requiere menos tiempo de mecanizado y de montaje, es más complicada pues se debe alinear muy bien el eje cuando se van a tallar los dientes en la fresadora, se corre el riesgo de pandear el eje mientras se tallan los mismos (dada su gran longitud) y la copa del torno debe dar muy buen centro para que el agujero quede centrado al hacer las perforaciones después de haber tallado los dientes. El proceso de construcción de finalmente aceptado se conforma de varias actividades que se resumen en el diagrama de la figura 94.

A continuación se muestran los cálculos necesarios en el mecanizado: el diámetro externo del engranaje y la altura del diente (h).

$$D_{ext} = M(Z + 2) = 1 \cdot (14 + 2) = 16mm \quad (\text{Ec. 33})$$

$$h = 2.25M = 2.25 \cdot 1 = 2.25mm = 0.0885 \text{ in} = 88.5 \text{ miles. [in]} \quad (\text{Ec. 34})$$

El bronce, igual que el aluminio, tiene la tendencia a quedarse pegado en la punta de la herramienta de corte, tanto en el torno como en la fresadora. Para evitar esto, se utilizó aceite de corte como fluido de corte. Los planos de estos elementos se pueden encontrar en Anexo H.

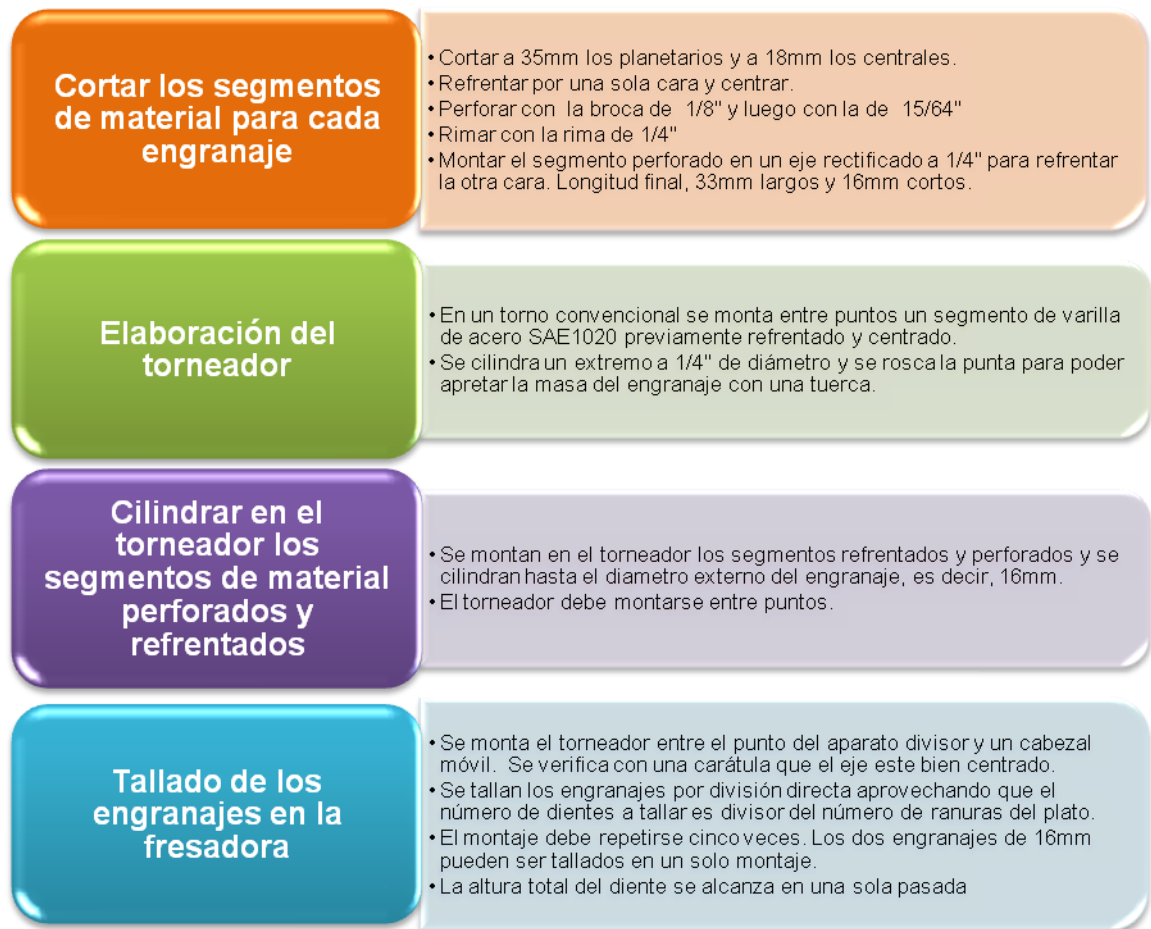


Figura 94. Proceso de construcción de los engranajes del diferencial.

5.4 MECANIZADO DE EJES, BUJES Y ACOPLER

Los ejes, bujes y acoples requeridos aparecen en la tabla 25.

5.4.1 Tolerancias y ajustes. Teniendo en cuenta que todos los elementos enumerados arriba serán mecanizados en tornos convencionales, las calidades de tolerancia o índices de tolerancia pueden ser la IT7 o IT8 si se hace un mecanizado cuidadoso de precisión o la IT9 a la IT11 para mecanizados normales. Dado que es más complicado dar una tolerancia determinada a un agujero que a un eje, en lo posible se utilizará el sistema de agujero único para establecer las tolerancias que proporcionen los ajustes

requeridos entre piezas. La tabla 26 reúne todas las tolerancias calculadas. Los planos de todas las piezas consideradas en esta sección se muestran en el Anexo H.

Tabla 25. Ejes, bujes y acoples requeridos.

Pieza	Cantidad	Material
Ejes engranajes planetarios diferencial	4	Aluminio
Ejes principales diferencial	2	Aluminio
Ejes de dirección	4	Aluminio
Bujes del diferencial	2	Bronce latón
Bujes pivote barras secundarias	2	Bronce latón
Bujes separadores soportes de dirección	4	Aluminio
Acoples ejes diferencial y barras de suspensión	2	Aluminio
Acoples motor ruedas	6	Aluminio

5.4.2 Condiciones de corte. Cuando se trabaja con máquinas de tipo convencional no es necesario ser tan rigurosos en el cálculo de las condiciones de corte, pues se establecen de manera empírica según la experiencia del operario, a medida que el proceso de fabricación es realizado. El operario se basa principalmente en el acabado superficial obtenido, el ruido producido en el mecanizado, el desgaste de la herramienta y las dimensiones de la pieza y de la herramienta.

Al diseñar un proceso de producción en serie utilizando máquinas de tipo convencional, se deben realizar algunos cálculos para optimizar el proceso de mecanizado. Tales cálculos buscan determinar la profundidad de corte óptima para minimizar el desgaste de la herramienta y el número de pasadas que deben hacerse para lograr las dimensiones y tolerancias deseadas. Sin embargo como lo que se está construyendo es un prototipo, tales cálculos no son necesarios.

De otra parte, el fluido de corte utilizado en el mecanizado de todas las piezas fue aceite de corte y las herramientas utilizadas fueron buriles y brocas de acero rápido.

Tabla 26. Ajustes y tolerancias de ejes, bujes y acoples.

Piezas a ajustar	Tipo de ajuste	Tolerancia agujero		Tolerancia eje	
Ejes planetarios diferencial y soporte diferencial	Forzado suave	6.35F8	6.35^{+35}_{+13}	6.35s8	6.35^{+45}_{+23}
Agujero engranajes diferencial y ejes diferencial	Giratorio	6.35H8	6.35^{+22}_0	6.35f8	6.35^{-13}_{-35}
Agujero soporte diferencial y buje diferencial	Forzado (Ajuste con prensa)	9.525H8	9.525^{+22}_0	9.525s8	9.525^{+45}_{+23}
Agujero rodamientos radiales y ejes	Forzado suave	8CL7C (SKF)	8^0_{-8}	8h8	8^0_{-22}
Agujero buje soporte y eje principal diferencial	Giratorio	6.5H8	6.5^{+22}_0	6.5f8	6.5^{-13}_{-35}
Agujero acople y eje principal diferencial	Forzado suave	7.95F8	7.95^{+35}_{+13}	7.95s8	7.95^{+45}_{+23}
Agujero barra principal y diámetro externo acople	Deslizante	14H7	14^{+18}_0	14h8	14^0_{-27}
Eje motor y agujero acoples ruedas (Eje único)	Deslizante	6H8	6^{+18}_0	6h9	6^0_{-30}
Agujero rines y diámetro externo acople ruedas	Deslizante	13.7H7	13.7^{+18}_0	13.7h8	13.7^0_{-27}
Agujero barra secundaria y diámetro externo buje	Forzado (Ajuste con prensa)	7.938H8	7.938^{+22}_0	7.938s8	7.938^{+45}_{+23}

5.5 FABRICACIÓN DEL CHASIS Y LAS PIEZAS DOBLADAS

Estas piezas fueron construidas aplicando diferentes procesos de manufactura descritos a continuación.

5.5.1 Chasis. Tal como se dijo en el capítulo anterior, el chasis se diseñó para ser construido a partir de tubos cuadrados de aluminio estructural de 1/2" soldados entre si. Algunos aspectos relevantes de su construcción se mencionan en los siguientes ítems:

- El proceso se realizó con soldadura oxiacetilénica pues fue la opción más económica que se encontró.
- Se utilizaron varillas de aluminio como metal de aporte.
- Los tubos se cortaron con segueta y se pulieron cuidadosamente sus extremos para garantizar la perpendicularidad de las uniones.
- Primero se unieron los tubos del rectángulo superior, colocándolos sobre una superficie estable, plana y a nivel, para que su superficie después de la soldadura quedara tan uniforme como fuera posible.
- Después, se soldaron los tubos verticales cortos que unen el rectángulo superior con los dos tubos principales.
- Independientemente se soldaron los tubos que conforman el nivel bajo del chasis.
- Finalmente se unieron los dos subconjuntos hasta ahora soldados.

5.5.2 Piezas dobladas en platina de un octavo. Se requiere doblar las cuatro piezas de aluminio que acoplan el motor de tracción de cada una de las ruedas de las esquinas con su respectivo eje de dirección y las dos piezas que unen las ruedas centrales a las barras secundarias de suspensión.

Cuando se dobla una platina de aluminio de este espesor a un ángulo de 90° , es probable que se “quiebre” por la parte externa del doblado. Esto sucede debido a que las fibras de la parte externa sufren una elongación que supera el límite de ruptura del material. La figura 95 muestra la falla de la que se está hablando. Para evitar que esto suceda se encontraron dos alternativas prácticas:

1. Calentar la platina hasta una determinada temperatura y enfriarla en agua. De esa forma el material se ablanda, puede fluir con mayor facilidad y

aumenta su límite de ruptura. En la práctica se sabe que la temperatura adecuada es alcanzada cuando el material pierde la capa de hollín que se deposita sobre su superficie cuando se pone en contacto con una llama pobre en oxígeno (llama amarilla).

2. Doblar la platina sin calentarla aumentando el radio del doblado. Al aumentar el radio de la parte interna del doblado también aumenta el de la parte externa y las fibras de metal tienen que estirarse menos, por lo tanto no se quiebran.

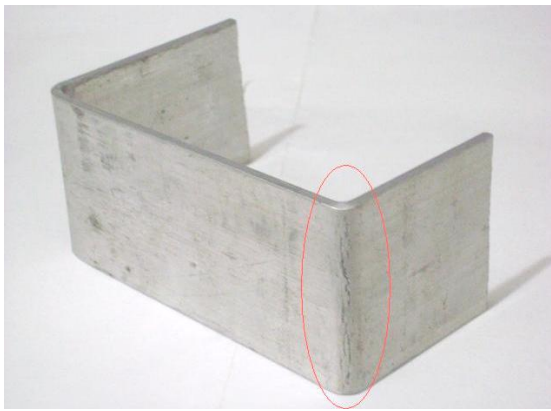


Figura 95. Rotura de la platina de aluminio de 1/8" al hacer un doblado a 90°.

Se descartó la primera opción porque no es deseable el ablandamiento del material, además puede sufrir aplastamiento al prensarla para el doblado.

Otro inconveniente es que no se consiguen dobladoras cuya "uña" o punta tenga un radio tan grande como el requerido, aproximadamente 5mm. Adicionalmente, la geometría de estas piezas no podía ser generada en las dobladoras hidráulicas de control numérico en las cuales la uña baja verticalmente. Por lo tanto, se tomó la decisión de doblar las platinas manualmente en una prensa mecánica de tornillo, utilizando un ángulo de acero redondeado para dar el radio del doblado requerido. La figura 96 izquierda muestra un esquema del dispositivo utilizado. Lo dispendioso era

mantener la perpendicularidad de la platina y ubicarla al mismo tiempo en la posición correcta para que las dimensiones después de los dobleces fueran las requeridas. Una vez prensada, los dobleces se lograban dando golpes contundentes a la platina con un mazo de golpe seco. La figura 96 derecha muestra una imagen de una de las platinas dobladas, antes de abrir los agujeros y redondear sus extremos.

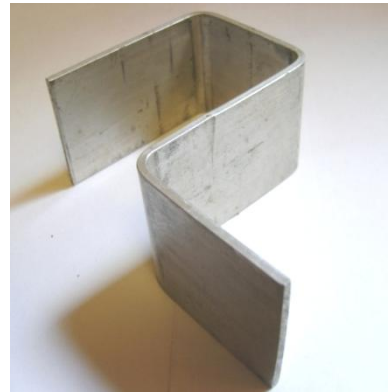
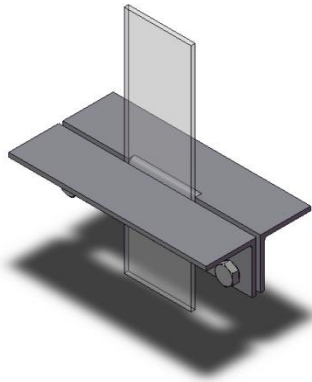


Figura 96. (Izquierda) Dispositivo utilizado para doblar las platinas de aluminio. (Derecha) Platina de aluminio de 1/8" doblada.

5.6 FABRICACIÓN DE LA CARCASA

Debido a que era necesario dar una protección de los componentes electrónicos montados sobre el cuerpo central del robot y para mejorar el aspecto estético del mismo, se fabricó una carcasa en fibra de vidrio. Las imágenes de las figuras 98 y 99 son evidencia de la realización de las diferentes etapas de dicho proceso. La figura 97 muestra un esquema de los pasos generales del proceso de construcción.



Figura 97. Proceso de fabricación de la carcasa en fibra de vidrio.



Figura 98. Etapas dos y tres del proceso de fabricación de la carcasa.



Figura 99. Aspecto final de la carcasa sobre la estructura del chasis.

5.7 MONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS

En la figura 100 se esquematiza el orden de ensamblaje que se siguió y que debe seguirse en el montaje de los componentes del sistema de locomoción del robot móvil autónomo de exploración. El ensamble se hizo por grupos de piezas o subconjuntos los cuales son detallados en tal esquema. Durante el montaje de los componentes fue necesario ajustar algunas piezas y darles las tolerancias adecuadas para poder acoplarlas adecuadamente. En el Anexo H se muestran los planos en explosión de los diferentes subconjuntos.

5.7.1 Subconjuntos tracción-dirección. La figura 101 muestra uno de los *cuatro subconjuntos de tracción y dirección*. Para mayor claridad con respecto al orden de ensamblaje de las piezas de este subconjunto remitirse a los planos de explosión que aparecen en el Anexo H.

5.7.2 Subconjuntos ruedas centrales. Las piezas que conforman los *dos subconjuntos* que contienen las ruedas centrales también deben ser pre-ensambladas. Uno de estos subconjuntos es mostrado en la figura 102. El plano en explosión de este sub-ensamblaje aparece en el Anexo H.

5.7.3 Subconjunto cuerpo central. La figura 103 muestra el resultado del ensamble del cuerpo central del robot o subconjunto central. En tal figura aparece el cuerpo central del robot ensamblado con todos sus componentes,

chasis, diferencial, tarjetas de control y potencia, y la parte inferior de la carcasa, listos para ser ensamblados con los subconjuntos de cada lado.

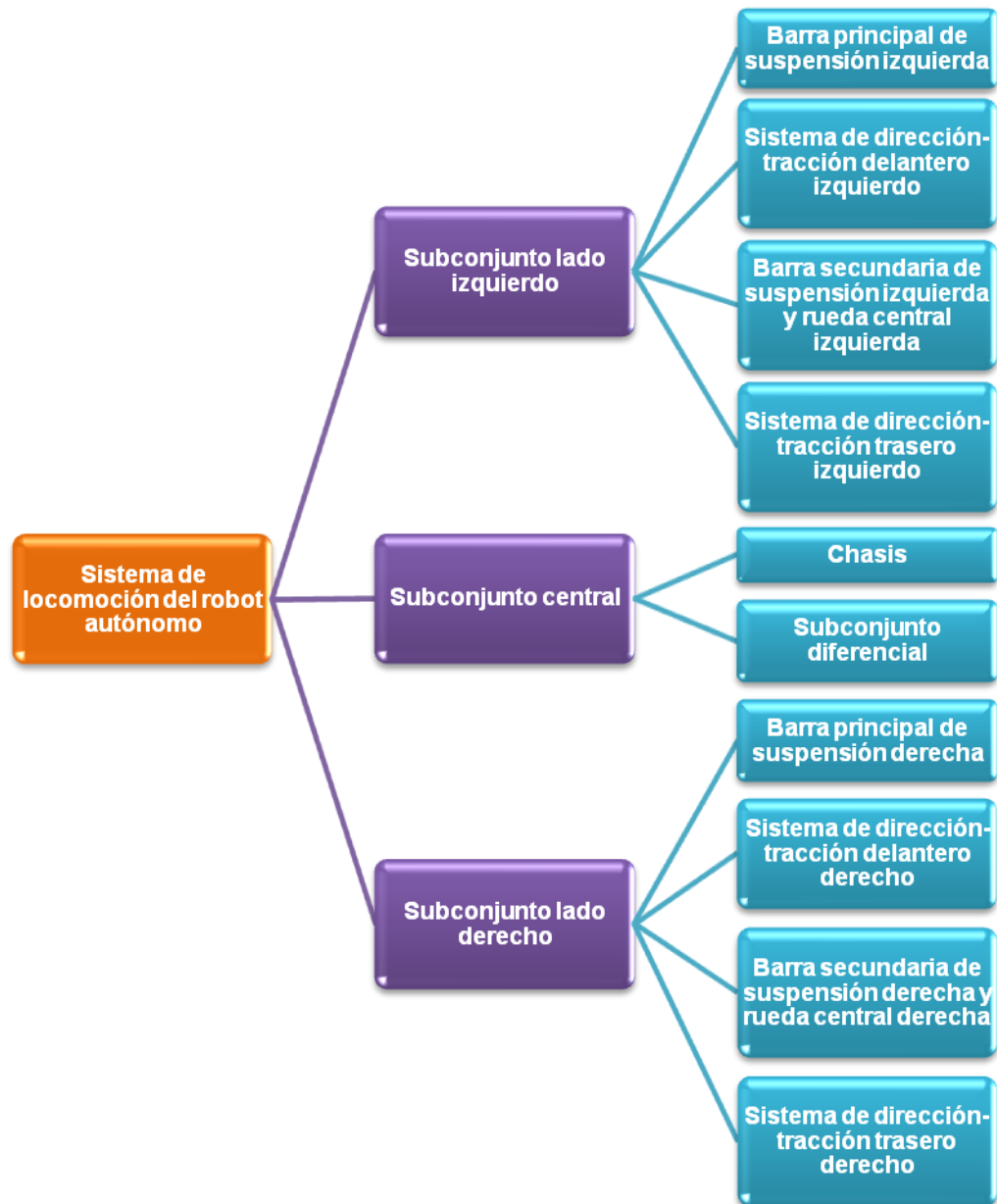


Figura 100. Orden de montaje de los componentes del sistema de locomoción.

5.7.4 Subconjunto lado izquierdo y lado derecho. En la figura 104 se puede apreciar el ensamble del subconjunto del lado izquierdo del robot que es similar al del lado derecho. Cada uno está conformado por tres subconjuntos y por las dos piezas que forman la barra principal de suspensión. Los cables de los tres motores, los dos servomotores, el encoder y el sensor de distancia ubicado en la parte frontal, deben colocarse en medio de las dos piezas que conforman la barra principal antes de asegurar el conjunto por medio de los tornillos, al igual que el resorte de torsión.

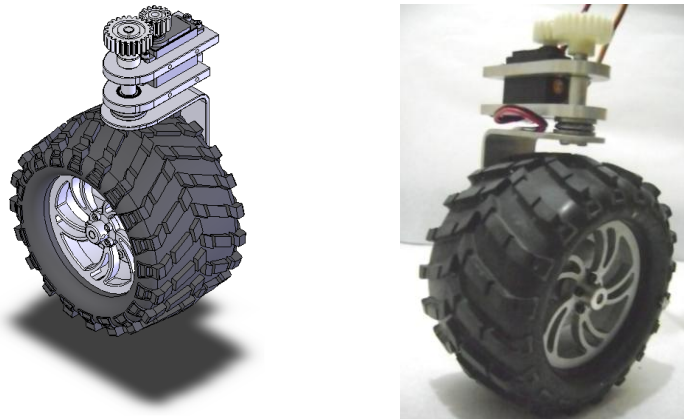


Figura 101. Sub-conjunto tracción dirección. En total son cuatro subconjuntos similares al mostrado.

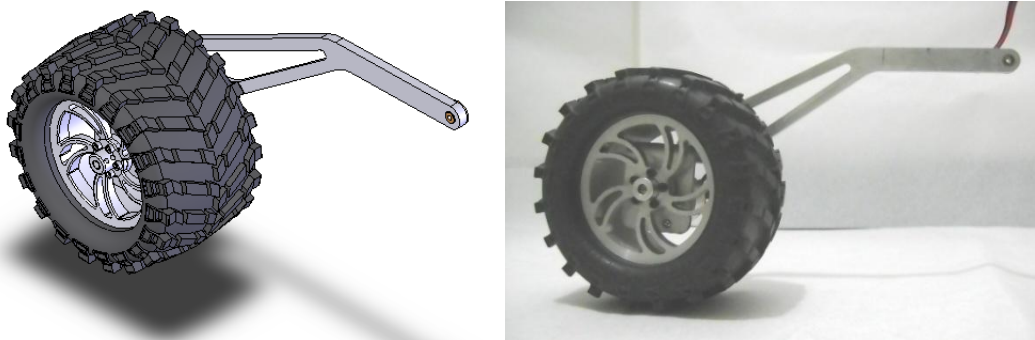


Figura 102. Subconjunto rueda central derecha.

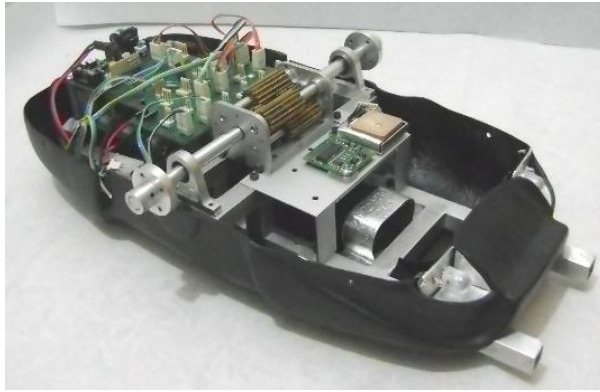


Figura 103. Ensamble estructura cuerpo central del robot

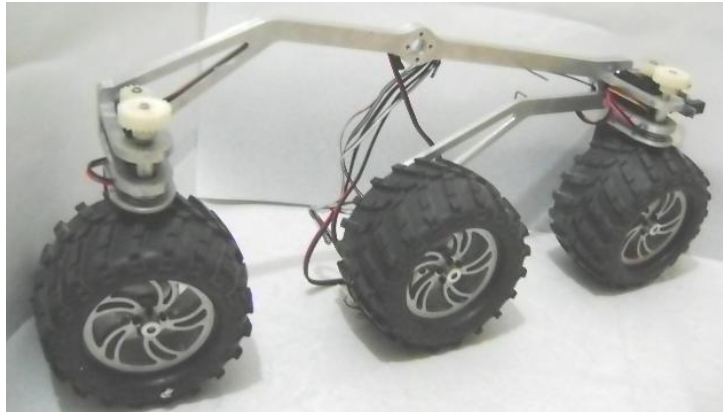


Figura 104. Ensamble subconjunto lado izquierdo del sistema de locomoción.

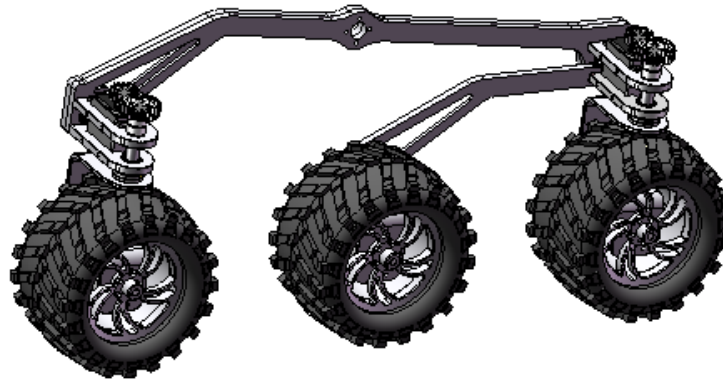


Figura 105. Diseño del ensamble del subconjunto lado derecho.

5.7.5 Montaje final. Después de tener listos los tres grandes subconjuntos, se puede hacer el ensamble de ellos. La figura 106 muestra un esquema de cómo debe ser realizado dicho ensamble y la figura 107 muestra una imagen del montaje final.

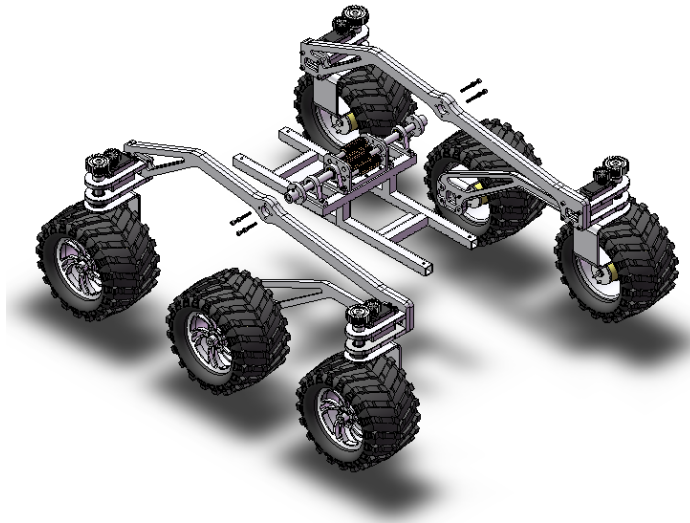


Figura 106. Ensamble de los tres subconjuntos principales que conforman el sistema de locomoción.



Figura 107. Ensamble final del sistema de locomoción y la carcasa.

6. DISEÑO DE SUBSISTEMAS Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE LA PLATAFORMA ELECTRÓNICA

El diseño de cada uno de los sistemas y componentes que integran este trabajo fue orientado a la obtención de un prototipo robusto tanto en su plataforma de locomoción, como en su plataforma de instrumentación y control, esto implica que al momento de su manipulación cada uno de sus componentes tenga la resistencia adecuada. De igual manera al plantearlo como un móvil de tipo explorador, los campos de acción serán exteriores, lo cual requiere un nivel de resistencia y flexibilidad frente al desplazamiento en terrenos irregulares, con desniveles y objetos de diversas composiciones, formas y tamaños.

En la investigación y desarrollo de algoritmos para robótica móvil se hace necesario implementar diversos dispositivos como herramientas para la realización de tareas específicas, de manera que la plataforma de locomoción debe tener el espacio suficiente para la instalación de estos, llámese sensores de distancia, de proximidad, de contacto, de orientación, de posicionamiento, de inclinación, de temperatura, entre otros. De igual manera será base para el montaje de manipuladores de bajo peso (menor a 1Kg), con el objetivo de cumplir tareas de mayor complejidad. Así mismo la plataforma electrónica debe tener la potencia y puertos para la implementación de un número limitado de estos dispositivos, de requerirse controlar una cantidad mayor se dispondrá de buses de comunicación para su expansión.

Los criterios empleados para el diseño electrónico serán:

- Se usaran filtros y acoples en las alimentaciones y señales de entrada en los componentes que lo requieran.

- La regulación de tensión integrada en la plataforma será a 5 V. con el fin de dar alimentación al controlador, servomotores y demás dispositivos que admitan este nivel de voltaje.
- El tamaño, eficiencia y consumo de potencia serán factores prioritarios en la selección de los dispositivos, de manera que se favorezca la autonomía energética del prototipo.

Criterios para el diseño de las tarjetas de circuito impreso:

- Los circuitos analógico y digital estarán separados.
- La tierra o nodo común estará alrededor de todo el circuito.
- El espaciamiento entre señales será mayor a 0,4 mm.
- Los ángulos de los caminos serán de 45° en lo posible.
- El ancho de los caminos será en lo posible proporcional a la corriente que soportarán.
- El ancho mínimo para los caminos de señal será de 0,3 mm.
- El ancho mínimo para los caminos de polarización será de 0,5 mm.

Las tarjetas de circuito impreso serán diseñadas con la herramienta informática en versión de licencia libre **Eagle Layout**. Es indispensable identificar cada uno de los sistemas y módulos que integrarán el prototipo, en la figura 108 se presenta un diagrama de bloques general. En dicha figura se puede distinguir la separación y organización de los sistemas o unidades de la siguiente manera:

	Sistema de Detección de Obstáculos.
	Sistema de Orientación y Posicionamiento.
	Sistema de Comunicación Inalámbrica.
	Sistema de Locomoción.
	Unidad Central de Procesamiento.
	Unidad de Abastecimiento.

El desarrollo de la electrónica relacionada con cada uno de los anteriores sistemas será realizado en el orden presentado de forma descendente.

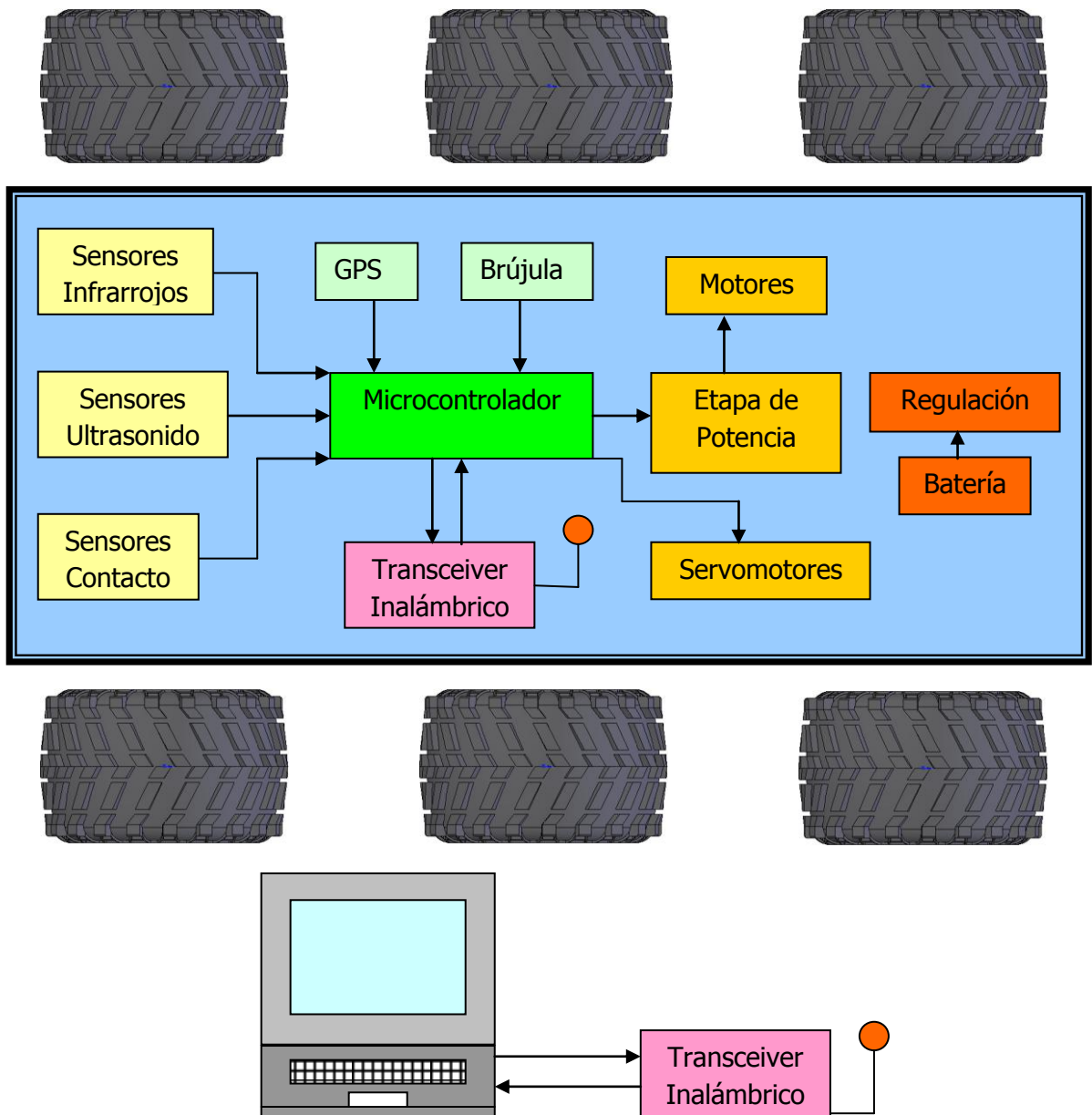


Figura 108. Esquema general de subsistemas.

6.1 SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

De la misma forma que los seres vivos requieren de sentidos para tener una percepción de su entorno, los robots autónomos poseen diversos tipos de sensores (ópticos, ultrasónicos, contacto, temperatura, visión, etc.) que les permiten obtener información sobre condiciones del medio. Con esta información se alimentan sistemas de control y algoritmos de navegación que les permiten definir rutas de desplazamiento, entre otras tareas programadas. Para la detección de obstáculos en la trayectoria de navegación se requiere básicamente de sensores de contacto, de presencia y de distancia. Para la detección de objetos son implementados comúnmente sensores ópticos y capacitivos, esta clase de sensores resultan inadecuados para la navegación del prototipo, debido a que registran la detección a unos cuantos cm, de manera que al realizarse un desplazamiento a velocidades de decenas de centímetros por segundo el riesgo de colisión es alto teniendo en cuenta los tiempos de reacción de la plataforma mecánica. Una alternativa mas eficiente es la implementación de sensores de medición de distancia, de esta forma es posible realizar una percepción de las condiciones del medio, identificando con anticipación posibles obstáculos. Por otra parte es bastante útil la implementación de sensores de contacto como último recurso ante alguna falla en la detección, que produzca una colisión y el móvil pueda tomar acciones frente a este evento.

En consecuencia se definió la implementación de sensores de distancias de dos tipos: ultrasónicos que permiten detecciones en distancias amplias e infrarrojos que presentan tiempos de respuesta reducidos.

6.1.1 Sensores de Infrarrojo. Para la selección de este dispositivo se tuvo en cuenta una alimentación de 5 V, un rango de medición de entre 5 y 100cms y salida analógica. En la tabla 27 se muestran características relevantes de diferentes referencias de esta clase de sensores.

Tabla 27. Tabla comparativa de diferentes referencias de sensores infrarrojos.

Característica	GP2D120	GP2D12	GP2Y0A02YK
Rango de medición [cm]	4 - 30	10 - 80	20 - 150
Resolución [mm]	1	1	1
Tiempo de respuesta [ms]	25	25	25
Tipo de Salida	Analógica	Analógica	Analógica
Potencia [V*mA]	5*35	5*40	5*40
Costo [pesos]	30.000	30.000	50.000

Teniendo en cuenta que un mayor alcance y rango de distancia permite realizar acciones anticipadas ante cambios en el medio que pongan al móvil en peligro de colisión o bloqueo a medida que se realiza la navegación. Se seleccionó el sensor GP2Y0A02YK de SHARP, teniendo la precaución de ubicarlo de manera tal que la zona muerta que presenta, quede dentro del área del móvil.



Figura 109. Sensor GP2Y0A02YK, Sharp⁴⁹.

El dispositivo seleccionado cuenta con un led infrarrojo que emite un haz modulado de luz puntual en dirección frontal que se refleja en el objeto cercano con un ángulo correspondiente a la distancia. Adyacente al led se

⁴⁹ www.shop.robotikhardware.de

encuentra un elemento fotosensible que recibe el haz reflejado concentrado en su superficie gracias a un lente convexo. De manera que para cada distancia el haz reflejado incide en diferentes zonas del área de la celda sensible, produciendo diferentes tensiones de salida. La figura 110 muestra los elementos principales de este sensor y su principio de funcionamiento.

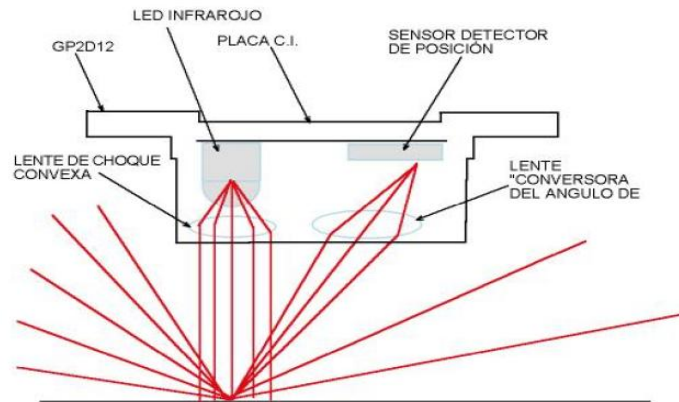


Figura 110. Elementos principales del sensor GP2Y0A02YK⁵⁰.

Las características eléctricas del dispositivo son:

Voltaje de operación típico (Vcc): 4,5 a 5,5 V

Rango Voltaje de salida: 0,3 a Vcc-2,3 V

Corriente máxima disipada: 50 mA

En la figura 111 se presenta el diagrama de bloques del sistema interno del sensor. Básicamente esta compuesto por un circuito que enciende el led infrarrojo en forma intermitente a la frecuencia generada por el circuito oscilador. Un circuito procesador lee las intensidades registradas por las celdas fotosensibles que coinciden con la frecuencia del oscilador.

⁵⁰ Hoja de datos SHARP GP2Y0A02YK

Finalmente una etapa de salida traduce las señales enviadas por el procesador a un nivel de continua acotado por la tensión de alimentación. La rapidez de respuesta es de 5 ms aproximadamente.

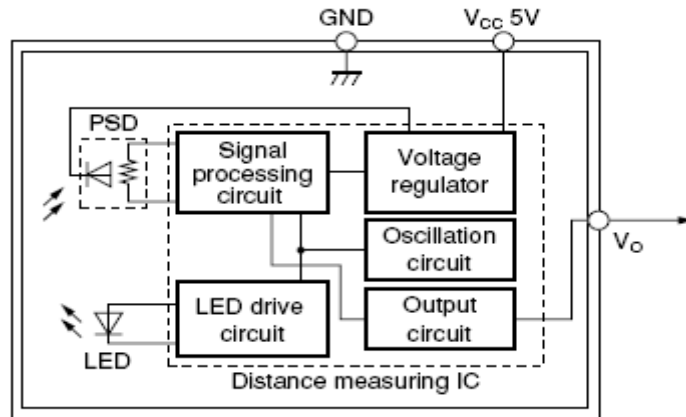


Figura 111. Diagrama de bloques del sistema interno del sensor GP2Y0A02YK⁵⁰.

Este sensor no registra una tensión de salida proporcional a la distancia, de manera que es necesario realizar una caracterización que permita su linealización de forma digital en la unidad de control, para obtener mediciones precisas. En la figura 112 se presenta la curva característica que ofrece el fabricante.

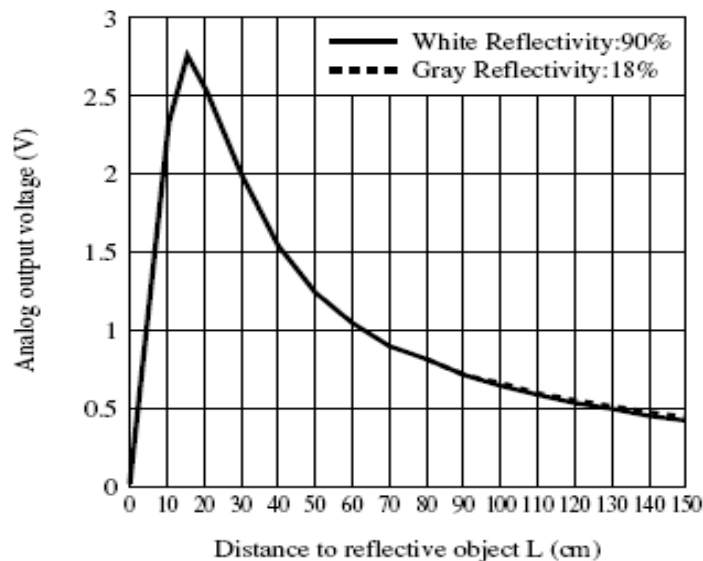


Figura 112. Curva Característica tensión-distancia del sensor GP2Y0A02YK.

6.1.2 Sensores de Ultrasonido. Para la selección de este dispositivo se tuvieron en cuenta discriminantes como: polarización a 5 V, tamaño menor a los 5x5x5 cm, una salida de tipo bus I2C de manera que se tenga la posibilidad de implementar un número amplio de sensores sin requerir un número proporcional de pines del dispositivo de procesamiento. Teniendo en cuenta que se requiere un rango de medida amplio, un consumo de potencia bajo, tamaño reducido y bajo costo, se realizó el análisis de los datos recopilados en la tabla 28 para concluir que el sensor más adecuado es el SRF02 de Devantech por tener el mayor rango de medida, menor tamaño y menor costo.

Tabla 28. Tabla comparativa de diferentes referencias de sensores de ultrasonido.

Características	SRF02	SRF08	MAXSONAR EZ1
Rango de medición [cm]	15-600	20-600	2-645
Resolución [mm]	8	8	20
Tiempo de respuesta [ms]	40	40	50
Salida	I2C,UART	I2C	Analógica,UART
Potencia [V*mA]	5x4	5x15	5x2
Tamaño [mm³]	24*20*17	43*20*15	20*20*17
Costo [USD]	23	62	70

Entre las características más destacadas del SRF02 se encuentra⁵¹ sin duda el hecho de utilizar un único transductor tanto para transmitir la ráfaga ultrasónica como para recibir el eco de la misma y poder así medir la distancia. Esta característica hace que la distancia mínima medida sea mayor que la de otros medidores del mercado que utilizan para ello dos transductores diferentes. El SRF02 puede medir en μ s, cm o pulgadas.

Este elemento permite comunicaciones serie e I2C, con un total de 16 dispositivos diferentes en ambos modos. Este dispositivo cuenta con un

⁵¹ INTPLUS. SRF02 SENSOR DE DISTANCIAS POR ULTRASONIDOS SIMPLE [En línea]. España. Disponibilidad en versión HTML en: <http://www.superrobotica.com/S320122.htm>

microcontrolador embebido el cual realiza el control de emisión de la onda ultrasónica a través del transductor y la recepción de los ecos, luego de esperar el tiempo de relajación necesario para evitar vibraciones inconvenientes para la medición. El microcontrolador realiza el cálculo de distancia basado en el tiempo de retorno de la onda, luego actuando como esclavo en el bus I2C permite su configuración y lectura de los registros de medida.



Figura 113. Sensor de ultrasonido SRF02⁵¹

Característica de emisión acústica: el SRF02 presenta una abertura de ráfaga ultrasónica como lo muestra la figura 114.

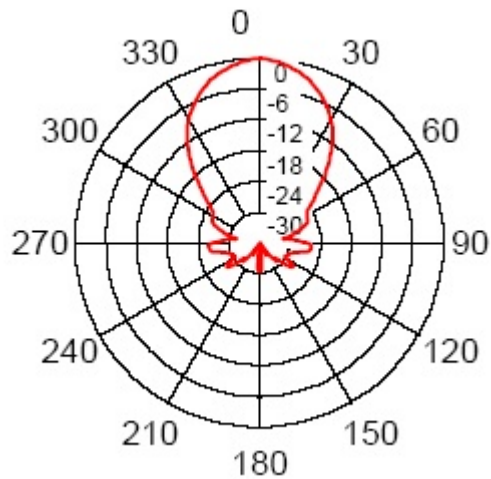


Figura 114. Característica de emisión acústica del SRF02⁵¹.

El SRF02 está compuesto por un juego de 6 registros enumerados en la tabla 29. El único registro que se puede escribir es el 0, ya que este es el que se utiliza para empezar un nuevo cálculo. Las medidas tardan unos 65 ms en llevarse a cabo y mientras se realizan no responden a ninguna otra operación que se realice mediante el bus I2C. Si se intenta leer este registro se obtiene la versión del firmware interno del sonar SRF02. Los registros 2 y 3 son el resultado de la última medida realizada en un valor de 16 bits medidos en pulgadas, cm o μ s según el comando que se haya utilizado. Un valor de 0 indica que el sensor no ha detectado ningún objeto. Los registros 4 y 5 son el resultado del valor aproximado de la distancia mínima que el sonar puede medir en un valor de 16 bits.

Tabla 29. Registros del SRF02.

Registros N°	Modo de lectura
0	Revisión de software interno
1	No usado (se lee 0x80)
2	Byte alto de la medida realizada
3	Byte bajo de la medida realizada
4	Byte alto del valor mínimo de distancia
5	Byte bajo del valor mínimo de distancia

En la tabla 30 se presentan los comandos que deben ser escritos en el registro 0 del dispositivo para indicarle las acciones requeridas.

Tabla 30. Comandos del SRF02.

Hexadecimal	Descripción
0x50	Iniciar una nueva medición real. Resultado en pulgadas
0x51	Iniciar una nueva medición real. Resultado en cm
0x52	Iniciar una nueva medición real. Resultado en μ s

0x56	Iniciar una nueva medida falsa. Resultado en pulgadas
0x57	Iniciar una nueva medida falsa. Resultado en cm
0x58	Iniciar una nueva medida falsa. Resultado en μ s
0x5C	Transmite una ráfaga de 8 ciclos de 40khz- no hace cálculos de medición
0x60	Fuerza un reinicio del sonar SRF02 realizando un ciclo de autoajuste.
0xA0	1º comando de la secuencia para cambiar la dirección I2C
0xA5	3º comando de la secuencia para cambiar la dirección I2C
0xAA	2º comando de la secuencia para cambiar la dirección I2C

Las mediciones falsas se realizan respecto a emisiones ultrasónicas externas (no generadas por el transductor propio del SRF02).

Las características eléctricas del sensor de ultrasonido SRF02 son:

Voltaje de operación: 4,5-5,5 V.

Consumo de corriente: 4 mA típicamente.

Frecuencia de trabajo: 40 kHz.

6.2 SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y POSICIONAMIENTO

Para el desarrollo del sistema de orientación y posicionamiento se analizaron las estrategias y dispositivos utilizados típicamente en robótica móvil (Ver capítulo 2).

Uno de los métodos de posicionamiento básico, consiste en colocar encoders en los ejes de las ruedas, con el inconveniente que acumulan su error lo cual provoca una incertidumbre creciente a medida que el móvil navega. Esto es crítico para el prototipo propuesto, ya que el móvil se desplazará sobre terrenos con características de fricción cambiantes en los cuales las ruedas pueden derrapar y producir errores de hasta decenas de cm que se

acumulan progresivamente. De igual manera los métodos inerciales se ven afectados por el problema de acumulación de errores e incertidumbres introducidos por la doble integración, su ventaja sobre los métodos odométricos, es que no introducen errores debidos a problemas de tracción.

La implementación de estaciones de transmisión y de balizas implica la instalación de dispositivos en la zona a explorarse limitándola e involucrando un trabajo de acondicionamiento local en cada zona en la que se desee realizar navegación.

La utilización de scanner láser y sonares permite realizar un mapa del entorno y de esta forma realizar un posicionamiento relativo a los elementos presentes. Estas técnicas son una herramienta más fuerte en la planeación de trayectorias y estrategias de evasión de obstáculos en vehículos de exploración, más que para fines de posicionamiento.

El sistema de posicionamiento global GPS permite obtener las coordenadas geográficas y altura sobre el nivel del mar de cualquier vehículo que lo posea. Una ventaja de este dispositivo es que no requiere acondicionamiento local, ya que se pretende darle uso en zonas relativamente extensas, se eligió el GPS como sistema de posicionamiento a implementarse en el prototipo. De otra parte es indispensable conocer la orientación del móvil de manera que se puedan planear rutas de navegación y para esto se complementará la acción del GPS con la implementación de una brújula electrónica. Escogiéndose estos dispositivos como elementos principales para el posicionamiento en la realización de tareas que involucran navegación autónoma.

La brújula permitirá obtener periódicamente la orientación del móvil respecto al eje de la tierra. A pesar de ser sensible ante fuentes de campo magnético, no resulta inadecuada su implementación en terrenos exteriores ya que estos

suelen estar libres de dicha contaminación. El modulo de GPS permitirá registrar las coordenadas de posición en grados respecto a latitud y longitud terrestre, además de la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra el móvil. Comercialmente para aplicaciones civiles está limitada la precisión del GPS de manera que se debe tener en cuenta una incertidumbre en los datos obtenidos, que puede estar entre los 3 y 15 m.

La implementación de cámaras y escáneres láser brindan la posibilidad de un reconocimiento más detallado de la zona explorada, pero por requerir de dispositivos de procesamiento y herramientas de software de un nivel superior al planteado para aplicaciones académicas de aprendizaje e involucrar costos elevados, no serán considerados en este prototipo el cual es una primera etapa de desarrollo a nivel de pregrado.

6.2.1 Brújula Electrónica. Para la selección de este dispositivo se tuvieron en cuenta algunos discriminantes: una alimentación de 5 V para su acople directo con la fuente de alimentación abordo, que el puerto de salida de datos fuese compatible con los protocolos y normas de comunicación presentes en módulos de dispositivos embebidos como microcontroladores, un tamaño menor a los 60x60x20 mm³ y que el precio de este no excediera el valor presentado en el presupuesto (500.000 pesos).

Haciendo una revisión de las hojas de características de las brújulas electrónicas, se realizó una tabla comparativa entre los parámetros más importantes teniendo en cuenta las características requeridas por el diseño propuesto.

Tabla 31. Tabla comparativa entre parámetros de brújulas electrónicas.

Características	CMPS03	HM55B	VECTOR2X
Resolución [°]	0,1	5.6	2
Potencia [VxmA]	5x15m	5x10m	5x5m
Salida	I2C,PWM	SPI	SPI
Tamaño [mm³]	34x31x5	10x12x10	54x40x14
Costo [USD]	52	29	50

A continuación se presentan los criterios de selección tomados, con ponderaciones estimadas (de 0 a 100 puntos) de acuerdo a los requerimientos del proyecto:

1. **Resolución (30 puntos):** Esta característica es fundamental para obtener una orientación de manera precisa como apoyo en la navegación.
2. **Consumo de Potencia (20 puntos):** Ya que su implementación será sobre un móvil autónomo es indispensable que tenga un consumo de potencia bajo para favorecer su tiempo de independencia sin reabastecimiento de energía.
3. **Tamaño (30 puntos):** Es indispensable un tamaño reducido debido a que este dispositivo se alojará en un prototipo de bajas dimensiones.
4. **Costo (20 puntos):** Teniendo en cuenta la reproducibilidad que se requiere en el prototipo es fundamental la utilización de elementos de bajo costo.

Dividiendo cada valor por el menor de su categoría y multiplicando por la ponderación asignada se obtienen los puntajes de la tabla 32.

Tabla 32. Tabla comparativa entre puntajes de brújulas electrónicas según los criterios de selección.

Criterios	CMPS03 [Puntos]	HM55B [Puntos]	VECTOR2X [Puntos]
Resolución	30	1680	600
Potencia	60	40	20
Tamaño	131	30	756
Costo	35	20	34
Total	256	1770	1410

El dispositivo mas apto según los criterios planteados, es la brújula electrónica CMPS03 marca Devantech por tener el menor puntaje, lo cual corresponde con las características mas apropiadas.

La brújula digital CMPS03 ofrece⁵² una precisión entre 3 y 4 grados y una resolución de décimas. Tiene dos interfases: mediante pulsos temporizados (PWM) y por medio de un bus I2C. La brújula tiene como base de funcionamiento los sensores de campo magnético KMZ51 de Philips posicionados a un ángulo de 90 grados uno respecto del otro, lo cual permite al microprocesador calcular la dirección de las componentes del campo magnético terrestre y generar como salida el ángulo de desviación respecto al norte.



Figura 115. Brújula CMPS03⁵²

⁵² INTPLUS. SENSOR BRUJULA DIGITAL CMPS03 [En línea]. España. Disponibilidad en versión HTML en: <http://www.superrobotica.com/S320160.htm>

La brújula tiene un total de 16 registros, distribuidos como muestra la tabla 33. El registro 1 es la dirección en grados convertida en un valor entre 0 y 255, que puede ser muy útil en ciertas aplicaciones donde no es necesaria una alta resolución y es conveniente manejar un solo byte. En los registros 2 y 3 se almacena la medida como una palabra de 16 bits, con valores entre 0 y 3599 equivalente al rango de 0 a 359,9°. El registro 15 se usa para calibrar la brújula mediante el bus I2C. El microcontrolador embebido realiza la lectura y calculo de ángulo de orientación cada 65 ms actualizando el registro de memoria leído a través del I2C.

Las características eléctricas de la brújula electrónica CMPS03:

Voltaje de operación: 4,5-5,5 V.

Consumo de corriente: 15 mA típicamente.

Tabla 33. Registros de lectura de la brújula electrónica CMPS03.

Registro	Función
0	Numero de Revisión del Software
1	Dirección. en 1 byte 0-255 para 0 - 360°
2,3	Dirección. en 2 bytes 0-3599 para 0 - 359,9°
4,5	Test interno señal diferencial sensor 1
6,7	Test interno señal diferencial sensor 2
8,9	Test interno, valor de calibración 1
10,11	Test interno, valor de calibración 2
12	Sin usar, devuelve 0
13	Sin usar, devuelve 0
14	Sin usar, devuelve 0
15	Comando de calibración, escribir 255 para calibrar

6.2.2 Sistema de posicionamiento global (GPS). Los sistemas de posicionamiento global comercialmente son presentados en tres tipos de dispositivos:

- Los de mano, con sistema de visualización integrada.
- Los dispositivos para conexión al PC que permiten visualización de mapas mediante la implementación de software
- Las tarjetas de desarrollo de propósito general.



Figura 116. GPS Garmin Etrex.



Figura 117. GPS BR305.



Figura 118. Modulo GPS ET-102.

Se eligió la implementación de una tarjeta de desarrollo, ya que esta permite tener un contacto más directo con el funcionamiento y características fundamentales de un receptor de GPS, además no se consideró necesario

tener un sistema de visualización integrado, ni un empaquetado para conexión al PC, debido a que el receptor se conectará a un dispositivo de control embebido que obtendrá las coordenadas de ubicación para alimentar el algoritmo de navegación programado.

Para la selección del dispositivo GPS se consideraron algunos discriminantes: una alimentación de 5 V ya que todo el sistema electrónico manejará este nivel de tensión, un puerto de salida de datos compatible con los protocolos y normas de comunicación presentes en módulos de dispositivos embebidos como microcontroladores y que su precio no debía exceder el valor presentado en el presupuesto (700.000 pesos). Por otra parte al tratarse de una implementación en un vehículo de baja escala (menor a los 60x40x40 cm³) es conveniente que el receptor posea una antena de tamaño reducido o integrada y que este libre de sujeciones magnéticas (medio de anclaje común para automóviles), ya que podría causar contaminación electromagnética a los diferentes sensores y dispositivos electrónicos. Haciendo una revisión de las hojas de características de diferentes receptores de GPS se realizó una tabla comparativa entre los parámetros básicos de la selección del GPS más adecuado para el diseño. Los resultados se presentan en la tabla 34.

Nota: Los costos presentados fueron estimados mediante una conversión con tasa de 2200 pesos por dólar, no incluyen gastos de importación y envío.

Tabla 34. Tabla comparativa entre parámetros de los GPS.

Característica/REF	Garmin 16L	DS-GPM	EM-406A
Precisión [m]	15	5	15
Precisión DGPS [m]	3	-	5
Frec. Actualización [Hz]	1	1	1
Consumo de P. [W]	0.32	0.34	0.35

Tamaño [mm]	91*91*42	51*89*30	30*30*10
No. De Canales	12	8	20
Costo [Pesos]	200.000	620.000	160.000

A continuación se presentan los criterios de selección tomados, con ponderaciones estimadas (de 0 a 100 puntos) de acuerdo a los requerimientos del proyecto:

1. **Precisión (40 puntos):** esta característica es fundamental para realizar eficientemente las tareas de exploración.
2. **Consumo de Potencia (25 puntos):** ya que su implementación será sobre un móvil autónomo es indispensable que tenga un consumo de potencia bajo para favorecer su tiempo de independencia sin reabastecimiento de energía.
3. **Tamaño (20 puntos):** es indispensable un tamaño reducido debido a que este dispositivo se alojara en un prototipo de dimensiones reducidas.
4. **Costo (15 puntos):** teniendo en cuenta la reproducibilidad que se requiere en el prototipo es fundamental la utilización de elementos de bajo costo.

Las demás características no fueron tenidas en cuenta ya que no representan diferencias importantes entre dispositivos.

Dividiendo cada valor por el mayor de su categoría y multiplicando por la ponderación asignada se obtienen los puntajes de la tabla 35.

Tabla 35. Puntajes de diferentes GPS según los criterios de selección.

Característica/REF	Garmin 16L	DS-GPM	EM-406A
Precisión(20)	60	20	60
Precisión DGPS(20)	20	33	33
Consumo de P. (25)	25	26	27
Tamaño (20)	772	302	20
Costo (15)	18	58	15
Total	896	440	155

El dispositivo mas apto según los criterios planteados, es la tarjeta de desarrollo GPS EM-406A de USGLOBSAT por tener el menor puntaje, lo cual corresponde con las mejores características.

Características Básicas:

1. Integrado GPS de alta eficiencia SiRF Star III.
2. Alta Sensibilidad (sensibilidad de rastreo: -159dBm)
3. Rápido TTFF (Tiempo para el primer arreglo) a baja señal
4. Soporta el protocolo de datos NMEA 0183
5. Antena integrada
6. Enganche fiable para baja señal
7. Tamaño compacto
8. Veinte canales de procesamiento paralelo
9. Enganche rápido con 100ms de tiempo de re adquisición
10. Configuración para zonas urbanas estrechas.
11. Soporta técnicas: WAAS / EGNOS

Especificaciones técnicas:

Tiempo de Adquisición

- Readquisición: 0.1 sec.
- Arranque en caliente: 8 sec.

- Arranque tibio: 38 sec.
- Arranque en frío: 42 sec.

Condiciones Dinámicas

- Altitud: 18,000 m máximo
- Velocidad: 515 m/s máximo
- Aceleración: menor a 4 g

Polarización

- Tensión de alimentación: 4,5 V a 6,5 V DC
- Consumo de Potencia: 60mA
- Tensión de respaldo: +2,5 V a +3,6 V
- Corriente de respaldo: 10uA típico

Protocolo

- Estandar: UART
- Nivel eléctrico: TTL
- Nivel del Voltaje de salida: 0V~2.85V
- Rata de Baudios: 4800 bps
- Mensajes de Salida: NMEA 0183 GGA, GSA, GSV,
- RMC (VTG, GLL opcional)

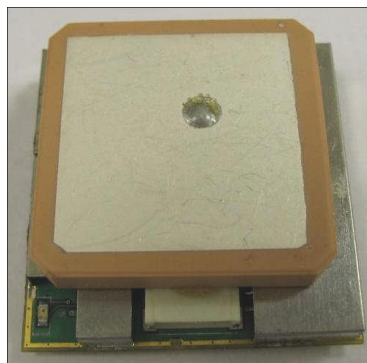


Figura 119. GPS EM-406⁵³

⁵³ hoja de datos USGLOBSAT

6.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Teniendo en cuenta la necesidad de transmitir los datos relacionados con las tareas realizadas por el prototipo para su supervisión, y por otra parte para realizar acciones de control ante eventos extraordinarios que requieran intervención, o para configurar parámetros dentro del algoritmo ejecutado por el móvil, se planteo la implementación del sistema de comunicación inalámbrica con las siguientes características:

- Comunicación serial asíncrona bidireccional.
- Interfaz RS232 o USB para conexión con el computador
- Ratas de transmisión superiores a 4800 baudios
- Alcance superior a 100 m
- Bajo consumo de potencia
- Posibilidad de implementar redes de comunicación asociando módulos similares.

Analizando las especificaciones más relevantes de transceivers inalámbricos, se realizó una tabla comparativa entre estos y los resultados se registraron en la tabla 36.

Tabla 36. Tabla comparativa entre parámetros de módulos inalámbricos.

Características/Ref	AC4490 AEROCOM	WI.232FHSS RADIOTRONIX	Xbee pro MAXSTREAM
Alcance (línea de vista)	1600 m	2000 m	1600 m
Consumo de Potencia (Transmisión) [V*mA]	3,3*80	3,3*200	3,3*200
Interfaz	UART(1200-115200 baud)	UART(1200-115200 baud)	UART(1200-115200 baud)
Tamaño[cmxcmxcm]	2,6x2,6x0,8	3x3x1	2,5x3,3x0,8
Modulación	FHSS (900MHz)	FHSS (900MHz)	DSSS IEEE 802.15.4 (2,4GHz)
Precio [USD]	64	38	32

A continuación se presentan los criterios de selección tomados, con ponderaciones estimadas (de 0 a 100 puntos) de acuerdo a los requerimientos del proyecto:

1. **Alcance (30 puntos):** ésta característica es fundamental para la supervisión de tareas de exploración en áreas amplias.
2. **Consumo de Potencia (15 puntos):** ya que su implementación será sobre un móvil autónomo es indispensable que tenga un consumo de potencia bajo para favorecer su tiempo de independencia sin reabastecimiento de energía.
3. **Tamaño (15 puntos):** es indispensable un tamaño reducido debido a que este dispositivo se alojara en un prototipo de dimensiones reducidas.
4. **Costo (40 puntos):** es importante implementar una solución inalámbrica de bajo costo, que aumente su reproducibilidad y promueva la configuración de redes de comunicación entre robots móviles y/o sistemas de sensado y control.

Teniendo en cuenta la ponderación asignada se obtuvieron los puntajes de la tabla 37.

Tabla 37. Puntajes de diferentes módulos inalámbricos según los criterios de selección.

Características/Ref	AC4490 AEROCOMM	WI.232FHSS RADIOTRONIX	Xbee pro MAXSTREAM
Alcance (línea vista)(30)	38	30	38
Consumo Pot. (15)	6	15	15
Tamaño(15)	9	23	20
Precio(40)	40	24	20
Total	92	84	83

De acuerdo a la tabla anterior el dispositivo mas indicado para el desarrollo del sistema de comunicación inalámbrica es el ***XBee pro*** de ***MAXSTREAM***, por tener el menor puntaje total lo cual corresponde con las mejores características según los criterios planteados. Este es un módulo zigbee que maneja el estándar de comunicación IEEE 802.15.4 a una frecuencia de 2,4GHz.



Figura 120. Modulo Xbee Pro⁵⁴.

Este módulo tiene la posibilidad de configurar direcciones de fuente y destino de las tramas de datos, de manera que puede operar en diferentes topologías de comunicación como: punto a punto, punto a multipunto entre otras. Además cuenta con puertos como: canales de conversión analógica, entradas/salidas digitales y salidas de PWM que pueden ser configurados, escritos y leídos remotamente.

⁵⁴ Hoja de datos MAXSTREAM Xbee

Tabla 38. Características del Xbee pro.

Rendimiento	Alcance en ambientes interiores/zonas urbanas	hasta 300' (100 m)
	Alcance de RF en Línea de Visión para ambientes exteriores	hasta 4000' (1200 m)
	Potencia de Salida en Transmisión	60 mW (18 dBm), 100 mW EIRP
	Régimen RF de datos	250,000 bps
	Sensibilidad del Receptor	-100 dBm (1% PER)
Requerimientos de Potencia	Suministro de Voltaje	2.8 – 3.4 V
	Corriente de Transmisión (típico)	270 mA @ 3.3 V
	Corriente de Recepción (típico)	55 mA @ 3.3 V
	Corriente Power-Down	< 10 μ A
Información General	Frecuencia	ISM 2.4 GHz
	Dimensiones	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
	Temperatura de Operación	-40 to 85° C (industrial)
	Opciones de Antena	Conector U.FL, Antena Chip, o alambre de antena
Trabajo en Red y Seguridad	Topologías permitidas en la Red	Punto a Punto, Punto a Multipunto, Igual a Igual y Mesh
	Número de Canales	12 Canales de Secuencia Directa (software seleccionable)
	Capas de Filtración de la Red	PAN ID & Direcciones 64-bit
Aprobaciones de la Agencia	FCC Parte 15.247	OUR-XBEEPRO
	Industry Canada (IC)	4214A-XBEEPRO
	Europe	ETSI

6.4 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

El desarrollo de este subsistema esta enfocado hacia el control de motores DC y servomotores, que se encargan de generar y orientar el desplazamiento del móvil.

6.4.1 Motores DC para la tracción. Teniendo en cuenta los requerimientos de velocidad y torque para la operación del móvil en las condiciones propuestas, se opto por la implementación de motores con caja reductora incluida, ya que la construcción de este tipo de mecanismos representa costos elevados. Los criterios de selección y las alternativas consideradas

son mostrados en la sección 4.5.3. Se escogió el motor GHM04 distribuido por Lynxmotion que presenta la curva característica mostrada en el anexo 5.

El diseño de la etapa de potencia se desprende de los requerimientos de alimentación de los motores escogidos, la metodología de control y la eficiencia del hardware empleado. Aprovechando la disponibilidad de módulos temporizadores con salidas de PWM presentes en diferentes gamas de microcontroladores se escogió esta metodología para realizar el control de velocidad de desplazamiento.

6.4.2 Etapa de Potencia. Para el control de los motores escogidos es indispensable el diseño e implementación de una interfaz que reciba las ordenes de control de la unidad de procesamiento y suministre la potencia indicada a los mismos. El dispositivo central que integra esta etapa es el puente H, que permite controlar la magnitud así como la dirección de la corriente que circula a través del motor. Mediante un terminal de control se administrara la señal de PWM variable y otro terminal digital indicara el sentido de giro, de la manera que muestra la figura 121.

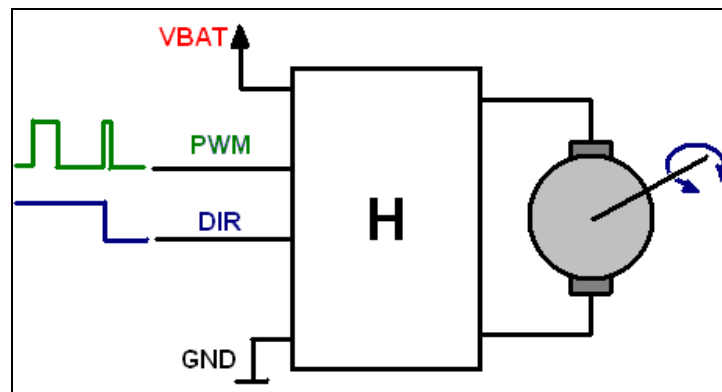


Figura 121. Esquema de la etapa de potencia

Para la selección del puente H se tuvo en cuenta la característica de corriente del motor seleccionado así como su tensión de operación. Según la

curva, la corriente estará en un rango de entre los 0,2 A (sin carga) y los 3 A (bloqueado), a un voltaje nominal de 7,2 V; siendo estos los parámetros determinantes en la selección. Luego del análisis de hojas de características de diferentes dispositivos, el mas apropiado fue el driver dual L6225 de STmicroelectronics, el cual presenta una arquitectura mixta debido a que posee transistores de potencia DMOS con circuitos CMOS y bipolares en la misma pastilla.

Características Básicas:

- Voltaje de operación entre 8 y 52 V.
- Corrientes de salida pico de 2,8 A (1,4 A continua).
- Resistencia de salida típica $R_{DS(ON)} = 0.73 \text{ ohm}$ a 25°C .
- Frecuencia de operación superior a los 100 kHz.
- Soporta operación en paralelo.
- Shutdown térmico.
- Diodos de descarga integrados.

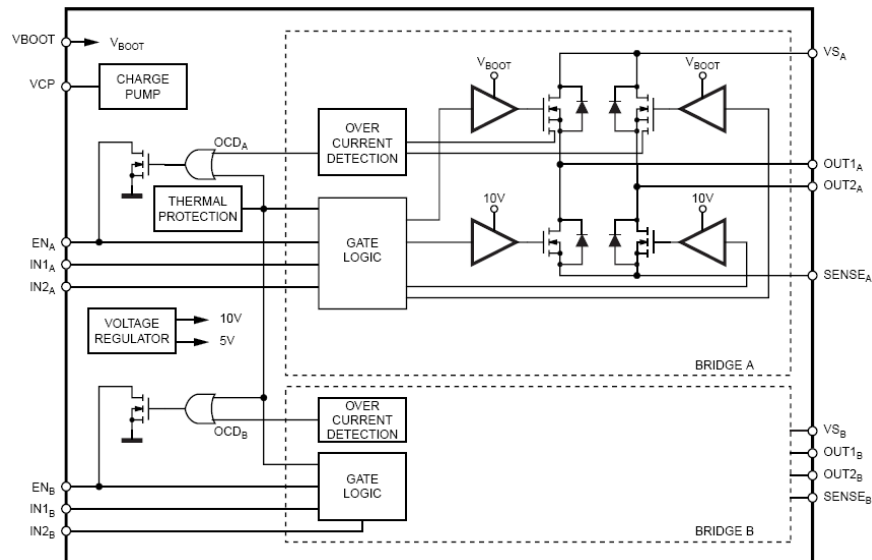


Figura 122. Esquema interno del puente H L6225⁵⁵.

⁵⁵ hoja de datos STMICROELECTRONICS L6225

6.4.3 Servomotores de dirección. Para mejorar la maniobrabilidad del prototipo y hacerlo más eficiente al momento de realizar giros, se planteó la implementación de servomotores para controlar de forma independiente el ángulo de orientación de las ruedas. El control de estos se realiza mediante señales PWM, las cuales serán generadas mediante los módulos temporizadores del controlador abordo. Características detalladas de la selección de los servomotores fueron presentadas en el capítulo 4.

6.5 UNIDAD DE CONTROL

Luego de realizar la selección de los elementos a emplearse para la locomoción, percepción, posicionamiento, orientación y comunicación del prototipo, se puede realizar la selección del dispositivo que interaccionará con cada uno de ellos para procesar su información en la realización de tareas programadas.

6.5.1 Criterios de selección del microcontrolador. Los requerimientos para la elección de la unidad de procesamiento son los siguientes:

- **Lenguaje de Programación:** teniendo en cuenta que el prototipo podrá ser empleado como herramienta de investigación es indispensable manejar un lenguaje de programación de alto nivel que permita una rápida implementación con conocimientos básicos de programación. Por otro lado es importante que el software necesario para la programación sea de acceso libre u ofrezca licencias estudiantiles.
- **Número de Entradas-Salidas:** debe abarcar los requerimientos de los dispositivos seleccionados, así como dejar la posibilidad de conexiones adicionales para futuras aplicaciones y su expansión. La cantidad mínima de puertos requeridos es descrita en la tabla 39.

Tabla 39. Puertos requeridos para el control del prototipo.

Tipo de puerto	Dispositivo	Cantidad
ADC	GP2Y0A02YK	6
PWM	Puente H L6225	2
	Servomotor	2
I2C	SRF02, CMPS03	1
SPI	Puerto de Expansión	1
UART	GPS	1
	Xbee Pro	1
I/O Digital	L6225	2
	Encoders	4
	Bumpers	4
	Luces	2
	LCD	6

- **Memoria:** La memoria de programa (ROM) debe poseer una capacidad superior a los 16Kbytes para aplicaciones que requieran códigos extensos o algoritmos avanzados. De otra parte la memoria de datos (RAM) podrá ser de 1Kbyte en adelante. Además es indispensable contar con una memoria tipo EEPROM para el almacenamiento de datos que podrán ser adquiridos y analizados luego de realizar cualquier tipo de prueba con el prototipo.
- **Frecuencia de operación:** debido a que los tiempos de repuesta del sistema de locomoción son amplios comparados con los de un sistema eléctrico, es posible realizar un control eficiente con frecuencias superiores a 1 MHz.
- **Interfase de programación:** Es indispensable que pueda ser reprogramado mediante el puerto serial o USB de cualquier computador.

6.5.2 Microcontroladores considerados. Los dispositivos escogidos para realizar la selección, basado en los requerimientos anteriores, están descritos en la tabla 40.

Tabla 40. Tabla comparativa entre diferentes microcontroladores.

Característica/Ref	ATMEL Atmega128	FREESCALE MC68HC08AZ60A	MICROCHIP PIC18F6722
Lenguaje de Programación y Software	C,C++ Software libre AVR studio	C,C++ Licencia estudiantil CodeWarrior	C 30 días de prueba CCS PIC
Memoria Flash	128K	62K	128K
Memoria RAM	4K	2K	3936
Memoria EEPROM	4K	1K	1K
Frecuencia de operación	16Mhz	32Mhz	40Mhz
Canales A/D	8 (10bits)	15 (8bits)	12 (10bits)
Timers	3 de 16 bits 2 de 8bits	2 de 16bits	3 de 16 bits 2 de 8bits
Puertos de comunicación	2 UART I2C SPI Expansión	UART SPI	2 UART I2C SPI
Entradas/salidas digitales	53	50	54
Empaquetado	64 TQFP	64 TQFP	64 TQFP
Precio(US\$)	15	16	15

Realizando el análisis de los datos presentes en la tabla 40, se descarta el microcontrolador de Freescale por tener un precio mayor, mientras ofrece una cantidad menor de puertos de comunicación, digitales y salidas de PWM, así como conversores AD de menor resolución. Comparando los dispositivos restantes de prestaciones muy similares, se decidió implementar el Atmega128 debido a que ofrece un software completamente libre y completo, además de tener la posibilidad de expandir su memoria RAM o numero de puertos mediante un bus de direccionamiento.

El Atmega128 es un microcontrolador de 8 bits, de arquitectura RISC, con 8x32 registros de trabajo de propósito general mas los registros de control de periféricos, ejecuta mas de 16 MIPS a 16 MHz, la FLASH soporta mas de 10.000 ciclos de lectura y escritura, es posible su reprogramación en forma serial mediante la implementación de un código interno de arranque (boot code), es direccionable más de 64 K de memoria externa adicional, interfase SPI para reprogramación embebida(in-system), oscilador RC interno, fuentes de interrupción externas e internas, diversos modos de operación para bajo consumo de potencia, entre otras características.

6.6 UNIDAD DE ABASTECIMIENTO

El diseño de esta unidad se desprende de los requerimientos de potencia de cada uno de los dispositivos y subsistemas a bordo del móvil. En consecuencia es indispensable realizar un estimativo de la potencia total requerida para la operación del prototipo durante una hora.

Tabla 41. Consumo de Potencia de dispositivos a bordo del móvil.

Dispositivo	Corriente Nominal [mA]	Tensión Nominal [V]	Cantidad	Potencia [mW]
GP2Y0A02YK	50	5	2	500
Puente H L6225	1000	9	3	27000
Servomotor	250	5	4	5000
CMPS03	15	5	1	75
SRF02	40	5	2	400
GPS	60	5	1	300
Xbee Pro	270	3.3	1	891
Encoders	15	5	2	150
LCD	50	5	1	250
Microcontrolador	19	5	1	95
TOTAL				34661

Debido a que la tensión de nominal de los motores es 7,2 V y considerando una caída de voltaje en el puente H de 1,4 V, se tiene, que la tensión mínima que debe proporcionar la batería es de 8,6 V. Teniendo en cuenta la estimación de potencia presentada en la tabla anterior, la corriente de descarga para una hora de operación sería 34661 mW dividido en la tensión requerida (8,6 V), tenemos que la batería debe ofrecer más de 4030 mAh. En consecuencia la batería con disponibilidad comercial que se ajusta a los requerimientos anteriores es el pack de 9,6 V a 4500 mAh de Níquel Metal Hidruro de Tenenergy, la cual no posee efecto memoria y soporta corrientes de descarga de hasta 40 A. Tiene unas dimensiones de 18x6x3 cm³. y un peso de 700 g aproximadamente.



Figura 123. Batería tipo pack Tenenergy⁵⁶.

Para la alimentación de los dispositivos de sensado y control se hace necesario implementar un regulador que tenga una tensión constante de 5V. Teniendo en cuenta que la eficiencia de dicho dispositivo es crucial para la autonomía energética del prototipo, se planteo la implementación de un regulador de tipo conmutado que brinde una eficiencia superior al 80% y corrientes de más de 2 A. Teniendo en cuenta que se alimentaran servomotores. En consecuencia se selecciono el PTH08088W de *Texas Instruments* por tener un tamaño reducido y sobrepasar los requerimientos mínimos.

⁵⁶ www.all-battery.com

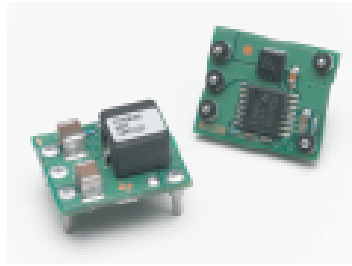


Figura 124. Regulador conmutado PTH08080W⁵⁷.

Especificaciones técnicas:

- Corriente de salida superior a 2,25 A.
- Rango de voltaje de entrada de 4,5 a 18 V
- Voltaje ajustable de salida de 0,9 a 5,5 V
- Eficiencia superior al 93%
- Protección de sobrecorriente
- Protección de sobretemperatura

⁵⁷ Hoja de datos *Texas Instruments*

7. IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE LA PLATAFORMA ELECTRÓNICA

Este capítulo trata lo relacionado con la verificación de las características dadas por el fabricante de cada uno de los dispositivos mediante la implementación, prueba y puesta a punto de los mismos, seleccionados para los diferentes sistemas del robot explorador.

7.1 SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

7.1.1 Sensores de Infrarrojo. Con el objetivo de visualizar las perturbaciones eléctricas presentes en la señal de salida del sensor GP2Y0A02YK que afecten la medición de distancia, se le aplicó un voltaje de polarización de 4,99 V y se conectó su pin de salida a un canal del osciloscopio. Posicionando un objeto plano a una distancia de 38 cm del sensor. Se obtuvo la característica que muestra la figura 125.

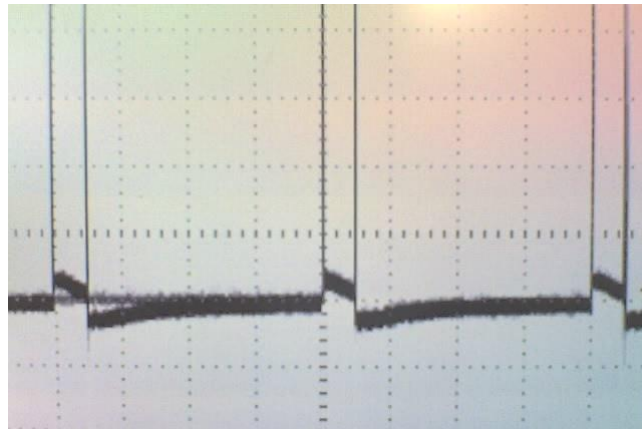


Figura 125. Tensión de salida sensor GP2Y0A02YK.

Configuración del Osciloscopio:

50 mV/div

500 μ s/div

Medidas registradas:

- Frecuencia= 995 Hz
- $V_{\min} = 1,57 \text{ V}$
- $V_{\max} = 1,84 \text{ V}$
- $V_{\text{medio}} = 1,59 \text{ V}$
- Ancho del Pulso = 120 μs

La señal de salida del sensor presenta un pulso periódico con una amplitud cercana a los 300 mV, lo cual introduce un error importante ya que el conversor Análogo-Digital podría tomar mediciones diferentes para distancias iguales y más crítico aún teniendo en cuenta que el rango de sensado es de 2,6 V aproximadamente. La primera alternativa implementada para atenuar la característica no deseada presente en la señal, fue utilizar un capacitor a tierra de manera que sirviera como drenaje de las componentes de alta frecuencia de la señal, la característica obtenida se muestra en al figura 126.

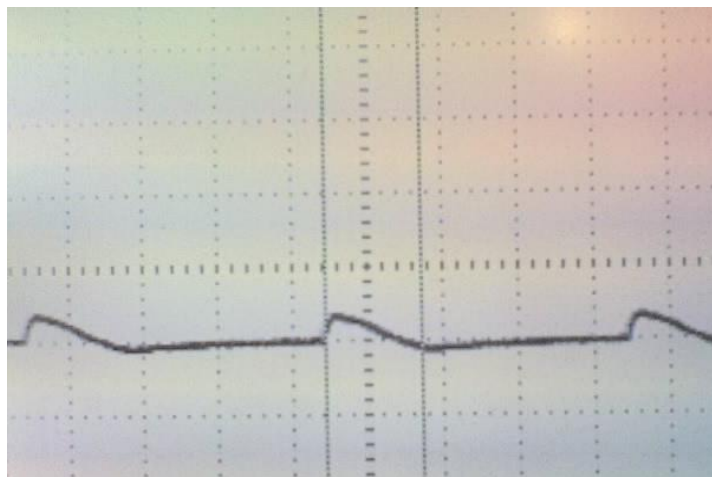


Figura 126. Tensión de salida filtrada sensor GP2Y0A02YK.

Configuración del Osciloscopio:

50 mV/div

500 us/div

Medidas registradas:

- Frecuencia = 995 Hz
- $V_{\min} = 1,58 \text{ V}$
- $V_{\max} = 1,61 \text{ V}$
- $V_{\text{medio}} = 1,59 \text{ V}$
- Ancho del Pulso = $320 \mu\text{s}$

$C=0.33 \mu\text{f}$

Se logró una atenuación significativa en la amplitud del pulso no deseado, reduciéndose a una décima parte, así como se aumento el ancho de este. Se realizo pruebas con diferentes valores de capacitancia obteniendo resultados muy similares a los mostrados.

Otra alternativa implementada consistió en filtrar la señal mediante una red RC con una frecuencia de corte de 100 Hz. En la figura 127 se muestra un esquema del montaje realizado. La característica de salida del filtro es mostrada en al figura 128.

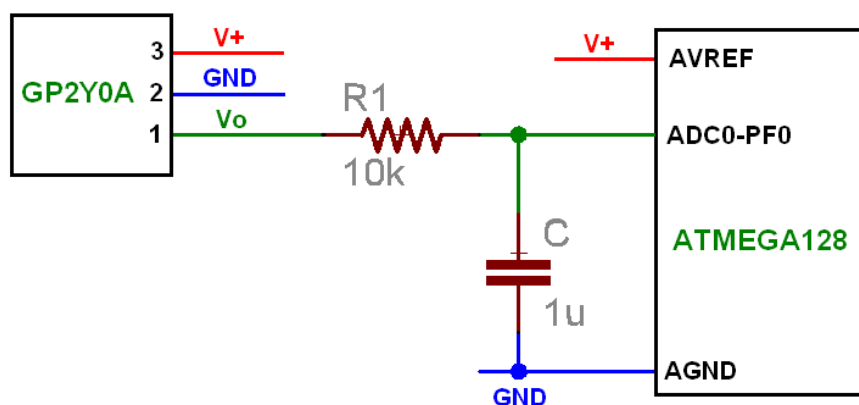


Figura 127. Esquema de filtro RC implementado.

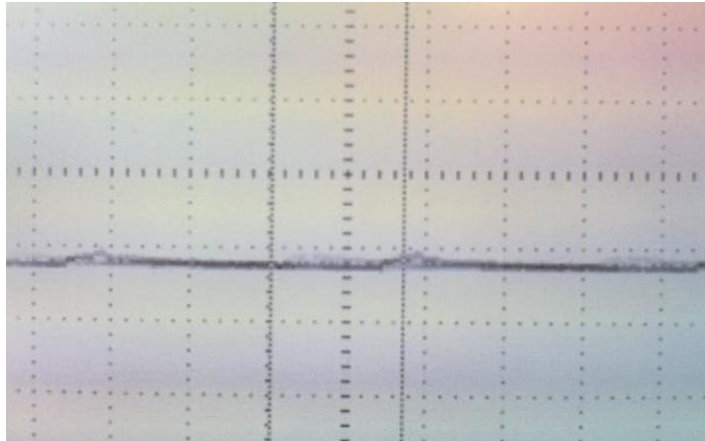


Figura 128. Esquema de filtro RC implementado.

Configuración del Osciloscopio:

50 mV/div

500 μ s/div

Medidas registradas:

- Frecuencia = 995 Hz
- $V_{min} = 1,57$ V
- $V_{max} = 1,58$ V
- $V_{medio} = 1,58$ V
- Ancho del Pulso = 320 μ s

Con este filtro se obtuvo una atenuación mayor, minimizando la señal alrededor de los 10mV, lo cual reflejado en un conversor AD de 10 bits a una tensión de referencia de 5V solo representa una variación por ruido de los dos bits menos significativos. Se realizaron pruebas con filtros de frecuencias de cortes menores, obteniendo resultados muy similares.

Para hacer más confiable la medición se efectuó una caracterización experimental para obtener la curva de tensión contra distancia de los

sensores ha implementarse tomando la señal ya filtrada. Esto en un rango de distancia entre los 13 y 150 cm y una tensión de polarización de 4,93V. En la tabla 42 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 42. Caracterización (Tensión-Distancia) del sensor GP2Y0A02YK.

Distancia [cm]	Voltaje de Salida Vo [V]
13	2,6
20	2,36
30	1,89
40	1,48
50	1,19
60	0,98
70	0,85
80	0,75
90	0,66
100	0,61
110	0,55
120	0,5
130	0,46
140	0,42
150	0,39

Se realizó la conversión de los voltajes obtenidos al valor de conversión digital con una resolución de 10 bits, mediante la siguiente ecuación:

$$V_d = (1024 * V_o) / 4,93 \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

V_d: Valor de conversión

V_o: Voltaje de salida

La tabla 43 muestra los datos de conversión digital obtenidos. Con el objetivo de tener una medición continua se hizo una aproximación por segmentos de recta, como lo muestra la figura 129.

Tabla 43. Caracterización (Conversión-Distancia) del sensor GP2Y0A02YK.

Distancia [cm]	Valor de conversión (10 bits)
13	540
20	490
30	393
40	307
50	247
60	204
70	177
80	156
90	137
100	127
110	114
120	104
130	96
140	87
150	81

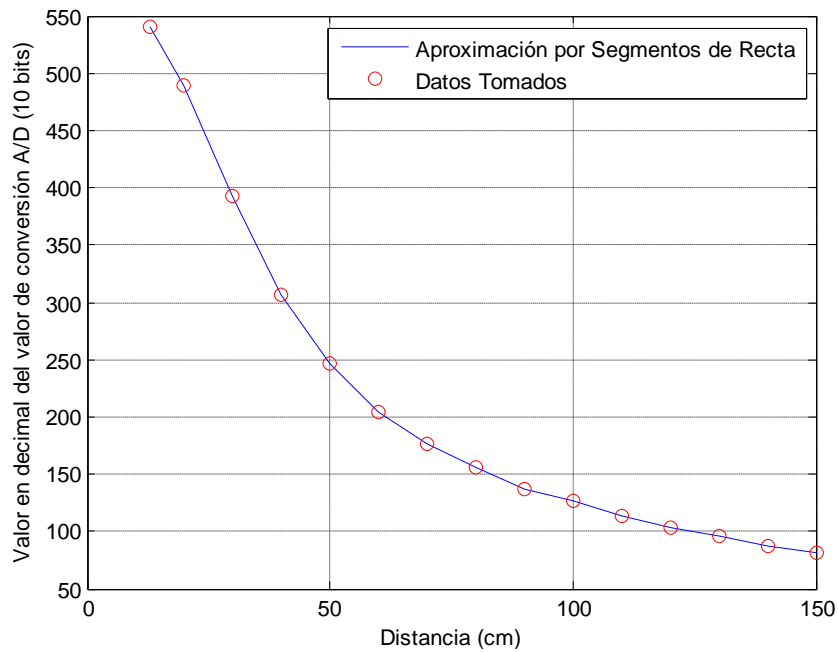


Figura 129. Aproximación mediante segmentos de recta de la característica del sensor.

La función de programación realizada devuelve la distancia existente a partir del valor de conversión del voltaje de salida del sensor, la característica de ésta, es mostrada en la figura 130.

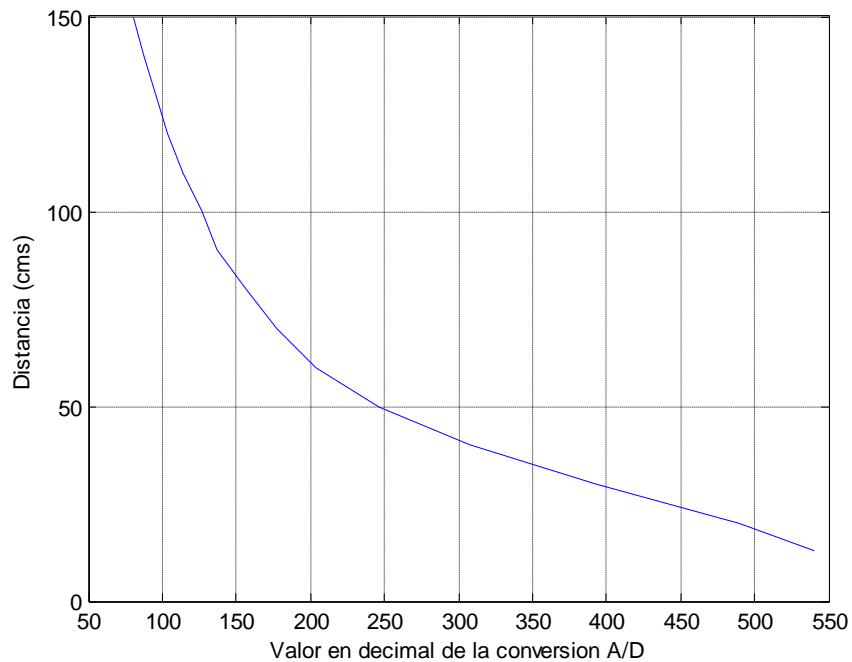


Figura 130. Característica de la función programada para la obtención de distancia.

Para el desarrollo de esta función se encontraron las ecuaciones correspondientes a cada segmento de recta así:

$$D_i(d) = D_{i_{\min}} + M_i * (d_{i_{\max}} - d) \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

$D_i(d)$: distancia en el intervalo i

$D_{i_{\min}}$: distancia mínima del intervalo i

M_i : pendiente del segmento de recta del intervalo i

$d_{i_{\max}}$: valor máximo de conversión del intervalo i

d: valor de conversión de la tensión del sensor incluida en el intervalo i

La pendiente se calculó por medio de la ecuación 37. Un ejemplo de cálculo es mostrado para el intervalo entre 30 y 40 cm.

$$M_i = (D_{i_{\max}} - D_{i_{\min}}) / (d_{i_{\max}} - d_{i_{\min}}) \quad (\text{Ec. 37})$$

$$M = (40-30) / (393 - 307) = 0.1163$$

$$D(d) = 30 + 0.1163*(393-d)$$

Debido a que las pendientes presentan valores con cifras decimales se hizo necesario definir que tipo de variable emplearía la función de programación, teniendo en cuenta que no se manejaran valores negativos y que se desea reducir la cantidad de memoria utilizada se decidió multiplicar todos los valores por 100 y definirlos como enteros sin signo de manera que se ocupen 16 bits por variable y no 32 como seria declarándolas como flotante. Esto da como resultado una aproximación con una resolución de medida en décimas de centímetro. Para obtener orientación sobre la utilización de la función programada consultar el manual de usuario (Anexo A).

7.1.2 Sensores de Ultrasonido. Para la adquisición del dato de medida del sensor SRF02 se escogió la implementación de un bus I2C que permita acoplar varios sensores de este tipo así como la brújula u otros dispositivos en aplicaciones posteriores. La Conexión eléctrica de prueba para el sensor es mostrada en la figura 131.

Proceso de medición de distancia: para realizar la medición de distancia mediante el bus I2C es necesario asignar una dirección de identificación a cada sensor que se desee montar sobre él. La dirección I2C del medidor

SRF02⁵⁸ por defecto es 0xE0 pero se puede elegir cualquiera de las otras 16 siguientes: 0xE0, 0xE2, 0xE4, 0xE6, 0xE8, 0xEA, 0xEC, 0xEE, 0xF0, 0xF2, 0xF4, 0xF6, 0xF8, 0xFA, 0xFC, 0xFE.

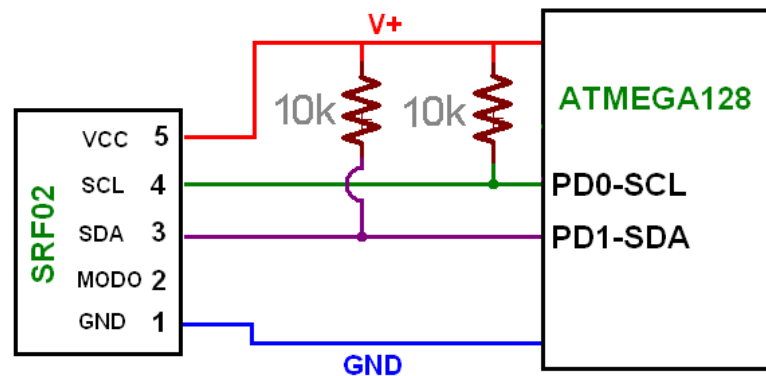


Figura 131. Conexión de bus I2C para sensor SRF02.

Para cambiar la dirección I2C del SRF02 es necesario que tenga conectado solamente uno de ellos en el bus. Se debe escribir la secuencia de los 3 comandos en el orden correcto seguido de la nueva dirección que se le quiere asignar. Por ejemplo para cambiar la dirección por defecto de (**0xE0**) a la (**0xF2**) se debe escribir la siguiente cadena de direcciones: **0x00, 0xA0** entonces **0x00, 0xAA** luego **0x00, 0xA5** y finalmente **0x00, 0xF2**.

Teniendo identificados cada uno de los sensores dentro del bus, se puede entablar comunicación con ellos; para esto se debe enviar la condición de Start que corresponde a llevar a cero los hilos del bus, luego de esto se envía la dirección correspondiente del sensor a utilizarse con el bit menos significativo en cero que corresponde a la escritura (ej: 0xE0, 0xF2), después de la respuesta del dispositivo mediante el bit de acuse (ACK), se procede al envío de la dirección que se desea escribir, en este caso es la del registro 0 (0x00), en la cual se escribe el comando correspondiente al tipo de medida

⁵⁸ INTPLUS. SRF02 SENSOR DE DISTANCIAS POR ULTRASONIDOS SIMPLE [En línea]. España. Disponibilidad en versión HTML en: <http://www.superrobotica.com/S320122.htm>

requerida ya sea en centímetros, pulgadas o micro segundos. Para realizar la medida en centímetros se envía por el bus la dirección 0x51, finalizando con la condición de stop que regresa los hilos del bus a uno, como lo muestra la figura 132.

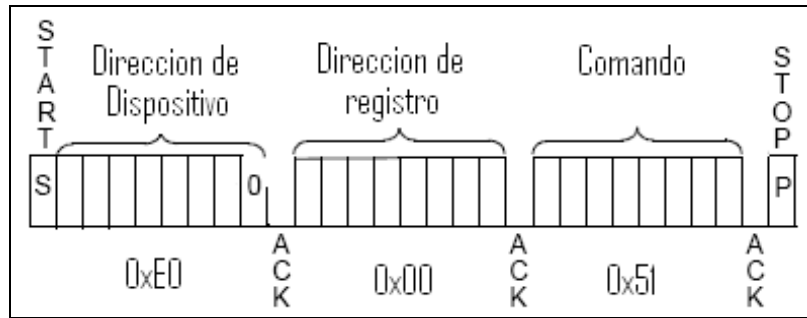


Figura 132. Trama de datos I2C para la escritura de registro.

Después de realizar el envío de la trama anterior se debe esperar mínimo 65ms para que el sensor realice el proceso de medición, entonces se puede iniciar la lectura del valor medido. El proceso de lectura es similar, se debe enviar la dirección de dispositivo luego el registro que se desea leer (0x02) y luego se repite la condición de Start seguida de la dirección de dispositivo ahora con uno en el ultimo bit lo que indica su lectura, a continuación se leen los dos bytes de medida primero el alto y luego el bajo, como se indica en la figura 133.

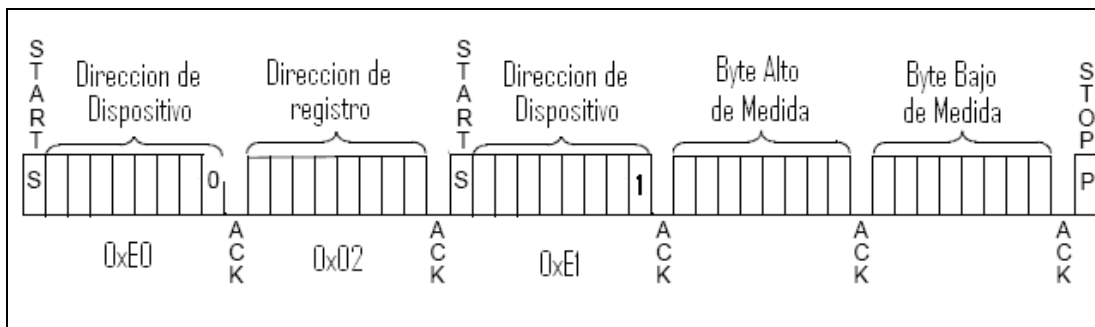


Figura 133. Trama de datos I2C para la lectura de la medida registrada.

Realizando comparaciones entre las medidas registradas por el sensor y una cinta métrica, se presentaron errores entre 1 y 6 cm. Las medidas mas precisas se presentan cuando el sensor apunta a una superficie plana perpendicular a el. Con objetos que posean salientes y vértices agudos los errores de medición se acentúan. Estas deficiencias son propias de los sensores de naturaleza ultrasónica. Para obtener orientación sobre la utilización de la función programada para la operación de este dispositivo, consultar el manual de usuario (Anexo A).

7.2 SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y POSICIONAMIENTO

7.2.1 Brújula electrónica. Para la adquisición del ángulo de orientación, la brújula seleccionada (CMPS03) fue acoplada al bus I2C de la misma forma que los sensores SRF02 ya implementados (figura 131).

Pines adicionales de este dispositivo, como el pin 7 utilizado para seleccionar entre 50 Hz (puesta a cero) o 60 Hz (puesta a uno por defecto mediante una resistencia de pull up interna) no fue conectado, esto para que realice una medición sincronizada a 60 Hz y evite desviaciones de la medida debidas al campo generado por la red eléctrica.

El pin 6 utilizado para calibrar el sensor magnético de forma manual, fue conectado a un pulsador (NA) a tierra, esto en la tarjeta de pruebas, por simplicidad en el diseño de la tarjeta final se elimino este y se realiza la calibración mediante el método I2C.

A. Proceso de Medición de ángulo: Para realizar la medición del ángulo con una resolución de 0,1 grados se deben leer los registros 2 y 3, para esto se ejecutan cada una de las etapas del protocolo I2C de la siguiente forma: enviar la condición de Start que corresponde a llevar a cero los hilos del bus,

luego de esto se envía la dirección correspondiente del dispositivo con el bit menos significativo en cero (0xC0), después de la respuesta del dispositivo mediante el bit de acuse, se procede al envío de la dirección que se desea leer, en este caso es la del registro 2 (0x02) en la cual se encuentra el byte alto de la medición de ángulo, inmediatamente después se realiza un nuevo Start seguido de la dirección de dispositivo ahora con el bit menos significativo en uno, el siguiente paso es leer el valor del registro direccionado (2) y enseguida el del siguiente registro(3) , finalizando con la condición de Stop que regresa los hilos del bus a uno, esta doble lectura completa la palabra de 16 bits que forma la medida de ángulo entre 0 y 3599, como lo muestra la figura 136.

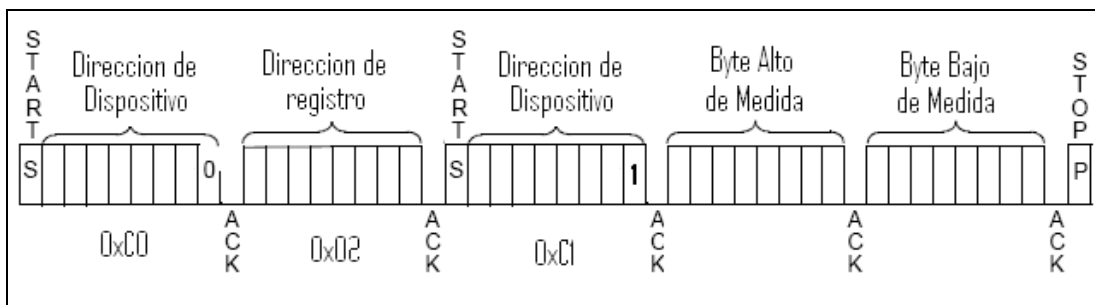


Figura 134. Secuencia de datos para la lectura del ángulo de la CMPS03.

B. Calibración: Antes de realizar la calibración⁵⁹, el modulo deberá mantenerse horizontal con los componentes hacia arriba. Es apropiado alejar el modulo de objetos metálicos y magnéticos, como imanes y altavoces. También es necesario conocer con precisión la dirección en la que se encuentran los cuatro puntos cardinales, por lo que es necesario comprobarlos con una brújula magnética convencional.

Para realizar la calibración del dispositivo mediante el bus I2C se debe escribir 255 en el registro 15 del modulo por cada uno de los cuatro puntos

⁵⁹ INTPLUS. SENSOR BRUJULA DIGITAL CMPS03 [En línea]. España. Disponibilidad en versión HTML en: <http://www.superrobotica.com/S320160.htm>

cardinales. El valor 255 es borrado internamente cada vez que se completa la calibración. Los puntos de calibración pueden hacerse en cualquier orden, pero siempre es necesario calibrar los 4 puntos. Por ejemplo:

1. Apunte el circuito hacia el Norte. Escriba 255 en el registro 15
2. Apunte el circuito hacia el Este. Escriba 255 en el registro 15
3. Apunte el circuito hacia el Sur. Escriba 255 en el registro 15
4. Apunte el circuito hacia el Oeste. Escriba 255 en el registro 15

Una vez realizada la calibración es posible observar la variación de décimas de grado al realizar giros leves. Se puede perturbar la medición acercando a la brújula objetos que generen campo magnético, esta desviación en la medida dependerá de la distancia a la que se acerque, así como la intensidad de campo que produzcan estos. Para obtener orientación sobre la utilización de la función programada para la implementación de este dispositivo consultar el manual de usuario (Anexo A).

7.2.2 Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El módulo de posicionamiento GPS EM-406A de USGLOBALSAT, posee un puerto de comunicación serial UART configurable a tasas de transmisión estándar, con niveles de tensión TTL. Este maneja el estándar de navegación NMEA-0183, transmitiendo una trama de comandos tipo ASCII en los cuales es posible extraer la información pertinente según la aplicación desarrollada. Los comandos NMEA de salida son mostrados en la Tabla 44.

Con el objetivo de identificar la forma de las tramas enviadas por el GPS, se conectó al Puerto serie del computador mediante un buffer MAX232 y se identificó cada uno de los comandos generados por el módulo.

Para realizar el posicionamiento de manera básica se deben conocer los valores de latitud y longitud, en consecuencia el comando NMEA

seleccionado para ser leído fue el RMC, por ser el más breve y contener la información requerida. Este comando contiene la siguiente trama de caracteres:

\$GPRMC,161229.487,A,3723.2475,N,12158.3416,W,0.13,309.62,120598,,*10

Tabla 44. Comandos de Salida del estándar NMEA.

GGA	Tiempo, Posición y datos compuestos.
GLL	Latitud, longitud, tiempo UTC* de posición compuesta y estado.
GSA	Modo de operación del receptor GPS , satélites usados para el calculo de posición y valores DOP
GSV	Numero de Satélites a la vista, números de identificación de los satélites, elevación, azimut y valores SNR
MSS	Relación señal-ruido, la potencia de la señal, la frecuencia y la velocidad de bits del receptor
RMC	Tiempo, Fecha, Posición, Curso y Velocidad
VTG	Curso y Velocidad relativa a la tierra
ZDA	PPS

El modulo de control abordo recibe la trama de forma serial mediante un puerto UART configurado a 4800 baud, con niveles de tensión TTL. La forma de conexión es mostrada en la figura 136.

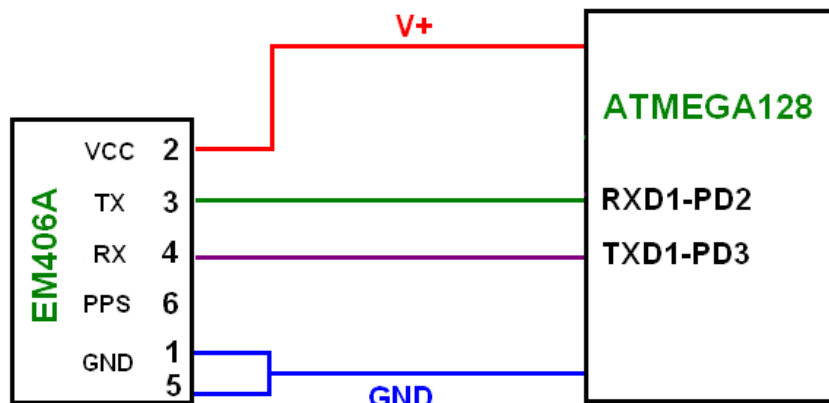


Figura 135. Conexión GPS EM406A a puerto UART1 de Atmega128.

* UTC es el Tiempo Universal Coordinado, zona horaria de referencia que se mide por los relojes atómicos.

El programa a bordo lee y almacena los caracteres correspondientes del comando GPRMC (**Tabla 45**). Luego de recibir una trama de datos valida como valor de latitud y longitud la almacena en un vector para convertirlos en ángulos almacenados en variables tipo flotante, en este formato es posible su utilización en funciones que realicen cálculos de posición. Con el objetivo de observar el comportamiento en la adquisición de datos de posición a partir de este dispositivo, se implemento una pantalla LCD alfanumérica de 2x16.

Tabla 45. Segmentación del comando GPRMC.

Nombre	Ejemplo	Unid.	Descripción
Identificador de mensaje	\$GPRMC		Encabezado RMC
Tiempo UTC	161229.487		hhmmss.sss
Estado	A		A=datos validos o V=datos inválidos
Latitud	3723.2475		ddmm.mmmm
Indicador N-S	N		N=norte, S=sur
Longitud	12158.3416		dddmm.mmmm
Indicador E-W	W		E=este, W=oeste
Velocidad sobre la tierra	0.13	nudos	
Curso sobre la tierra	309.62	grados	
Fecha	120598		ddmmaa
Variación Magnética		grados	
Checksum	*10		
<CR><LF>			Fin del mensaje

El receptor GPS tarda un promedio de 4 a 8 minutos en iniciar el envío de datos de posición validos en un ambiente exterior, los siguientes 10 minutos presenta variación en los datos de longitud y latitud, sin que se realice movimiento alguno del dispositivo. Los 10 a 15 metros de error descritos por el fabricante, se confirman transformando la variación en grados de latitud y longitud en metros, mediante el radio aproximado de la tierra. Según la observación anterior se hace poco eficiente la navegación en espacios reducidos (menores a 100 m²). Para obtener información acerca del proceso de adquisición de posición mediante GPS consultar el capítulo 2, el manual de usuario (Anexo A) y el capítulo 8 de pruebas.

7.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

El dispositivo principal de este sistema es el transceiver **Xbee pro** de maxstream, el cual básicamente, genera un lazo de comunicación serial codificando de forma digital a partir de las tramas de datos recibidos. Según la configuración implementada puede direccionar los paquetes de datos a diversos dispositivos, así como recibir de varias fuentes y hacer coordinación de redes de sensores en aplicaciones más complejas.

El objetivo principal de esta implementación es recolectar y centralizar información de la percepción del entorno explorado y del estado operativo del móvil, para ser supervisada de forma remota. A través de este sistema también se definen puntos de interés y rutas de navegación donde el robot debe posicionarse ejecutando estrategias de evasión programadas. Las prestaciones de este sistema permiten el desarrollo de aplicaciones posteriores donde: se plantee la comunicación entre diferentes robots de este tipo para labores de exploración o reconocimiento cooperativo y se controlen manipuladores o actuadores a bordo de forma remota. En la figura 137 se presenta un esquema del enlace inalámbrico propuesto.

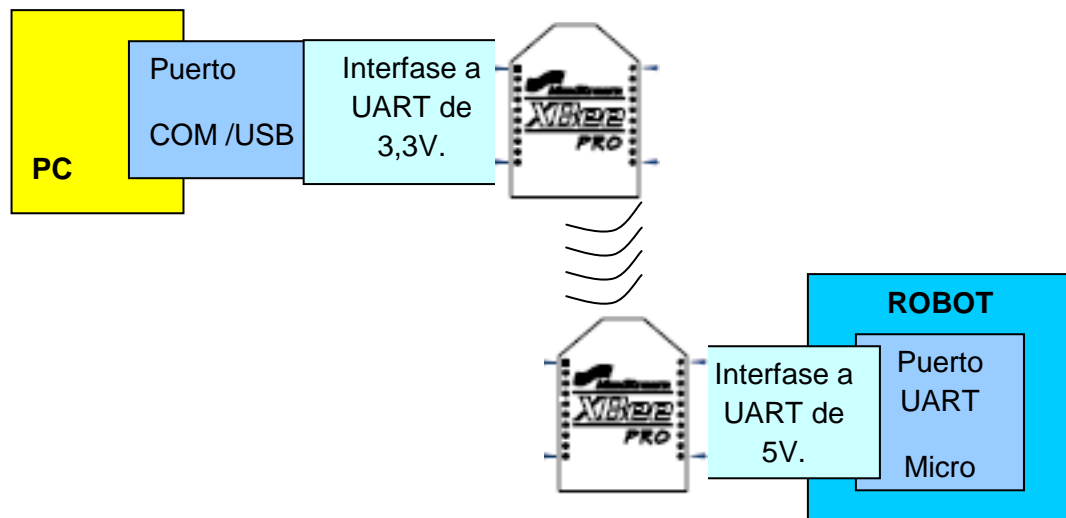


Figura 136. Esquema de enlace inalámbrico.

Para la etapa preliminar de pruebas se elaboraron dos interfases, la primera como inversor de lógica y acondicionador de niveles de tensión para el puerto RS232 y la segunda como buffer entre los puertos de entrada/salida del microcontrolador y el modulo inalámbrico que manejan niveles de tensión de 5V y 3,3V respectivamente. En la figura 137 se presenta el hardware de prueba.

La interfaz de prueba a través de RS232 esta provista de una etapa de protección ante voltajes de alimentación inversos (puente de diodos), regulación a 5V y a 3,3V, un buffer MAX232 para la inversión de tensiones en los hilos de transmisión y recepción de RS232 a UART de 5V y un buffer SN7417 acompañado de resistencias de pull up para la conversión de las señales de comunicación serial de 3,3 V a 5 V y viceversa. La interfaz a bordo del móvil toma la alimentación de 5V de la tarjeta de control y la regula a 3,3V para suministrar la potencia requerida por el transceiver, de igual forma esta interfaz posee un buffer SN7417 para realizar el cambio de niveles de las señales de comunicación.

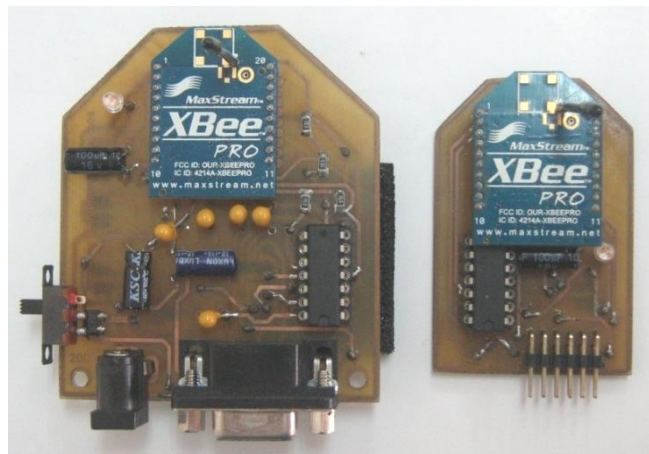


Figura 137. Hardware de prueba de enlace inalámbrico.

Como primer ensayo se realizó la comunicación serial de forma inalámbrica con una rata de 9600 baudios, transmitiendo caracteres ASCII guardados en

la memoria del microcontrolador. Luego se utilizó para monitorear de forma remota la lectura de distancias de sensores de infrarrojo y ultrasonido instalados en un móvil de prueba, ejecutando rutinas básicas de evasión en modo autónomo y respondiendo a comandos de desplazamiento en modo manual a través de teclado. Los valores adquiridos de los diferentes sensores, se codificaban en ASCII para ser enviados y visualizados en el Hyper-terminal de Windows.

El segundo prototipo de hardware contó con un interfaz USB basada en el circuito integrado TUSB3410 de *Texas Instruments*, implementado siguiendo como guía el esquemático presentado en la nota de aplicación SLAA276 de Texas instruments (pag.20). En el módulo a bordo se utilizó un buffer de conversión de niveles más simple, como lo es el TBX0104 de *texas instruments*. Lo cual permite reducir tamaño al implementar dispositivos de montaje superficial, así como un consumo de potencia reducido que es abastecido directamente del puerto USB del computador. Adicionalmente se empleo un conector tipo ps2 para tener acceso a 4 puertos de conversión analógica del Xbee pro, con el objetivo de realizar el control de actuadores a bordo del móvil de forma remota mediante elementos de manipulación como joysticks. En la figura 138 se muestra el hardware prototipo con interfase USB.



Figura 138. Segundo prototipo de Hardware para enlace inalámbrico

7.4 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

7.4.1 Etapa de potencia. Se implementó un driver L6225 por cada par de motores, conectando las señales de control de cada lado del móvil a puntos comunes se obtuvo cuatro mandos de control: dos para los motores del lado derecho y dos para el izquierdo, además de esto se dispuso una señal de habilitación general de los drivers que permite inhabilitar el movimiento del vehículo en situaciones que lo requieren, como lo es el momento de la programación del controlador. De esta forma la unidad de control puede operar con una plataforma de 2 ,4 o 6 ruedas. La aplicación del driver se realizó de acuerdo a las instrucciones de su hoja de datos teniendo en cuenta los filtros requeridos y el circuito de elevación de carga. En la figura 139 se muestra el circuito de aplicación implementado.

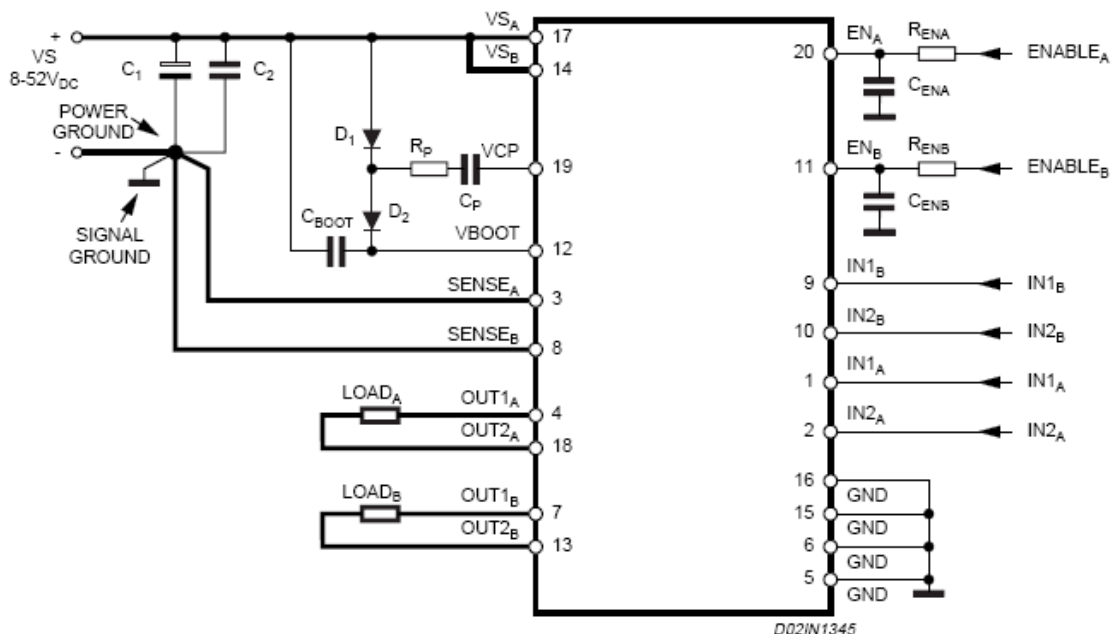


Figura 139. Esquema eléctrico de implementación del L6225.

Teniendo en cuenta las áreas de cobre necesarias para la disipación de calor de los drivers, así como los anchos de los pasajes de corriente, se diseñó y

fabricó un circuito impreso que aloja los drivers, ofrece la posibilidad de conexión de alimentaciones, motores y señales de control. Se utilizó el mismo circuito impreso como distribuidor de alimentación, ubicando conectores para la batería, el cargador, el interruptor general del vehículo y la potencia para la tarjeta de control. Se adicionó un fusible de 15 A. como protección de la batería. El circuito impreso implementado para el manejo de potencia de locomoción del móvil se muestra en la figura 140.

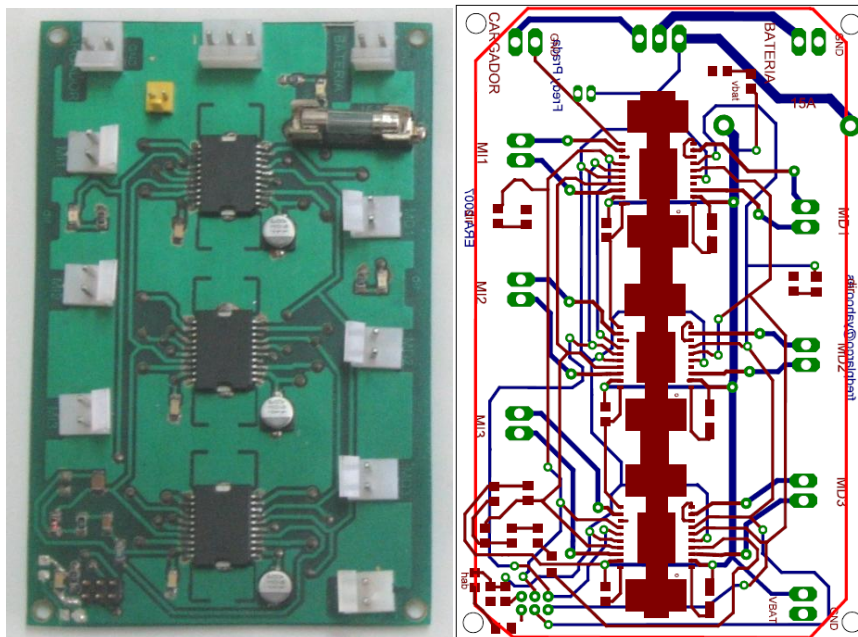


Figura 140. Circuito impreso de control de potencia.

El voltaje de alimentación RMS entregado a los motores es manipulado por el controlador mediante una señal alterna de PWM con un periodo de 100 ms. y ciclo útil de 0 a 100%. Dicha señal se genera mediante un canal del modulo temporizador de 8 bits del controlador. Un contador compara el valor para inicio del flanco ascendente y el valor de conteo de periodo. Según la arquitectura del vehículo se requiere variar de forma independiente la velocidad en cada grupo de ruedas con el objetivo de realizar desplazamientos uniformes y libres de deslizamiento.

7.4.2 Control de servomotores de dirección. El servomotor seleccionado para dar orientación a las ruedas de dirección fue el HS-475-HB de Hitec⁶⁰. Para posicionar el eje del servomotor se debe indicar el set point al sistema de control interno, esto mediante una señal de PWM o modulación por ancho de pulso, la cual tiene un periodo de 20 ms y un ciclo útil de entre los 0,2 y 2.4 ms.

La generación de esta señal se realiza mediante un canal de salida de temporizador configurado para PWM con una frecuencia establecida mediante el pre-escalador ligado al reloj de operación. El contador del temporizador utiliza dos valores de comparación: uno para el periodo, que genera el flanco ascendente y restablece el contador y otro para limitar el ancho de pulso con el flanco descendente. En la figura 141 se muestra el comportamiento de la salida de PWM para diferentes valores de comparación del contador de temporizado.

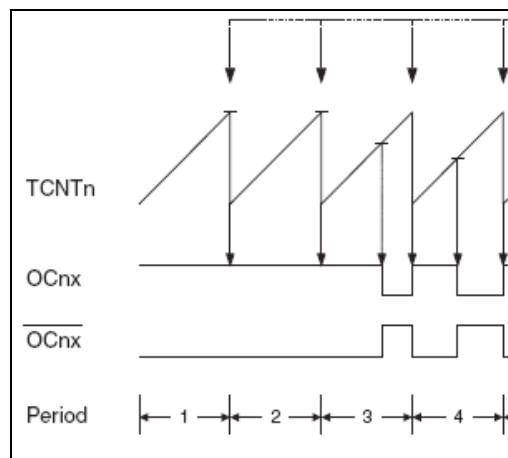


Figura 141. Salida de PWM según temporizador.

La función empleada para el control de posición individual por servomotor, toma el valor de ángulo deseado y lo traduce a un valor de conteo que corresponde al ancho de pulso. Los parámetros de la función de esta relación

⁶⁰ La selección del servomotor se desprende de mediciones de torque mostradas en el Anexo C.

lineal se dedujeron experimentalmente generando diferentes tiempos de ancho y midiendo los ángulos de respuesta sobre el eje del servomotor. Tanto el ángulo de cada uno de los servomotores como la velocidad de cada grupo de ruedas deben ajustarse al ángulo de orientación requerido por el vehículo. Los ángulos y velocidad de cada rueda fueron calculados teniendo en cuenta las distancias entre ellas y el radio de giro requerido, estos datos fueron tabulados e integrados a una función que toma la velocidad lineal y el ángulo de giro ingresado y genera las señales de control respectivas a cada actuador (Ver anexo A).

7.5 UNIDAD DE CONTROL

Para el diseño e implementación de este modulo se utilizaron los siguientes criterios:

- Integración como tarjeta de desarrollo multipropósito: Plantear la posibilidad de utilizar este módulo como plataforma práctica para control digital en diversas aplicaciones.
- Disposición de puertos ofrecidos por el controlador seleccionado: Dejar al alcance del programador cada uno de los puertos e interfases de las cuales esta provisto el microcontrolador, para aprovechar su versatilidad.
- Comodidad en el acceso a cada una de las conexiones y estandarización del orden de pines en cada conector.
- Programación fácil y rápida del microcontrolador.

Para efectuar las pruebas iniciales de integración de los diferentes elementos de hardware y desarrollar funciones y librerías de programación para el control de estos, se hizo necesaria la implementación de una tarjeta de control preliminar, con una estructura muy próxima al diseño final, pero con un controlador de menos prestaciones (Atmega16). En la figura 142 se muestra la tarjeta de control preliminar aplicada al control del robot móvil

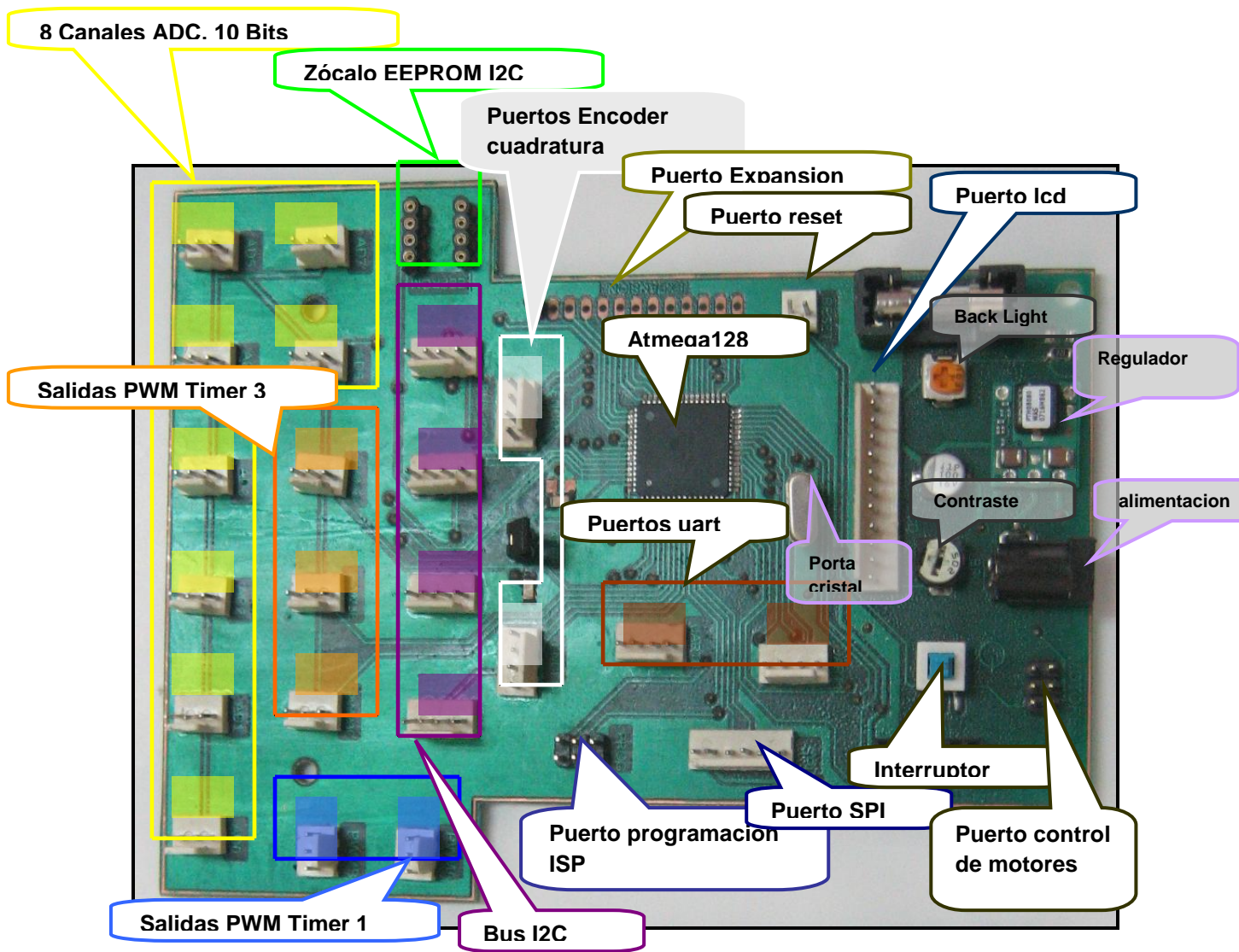


Figura 144. Indicación de Componentes de la unidad de control

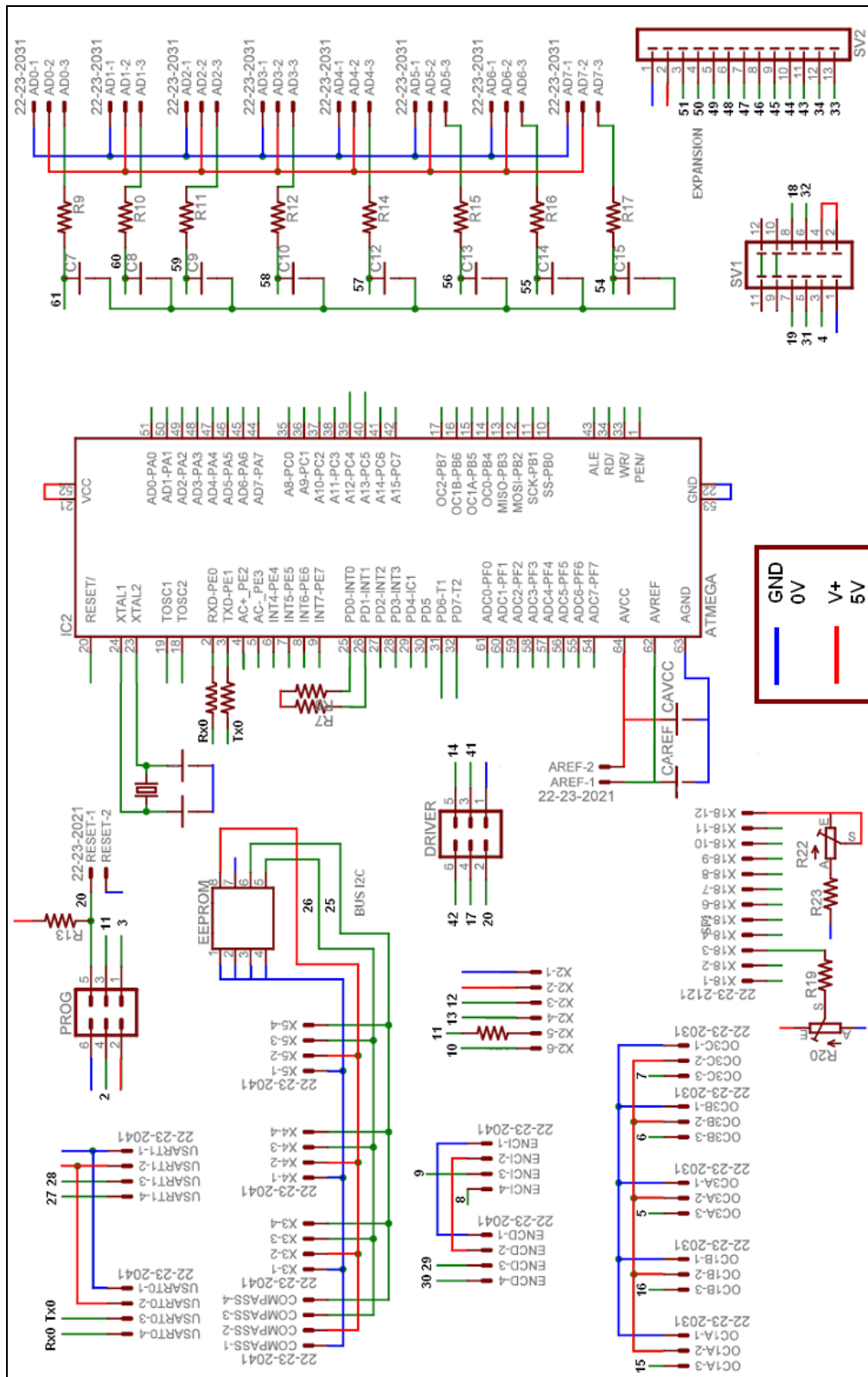


Figura 145. Esquema eléctrico de la tarjeta de control diseñada.

El elemento principal encargado del control y comunicaciones del prototipo es el microcontrolador Atmega128 de ATMEL, este dispositivo requiere de varios elementos de hardware para su operación.

La tensión de polarización requerida para el circuito integrado se encuentra entre 4,5 y 5,5 voltios, esta debe ser filtrada de componentes de alta frecuencias que puedan perturbar su operación, con este propósito se utilizan condensadores de entre 0,01 y 0,1 μf , instalados a la menor distancia posible de los pines de alimentación.

Cada uno de los módulos integrados en el microcontrolador requiere de un reloj a manera de tren de pulso para su operación. A través de un multiplexor se selecciona el origen del reloj base que alimenta un modulo de control encargado de la distribución de esta referencia de tiempo. El tren de pulso base puede ser tomado ya sea del oscilador RC interno, una red RC externa, un oscilador externo o un oscilador por cristal. Para la aplicación planteada se hace necesaria una frecuencia de procesamiento alta, debido a que se debe realizar lectura de diversos dispositivos, ejecutar protocolos de comunicación, hacer cálculos y generar acciones de control mientras el móvil se esta desplazando. Se implemento un cristal de 16MHz, que es la máxima frecuencia de trabajo del procesador, se instalo sobre un zócalo para ser reemplazado fácilmente si la aplicación lo requiere.

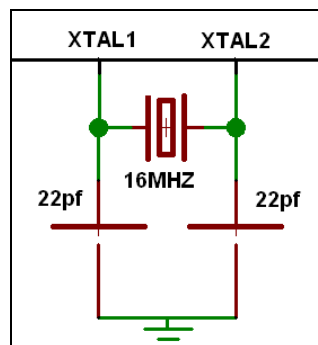


Figura 146. Esquema de circuito oscilador con cristal.

La interfase de programación, esta compuesta por 6 pines, 2 de alimentación al circuito programador (VTG, GND), 1 de entrada de datos (MISO), 1 de salida (MOSI), 1 de señal de sincronismo (SCK) y el reset del procesador. En la figura 147 se muestra la distribución de este puerto para el estándar ISP⁶² utilizado por Atmel.

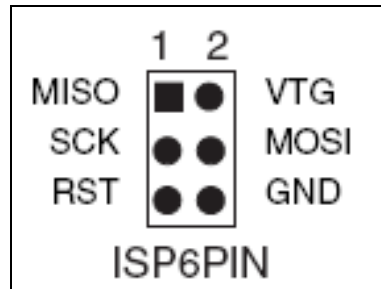


Figura 147. Distribución de pines de programación ISP.

El circuito de programación puede ser adquirido comercialmente, como el AVR ISP que brinda la ventaja de ejecutarse directamente desde el programa AVR Studio, para revisar parámetros de estado del microcontrolador, leer y escribir la memoria de programa y la EEPROM interna. Otra opción para la descarga del programa es fabricar una interfase entre el puerto serial y el puerto de programación y ejecutar un programa de libre descarga como el Pony Prog⁶³, sobre esta plataforma se carga el archivo de extensión “.hex” para ser transmitido al controlador. En la figura 148 se muestra un esquema alternativo de circuito programador.

⁶² ISP: In System Programming.

⁶³ Descarga Gratuita en <http://www.lancos.com>

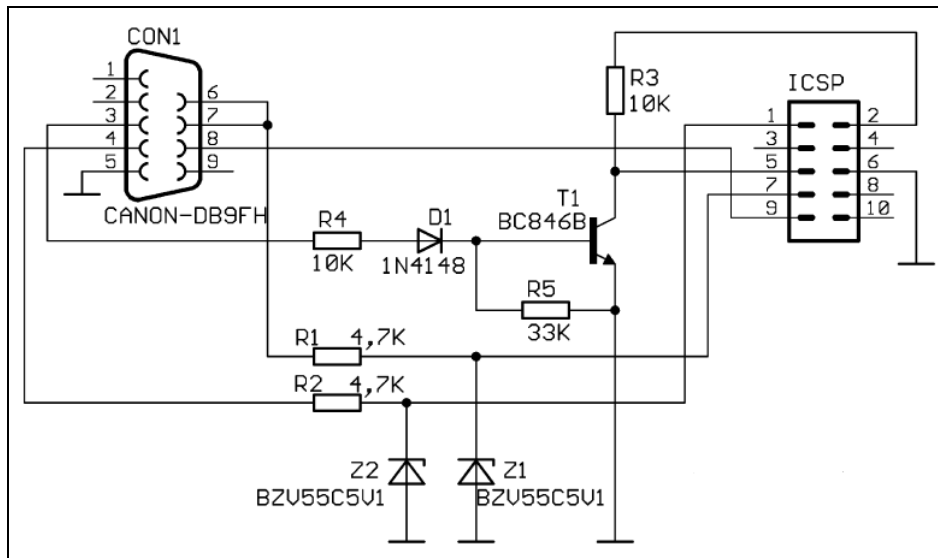


Figura 148. Esquema de circuito programador.

En la implementación de los sensores de medición de distancia por infrarrojo, se evidencio la necesidad de filtrar la señal de tensión mediante una red RC pasa bajas. Basándose en lo anterior se realizó el montaje presentado en el esquema de la figura 149 para cada canal de conversión.

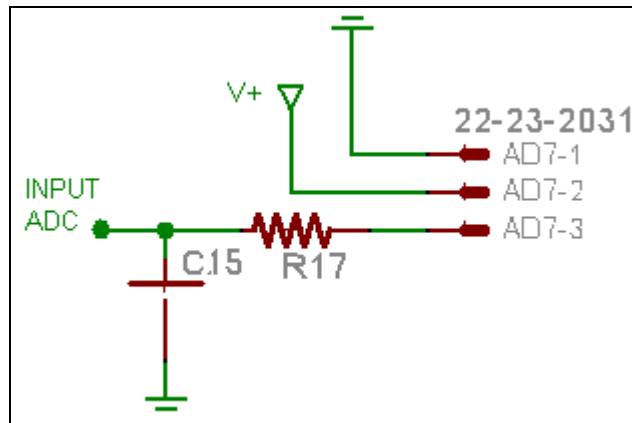


Figura 149. Esquema de conexión para canales de entrada analógica.

Con el objetivo de estandarizar el modo de conexión de cada elemento sobre la tarjeta de control, se asigno el primer pin de cada conector como 0V, el segundo como 5V y los restantes como señales, ya sean de salida o entrada.

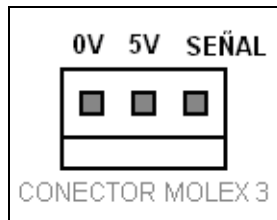


Figura 150. Asignación de pines en conector de entrada analógica o digital.

Para la adquisición de datos de dispositivos que operan bajo el estándar de comunicación I2C (Sensor de distancia SRF02, Brújula CMPS03), se tienen conectados todos ellos a dos hilos, el de datos SDA y el de sincronismo SCL, donde el microcontrolador cumple el rol de maestro. En la tarjeta de control se ubicaron 4 conectores molex de 4 pines y un zócalo para memoria EEPROM, los cuales se encuentran conectados de la manera que muestra la figura 151, las resistencias de elevación a 5V se encuentran instaladas cerca a los pines del controlador.

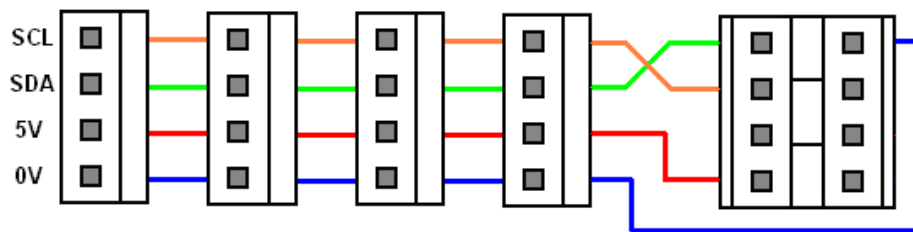


Figura 151. Disposición de conectores en bus I2C.

Para el control de servomotores o cualquier dispositivo que requiera señales de PWM o temporizadas, se dispone de los módulos de 16bits: timer 1 con canales OC1A y OC1B y timer 3 con canales OC3A, OC3B y OC3C. Cada canal tiene una conexión de tres pines idéntica a la de entrada analógica, que coincide con el estándar de conexión de un servomotor común. Es posible configurar estos puertos para la generación de PWM o como salidas digitales simples. Los timer 0 y 2 de 8 bits fueron destinados para el control de velocidad de cada grupo de ruedas laterales, de modo que se encuentran

ubicados en el conector de señales dirigido a la tarjeta de manejo de potencia de los motores de tracción.

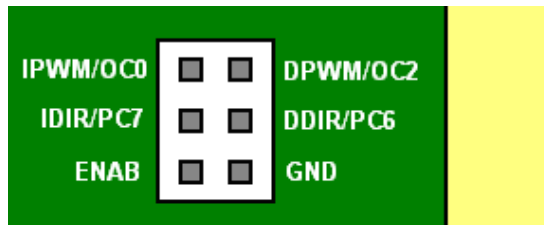


Figura 152. Asignación de pines hacia tarjeta de manejo de potencia de motores.

Para realizar la comunicación con dispositivos que requieran el estándar UART como lo es el modulo inalámbrico o el modulo GPS, el microcontrolador cuenta con dos puertos de este tipo que pueden ser configurados con distintos parámetros de operación. Se tiene acceso al pin de transmisión y de recepción de cada canal mediante un conector de 4 pines como lo indica la figura 153.

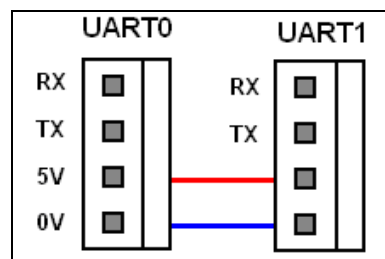


Figura 153. Asignación de pines de puertos UART.

El microcontrolador ATMEGA128L ofrece la posibilidad de expandir la memoria RAM, se dispuso de un puerto para hacer posible su implementación. La interfase se describe en la tabla 46.

Tabla 46. Asignación de señales de interfase para expansión de memoria.

IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
AD 7:0	Puerto multiplexado para dirección de bus (bits menos significativos) y datos
A1 5:8	Dirección de bus (bits mas significativos)
ALE	Habilitador latch de dirección
RD	Leer paquete
WR	Escribir paquete

El puerto de expansión fue habilitado con dos fines, el primero para dar la posibilidad de implementar aplicaciones mas complejas que requieran de una cantidad mayor de puertos o memoria y el segundo para dejar abierta la posibilidad de interconectar el prototipo con un dispositivo de mayor capacidad de procesamiento que pueda adquirir información de equipos de visión artificial y ejecutar tareas que involucren algoritmos inteligentes.

Se dispuso de un puerto para el manejo de una pantalla LCD alfanumérica de 2x16 caracteres, mediante transmisión de datos en 4 bits, habilitador y pin de lectura/escritura. Se incluyo 2 trimmers para el ajuste de contraste y backligh. Para la implementación de este elemento se presenta la asignación de pines en la figura 154.

Las funciones programadas permiten una rápida implementación de este tipo de pantalla, para obtener información concreta de dichas funciones consultar el manual de usuario (Anexo A).

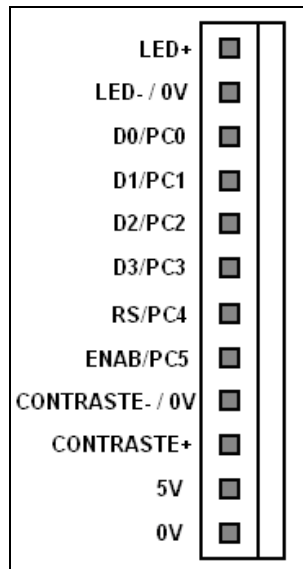


Figura 154. Asignación de pines para instalación de pantalla LCD

Para la aplicación de encoders de cuadratura se habilitaron dos puertos de conexión (derecho e izquierdo), que cuentan con dos canales de entrada a puerto digital que permiten leer cada uno de los canales y efectuar mediciones de odometría sobre la plataforma de desplazamiento. En la figura 155 se muestra la distribución de pines sobre la tarjeta de control para la conexión de encoder.

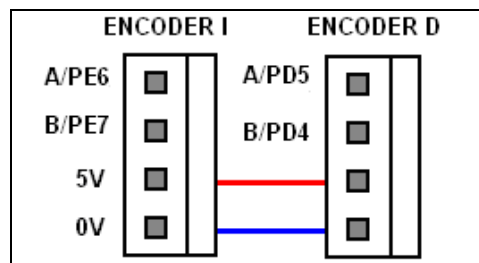


Figura 155. Asignación de pines para la conexión de encoders.

7.6 UNIDAD DE ABASTECIMIENTO

La alimentación del móvil inicia en la tensión suministrada por la batería, que se conecta directamente a la tarjeta de potencia mediante un interruptor de

dos polos, donde el NA conecta la batería a la carga, que en este caso es: los puente H y la tarjeta de control y el NC la conecta al cargador, de la forma que lo indica la figura 157. Esto permite que en su estado 'apagado' sea posible conectar el cargador de batería a un puerto coaxial empotrado en el chasis del vehículo, eliminando la necesidad de retirar la batería para la operación de carga.

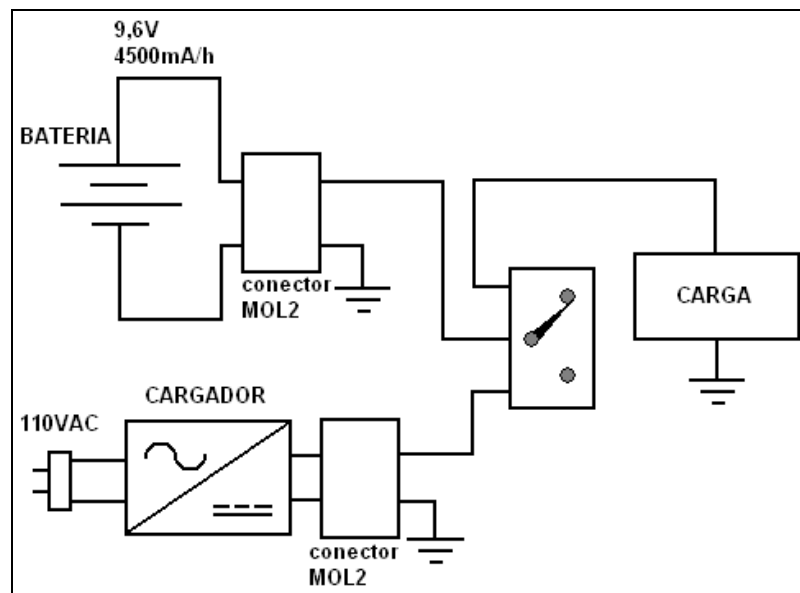


Figura 156. Esquema de distribución alimentación principal.

La polarización de los componentes embebidos en la tarjeta de control y los periféricos esta implementada de la siguiente forma: La tensión de alimentación principal aplicada esta en el rango de los 7 a 15 voltios DC, con una corriente mínima de operación de 1,5 A. En serie a la alimentación se encuentra un switch local que interrumpe la polarización del regulador conmutado PTH08080 de *Texas Instruments*, ajustado a 5 V de salida. Un fusible de 2,5 A protege la salida regulada que finalmente entrega la alimentación a cada uno de los componentes.

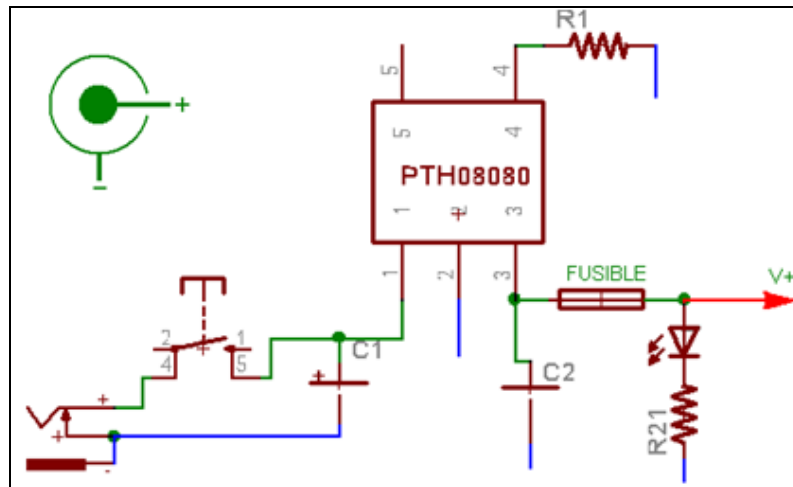


Figura 157. Regulación de tensión de 5 V.

8. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas que se muestran a continuación evalúan el comportamiento mecánico y eléctrico del robot autónomo y permiten verificar el cumplimiento de los parámetros o requerimientos de diseño. Para tener una mayor confiabilidad, cada uno de los datos consignados en las tablas mostradas a lo largo de este capítulo, es el resultado del promedio aritmético de los valores obtenidos en al menos tres mediciones diferentes realizadas en cada una de las pruebas. Las pruebas están divididas en dos grandes grupos que son: pruebas mecánicas o pruebas del sistema de locomoción y pruebas eléctricas.

8.1 INTEGRACIÓN DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS

8.1.1 Sistema de percepción de entorno. Durante las pruebas de evasión preliminares se encontró que posicionar los sensores de infrarrojo en la parte frontal de cada conjunto de suspensión permite una evasión adecuada y sirve como protección de las ruedas ante colisiones, además permite definir cuando un objeto es obstáculo o es posible su superación a través de la altura de detección de ellos. Las pruebas también demostraron que es necesario utilizar un sensor infrarrojo adicional en la parte inferior central del cuerpo pues allí se presenta una zona ciega. Todos los sensores se montaron sobre unos soportes diseñados en forma de junta universal (figura 158 derecha), los cuales tienen dos grados de libertad para facilitar la orientación de los mismos en cualquier dirección. La imagen de la figura 158 izquierda muestra la distribución final de los sensores de percepción.



Figura 158. (Izquierda) Integración de los sensores de percepción de entorno. (Derecha) Junta universal utilizada como soporte de los sensores.

8.1.2 Sistema de posicionamiento, orientación y comunicación. El GPS podía ser ubicado en cualquier zona del cuerpo central del robot, mientras que la brújula debía ser ubicada de tal forma que cuando detectara la dirección norte esta fuera paralela a la línea longitudinal central del robot. La tarjeta comunicación inalámbrica también podía ser ubicada en cualquier punto del cuerpo central. La imagen de la figura 159 muestra la distribución de tales componentes. Un soporte en aluminio fue construido a partir de un tubo cuadrado de 3"x2".

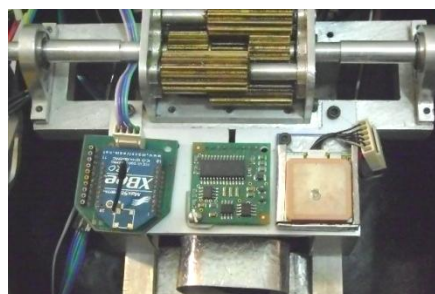


Figura 159. Integración del GPS, brújula y Xbee.

8.1.3 Tarjetas de control, potencia y batería. Estas tarjetas fueron diseñadas con los agujeros de soporte coincidentes de tal forma que pudieran ser colocadas una sobre la otra. Para separarlas se utilizó un buje

de aluminio (no hay problema al utilizar un buje metálico porque las áreas con las que queda en contacto con las tarjetas están aterrizadas). Un tornillo atraviesa de arriba abajo las dos tarjetas y las ajusta contra unos pequeños soportes de aluminio que se atornillan al chasis. La tarjeta de potencia es la inferior (que no requiere tanta manipulación) y la de control es la superior. La figura 160 muestra imágenes de ese montaje. La batería se ubica en la parte inferior del chasis tal como se muestra en 161. La tarjeta de potencia fue colocada a una altura suficiente para dejar el espacio necesario para introducir dicha batería.

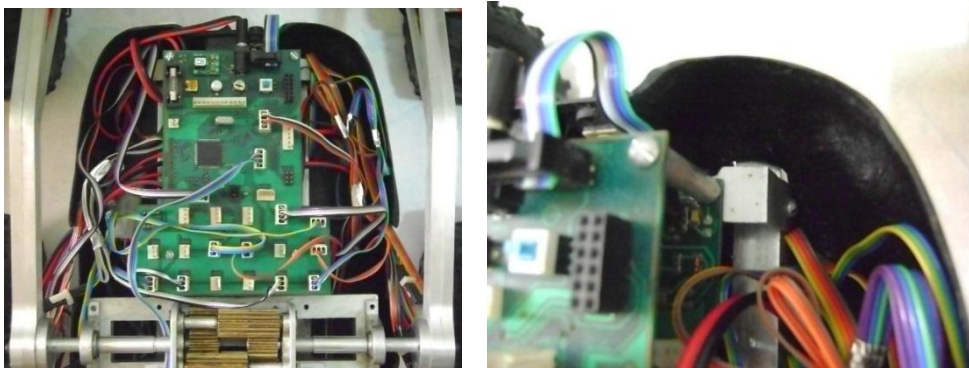


Figura 160. Integración de las tarjetas de control y potencia.

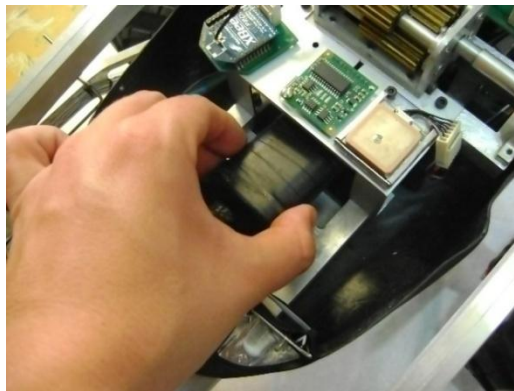


Figura 161. Posición de la batería.

8.1.4 Cableado. Al hacer el cableado de los motores se tuvo en cuenta el movimiento de dirección y de la barra secundaria para dejar un “loop” que permitiera dicho movimiento. Los cables de los servomotores se dejaron tal

como vienen de fábrica para facilitar el recambio de estas piezas. Se dejaron unos cables adicionales que salen a la parte frontal de las barras principales de suspensión por si son necesarios en un futuro para implementar algún sensor o dispositivo adicional. Si mas cables fueran requeridos se debe desarmar el lado correspondiente para poder introducirlos. La selección del diámetro de los conductores considero la resistencia mecánica debido a que alimentan componentes en movimiento o vibración.

8.2 PRUEBAS MECÁNICAS O DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Estas pruebas buscan caracterizar mecánicamente el robot, determinar algunos de sus parámetros cinemáticos, establecer límites de funcionamiento de los sistemas de suspensión, dirección y tracción y verificar el cumplimiento de los requerimientos.

8.2.1 Peso y dimensiones finales del móvil. El robot debe pesar máximo 8 Kgf para permitir el transporte de 2 Kgf de carga útil, debido a que el peso máximo se estableció en 10 Kgf. Por medio de una báscula electrónica se obtuvo el peso total del robot, el cual alcanzó 7 Kgf. Esto brinda la posibilidad de transportar hasta 3Kg de carga útil.

Las dimensiones externas totales del robot son:

Longitud = 61 cm

Ancho = 45 cm

Alto = 25,5 cm

8.2.2 Capacidad de superación de obstáculos.

Objetivo: cuantificar la máxima altura de escalón que se puede superar por medio del sistema de suspensión diseñado.

Descripción: se colocó el robot a sobrepasar escalones de diferentes alturas. Inicialmente no se utilizó el resorte entre la barra principal y la barra secundaria de suspensión de cada lado y se verificó solo la máxima altura que pudo superar aplicando la máxima potencia a los motores. Las siguientes pruebas se hicieron con los resortes y se verificó la máxima altura del escalón que pudo superar el robot para distintos porcentajes de PWM. Estas pruebas fueron realizadas con las baterías en su máxima carga, de manera que un requerimiento instantáneo de corriente pudiera ser suplido. El robot se colocó a 5 cm del escalón de manera tal que tuviera un impulso inicial que ayudara en la superación del obstáculo.

Resultados: la tabla 47 recopila los datos tomados durante este grupo de pruebas.

Tabla 47. Capacidad de superación de obstáculos usando los resortes.

% PWM	Altura de escalón [cm]
40	4.5
50	6.5
60	9
70	9.5
80	10.5
90	12.5
100	14

Conclusiones de la prueba:

- El sistema de suspensión diseñado brinda al robot la capacidad de pasar sobre obstáculos de hasta 14 cm, altura que equivale al diámetro de las ruedas.
- Para superar los obstáculos de dicha altura, los motores deben ofrecer su máxima potencia. Además, es necesario tener cierto impulso para lograr la superación del obstáculo.

- A medida que se disminuye la potencia disponible en el motor, disminuyendo el %PWM, también disminuye la altura del obstáculo que puede superar.
- Para lograr que el robot supere el obstáculo sin necesidad del impulso es necesario utilizar motores que tengan un mayor “stall torque” o torque ofrecido con el motor bloqueado. Sin embargo, teniendo en cuenta el estudio realizado de los motores ofrecidos en el mercado, habría que aceptar una disminución en la velocidad máxima que podría alcanzar el robot.
- Durante las pruebas sin el resorte, el robot logró subir un escalón de 11 cm de altura con los motores al 100% de su capacidad. Por lo tanto es evidente que el resorte mejoró considerablemente la capacidad de superación de obstáculos.
- También se hizo una prueba deshabilitando las ruedas centrales, es decir, se amarraron las barras secundarias a las primarias de tal forma que las ruedas centrales quedaran en el aire y se verificó que estas ruedas son indispensables para la superación del obstáculo. El robot no pudo subir ni un obstáculo de 5 cm con los motores en un máximo nivel de potencia.

8.2.3 Medición de mínimo radio de giro del móvil.

Objetivo: verificar el mínimo radio de giro que puede dar el robot.

Descripción: el mínimo radio de giro del centro geométrico del móvil se midió colocando los servos de dirección de las ruedas del lado interno de la curva en su ángulo mínimo y los servos de la parte externa en el ángulo adecuado para evitar el deslizamiento de las ruedas. La medición se realizó a diferentes velocidades sobre una superficie lisa para verificar si se presentaba deslizamiento radial del móvil. Además se realizó con el mínimo radio de giro porque para una velocidad y masa del móvil dadas, la fuerza

centrífuga es mayor cuando el radio de giro es menor (ver ecuación 38). Se midió el radio de giro de la parte interna de la rueda central interna y se sumó a este valor la mitad del ancho total del móvil que es igual a 225mm.

$$F_{\text{centrífuga}} = \frac{V^2 * m}{R_{\text{giro}}} \quad (\text{Ec. 38})$$

Resultados: los datos recopilados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 48. Medición del mínimo radio de giro del robot móvil.

% Vel	Radio de giro
40	35.5 cm
60	35.5 cm
100	35.5 cm

Conclusiones de la prueba:

- El mínimo radio de giro del centro geométrico del robot es 35.5 cm.
- La velocidad máxima no es suficiente para generar una fuerza centrífuga que cause un deslizamiento radial del vehículo cuando se da una curva con el radio de giro mínimo.
- Sobre el suelo liso en el cual fue realizada la prueba no hubo deslizamiento radial, por lo tanto tampoco se presentará sobre ninguno de los otros suelos considerados en los requerimientos.

8.2.4 Capacidad de desplazamiento a través de terrenos inclinados.

Objetivo: determinar la máxima inclinación del terreno a través del cual el robot puede subir, así como la corriente consumida por los motores de tracción a diferentes velocidades.

Descripción: se determinó el ángulo máximo de inclinación del terreno por el cual puede subir el móvil en función de la velocidad regulada por medio de

PWM y sin hacer control de velocidad. Las pruebas fueron realizadas en una superficie de madera pulida y pintada que tiene un coeficiente de fricción muy bajo y que podía ser inclinada fácilmente. Para cada porcentaje de velocidad utilizado se aumentó la inclinación de la superficie hasta que el robot pudo moverse. Además en cada prueba se registró la corriente demandada por los motores de tracción. Esta prueba fue realizada con las baterías en su máxima carga.

Resultados: los ángulos máximos a través de los cuales el robot puede subir sin carga útil en función del porcentaje de PWM se pueden visualizar en la tabla 49.

Tabla 49. Capacidad de subir a través de terrenos inclinados.

% PWM	Inclinación [°]	I/Motor [mA]	I Total [mA]
40	15,37	740	4440
50	17,46	835	5010
60	20,79	960	5760
70	23,27	1120	6720
80	24,52	1230	7380
90	26,10	1310	7860
100	26,74	1420	8520



Figura 162. Prueba de capacidad de desplazamiento por terrenos inclinados.

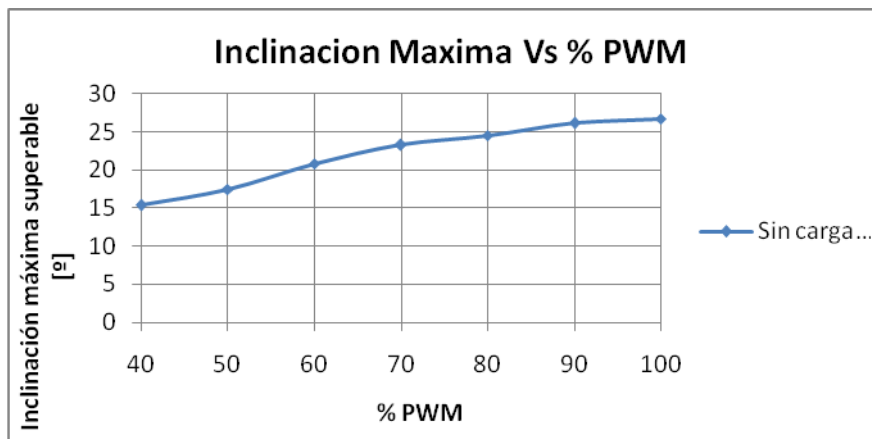


Figura 163. Inclinación máxima del terreno a través del cual puede subir el robot en función del % PWM.

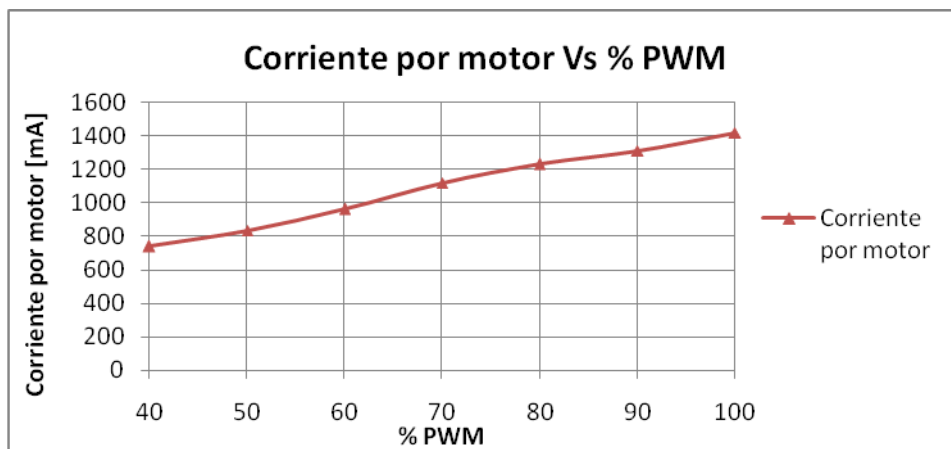


Figura 164. Corriente consumida por motor, mientras sube a través de los terrenos inclinados.

Conclusiones de la prueba:

- Debido a que las pruebas fueron realizadas en una superficie con coeficiente de fricción bajo, en la cual la fuerza de tracción de las ruedas es mínima, es de esperar que sobre los terrenos en los cuales la fuerza de tracción sea mayor, el móvil pueda subir inclinaciones mayores. Una evidencia de esto es que durante las pruebas, al superar el máximo ángulo alcanzado para cada porcentaje de PWM, las ruedas deslizaban debido a la baja tracción que tenían.

- Si el móvil debe navegar subiendo terrenos de 27° de pendiente consumirá una corriente total de 8500 mA (solo los motores de tracción) y podrá funcionar a ese ritmo aproximadamente 30 minutos, teniendo en cuenta la batería utilizada de 4500 mAh. De igual manera para lograr una autonomía de 1 hora se hace necesario plantear pruebas de investigación sobre terrenos de pendientes menores a 15° en la mayor parte del área de operación.
- Un inclinómetro es necesario para determinar la pendiente del terreno y poder plantear una estrategia de control de velocidad correcta, aumentar el porcentaje de PWM o encontrar otra trayectoria si la pendiente supera los 30°.

8.2.5 Medición de la velocidad real del robot.

Objetivo: determinar la velocidad real del robot sobre terreno plano en función del porcentaje de PWM ingresado.

Descripción: por medio de un cronómetro digital se midió el tiempo utilizado por el móvil en recorrer una distancia fija preestablecida de 5m sobre una carretera sin pendiente. La prueba se realizó para diferentes porcentajes de PWM, desde 20% hasta 100% y aumentando 10% cada vez. Al entrar en la zona de medición el robot tenía la velocidad máxima según el porcentaje de PWM aplicado, puesto que siempre arrancó unos metros atrás, teniendo en cuenta el periodo transitorio de la velocidad.

Resultados: los datos recopilados son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 50. Velocidad real del robot en función del % PWM.

% PWM	t [s]	V [m/s]
100	3,6	1,39
90	4	1,25

80	4,7	1,06
70	5,29	0,95
60	6,19	0,81
50	8,12	0,62
40	10,57	0,47
30	15,34	0,33
20	25,91	0,19

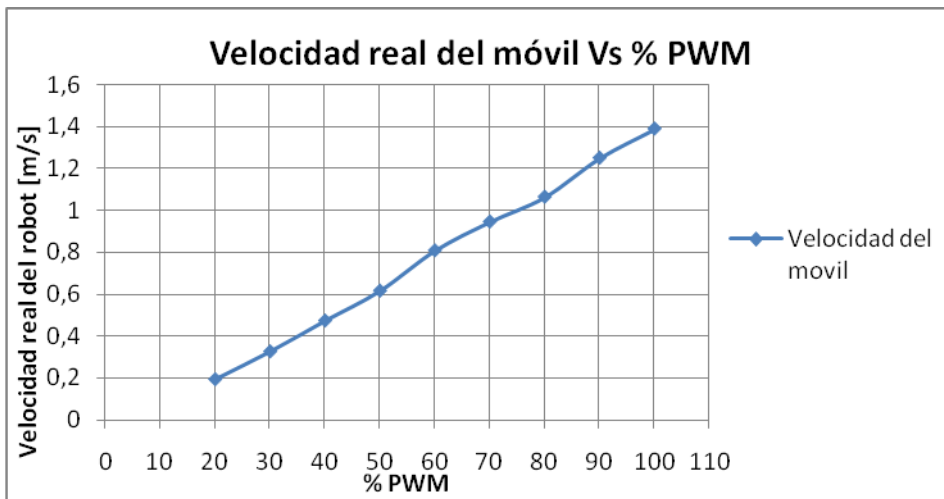


Figura 165. Velocidad real del móvil en m/s en función del %PWM.

Conclusiones de la prueba:

- La velocidad máxima del robot sobre terrenos sin pendiente es 1.39 m/s.
- La velocidad del móvil es directamente proporcional al porcentaje de PWM utilizado. Esto puede comprobarse al observar la figura 166 en la que se ve la dependencia lineal entre estas dos variables.

8.2.6 Medición de la distancia de frenado.

Objetivo: evaluar la distancia de frenado en función de la velocidad del móvil.

Descripción: se programó el móvil para realizar el frenado completo de las seis ruedas luego de recorrer un tramo suficiente para alcanzar la velocidad máxima correspondiente al PWM ingresado. La distancia de frenado se calculó con base en el número de pulsos marcados por el encoder después de que la orden de frenado es dada. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$Lb = \left(\frac{Dw}{2}\right) * Np * \left(\frac{2\pi}{Npv}\right) * \frac{1}{Rm} \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

Lb: distancia de frenado

Dw: diámetro de la rueda = 14 cm

Np: numero de pasos registrados en el encoder

Npv: número de pasos por vuelta = 120

Rm: relación de trasmisión de la caja reductora del motor = 1:50

Cabe aclarar que la metodología de frenado es una operación eléctrica donde el puente h anula la diferencia de tensión del motor instantáneamente convirtiéndose en una carga que disipa la energía generada por los motores a causa de la inercia. Para ejecutar la acción de frenado el microcontrolador pone en 1 lógico ambas entradas del puente h por cada motor.

Datos: la tabla 51 muestra los datos recopilados durante la realización de esta prueba. Para cada %PWM ingresado se repitió la prueba cinco veces y el cálculo de la distancia de frenado se hizo con el número de pasos promedio de las cinco mediciones.

Tabla 51. Distancia de frenado en función de la velocidad del móvil.

%PWM	Np1	Np2	Np3	Np4	Np5	NPprom	Lb [cm]
20	142	145	143	146	136	142,4	1,04
30	249	260	249	248	249	251	1,84
40	382	368	364	380	358	370,4	2,71
50	483	487	480	479	474	480,6	3,52
60	605	595	606	596	603	601	4,40
70	716	718	685	745	730	718,8	5,26
80	870	879	890	863	872	874,8	6,40
90	959	977	944	967	974	964,2	7,05
100	1054	1012	1027	1009	1018	1024	7,49

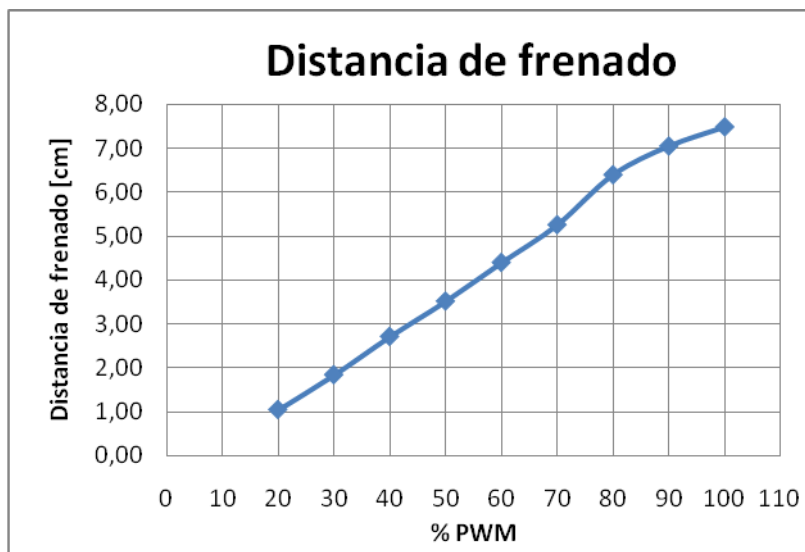


Figura 166. Gráfica de la distancia de frenado en función del %PWM ingresado.

Conclusiones de la prueba:

- Hasta el 70% de PWM se mantiene una tendencia lineal de la distancia de frenado en función de la velocidad del robot. Por encima de este valor, la tendencia se aleja levemente de la linealidad.

- Desde que la orden de frenado es emitida por el controlador hasta que el móvil se detiene se avanza una distancia de 7.49 cm cuando la velocidad es la máxima.
- Incluso a la máxima velocidad no se presenta deslizamiento de las ruedas durante el frenado a pesar de que este se hace bloqueando eléctricamente los motores.

8.2.7 Distancia de frenado del móvil ante una señal dada por los sensores de distancia.

Objetivo: determinar la distancia avanzada por el robot después de recibir la señal de frenado dada por uno de los sensores de distancia, como función de la velocidad del móvil.

Descripción: se colocó el móvil de frente contra una pared a diferentes velocidades y se dio la orden de frenado cuando el sensor de ultrasonido detectó una distancia de un metro. Después de que se detuvo, se sensó la distancia a la que quedó el sensor de la pared. La misma prueba también fue desarrollada con el sensor de infrarrojo para una distancia de frenado de 60 centímetros.

Resultados: la tabla 52 y la figura 167 resumen los datos recopilados durante la prueba en la que se utilizó el sensor de ultrasonido SRF02. La tabla 53 y la figura 168 muestran los resultados obtenidos utilizando el sensor de infrarrojo.

Tabla 52. Distancia de frenado en función de la velocidad del móvil al recibir la señal del radar.

% PWM	Distancia a la pared [cm]	Longitud frenado [cm]
100	27,7	72,3
90	35,2	64,8
80	51,2	48,8
70	57,5	42,5
60	68	32
50	70,6	29,4
40	81,1	18,9
30	87,6	12,4
20	93,3	6,7

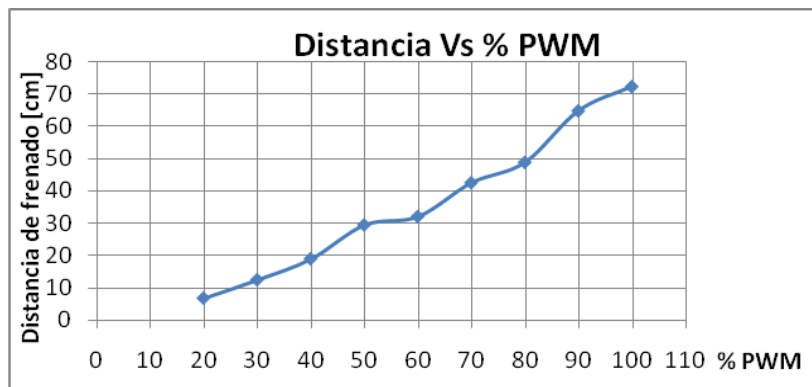


Figura 167. Longitud de frenado en función del %PWM ante la señal del sensor de ultrasonido.

Tabla 53. Longitud de frenado en función de la velocidad del móvil al recibir la señal del sensor infrarrojo.

%PWM	D1 [cm]	D2 [cm]	D3 [cm]	DProm [cm]	Longitud de frenado [cm]
20	57,2	57,2	57,5	57,3	2,7
30	54,4	53,5	51,7	53,2	6,8
40	50,2	50,2	48,8	49,7	10,3
50	45,4	46,5	45,9	45,9	14,1
60	41,6	40,8	42,0	41,5	18,5
70	38,9	37,7	37,7	38,1	21,9
80	33,7	35,0	35,9	34,9	25,1
90	29,4	30,9	30,9	30,4	29,6
100	27,1	27,1	24,9	26,4	33,6

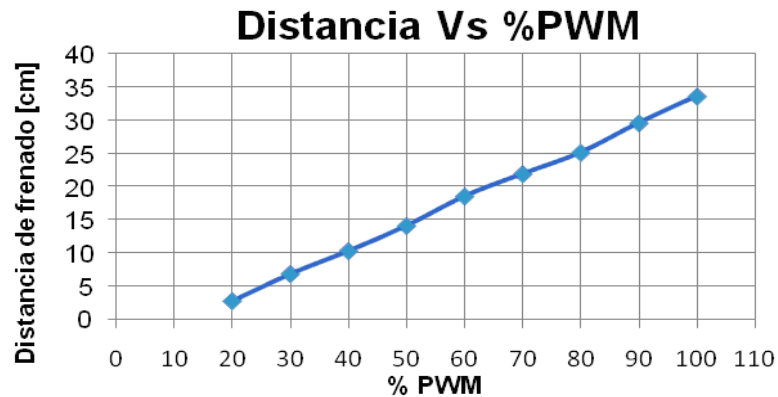


Figura 168. Distancia de frenado en función del %PWM ante la señal del sensor de infrarrojo.

Conclusiones de las pruebas:

- Esta prueba sirve para determinar la velocidad máxima de navegación que puede tener el móvil para evitar colisiones con los objetos.
- La frecuencia de lectura del sensor infrarrojo es mayor que la del sensor de ultrasonido porque su tiempo de lectura solamente incluye el tiempo de la conversión analógica digital y el cálculo de distancia con base en el registro entregado por el conversor, mientras el sensor ultrasónico emite la onda, espera la onda reflejada, mide el tiempo de retardo, calcula la distancia en el microcontrolador interno y envía el dato al micro principal a través del bus I2C. En consecuencia la distancia de frenado cuando la orden es dada con el sensor infrarrojo es inferior a la que se presenta con el de ultrasonido. Esto es evidente comparando las gráficas de las figuras 167 y 168.

8.2.8 Torque de dirección.

Objetivos: verificar la funcionalidad de los servos de dirección para mover las ruedas sobre los terrenos considerados y determinar la corriente demandada por los mismos.

Descripción: en varios terrenos se probó el funcionamiento de los servos de dirección con el móvil estacionario. Se midió el tiempo que tardó el servo en mover la rueda en la mitad de su rango de dirección. También se midió la corriente y el voltaje consumido por los servos para dar dirección a las ruedas y con dichos valores se calculó el torque de dirección en cada caso.

Resultados: la tabla 54 relaciona todos los datos recopilados durante las mediciones realizadas sin carga útil.

Tabla 54. Torque real requerido para la dirección. Sin carga útil.

Suelo	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Potencia [w]	Tiempo [s]	Velocidad ang [rad/s]	Torque [Kgf*cm]
Baldosa	4,99	120	0,17964	0,6	2,617993878	0,699464073
Concreto	4,99	140	0,20958	2,5	0,628318531	3,400172576
Pavimento	4,99	130	0,19461	1,8	0,872664626	2,273258237

Conclusiones de la prueba:

- La alineación de las ruedas de dirección es indispensable para evitar consumos innecesarios de energía. Cuando las ruedas están desalineadas son más inestables y tienden a girarse por lo tanto el servo debe generar un torque que evite esto.
- El servomotor HS-322HD finalmente utilizado, no ofrece el torque requerido para direccionar la rueda sobre gramilla. Este terreno es el más exigente debido a que las raíces se enredan con el labrado de la llanta. El

servo HS-475HB seleccionado no pudo ser implementado por costo. Se recomienda el uso de este servomotor.

8.2.9 Estabilidad estática. La estabilidad estática se midió colocando el robot transversalmente sobre una tabla inclinada. La inclinación de la tabla se incremento hasta que las ruedas del lado más alto perdieron contacto con la misma. El ángulo de inclinación de la tabla en tal posición fue 43°. Por lo tanto, el robot puede mantener su estabilidad estática navegando transversalmente a través de terrenos de hasta 43° de pendiente. Esto da una idea de la alta estabilidad del móvil. Sin embargo, es aconsejable evitar que se desplace por terrenos de más de 40° de inclinación.

8.3 PRUEBAS ELÉCTRICAS

Este grupo de pruebas tiene el objetivo general de caracterizar eléctricamente el robot móvil.

8.3.1 Corrientes consumidas por los dispositivos periféricos. Gracias al regulador de voltaje que tiene la tarjeta de control, el voltaje recibido por todos los elementos se mantiene constante en 4.99V. En la tabla 55 se resumen las corrientes consumidas por los diferentes elementos periféricos.

Tabla 55. Corrientes consumidas por los diferentes dispositivos a bordo.

Elemento	Corriente [mA]
SRF02 (sensor de ultrasonido)	4.5
CMPS03 (Brújula)	23.2
EM406 (GPS) Arranque	65
EM406 (GPS) 1 min	50
EM406 (GPS) 5 min	44
EM406 (GPS) 10 min	40
EM406 (GPS) enviando datos pos.	40-50
GP2D2Y00A02 (Sensor de infrarrojo)	27.3
GP2D120 (Sensor de infrarrojo)	26

8.3.2 Medición de los voltajes y corrientes reales de la tarjeta de control.

Con el robot estático

Voltaje batería: 10.23 V

Voltaje regulador: 4.99 V

Corriente tarjeta de control después del regulador (4.99 V): 343 mA

Corriente tarjeta de control antes del regulador (10.23 V): 196 mA

$$\text{Eficiencia del regulador: } \frac{4.99 \text{ V} \times 343 \text{ mA}}{10.23 \text{ V} \times 196 \text{ mA}} \times 100 = 85.36 \% \quad (\text{Ec. 40})$$

Para los motores

% PWM	Voltaje sin carga [V]
30	2,25
40	3,12
50	4,02
60	5
70	6,1
80	7,22
90	8,3
100	9,4

Conclusiones de la prueba:

- La eficiencia real del regulador conmutado implementado se encuentra por debajo de lo especificado por el fabricante (>90%) para corrientes de consumo menores a 500mA.
- Aplicando un PWM con ciclo útil de 80% al puente H, cada motor de tracción recibe la tensión nominal. Para un PWM de 100% se aplica una

sobretensión útil en instantes críticos en cuanto a requerimiento de potencia, como la superación de obstáculos de alturas superiores a 10cm.

8.3.3 Verificación de la precisión de los sensores de distancia.

Objetivo: verificar la precisión de los sensores de distancia y encontrar el error en su medición.

Descripción: se desplazó el sensor a distancias conocidas respecto a una pared y se transmitió el valor medido por medio del modulo de comunicación al computador. El error se calcula respecto al valor real de distancia a la pared.

Datos: las siguientes tablas muestran los valores de las mediciones realizadas para los sensores de ultrasonido e infrarrojo.

Tabla 56. Verificación de la precisión del sensor de ultrasonido.

SRF02		
Real [cm]	Sensado [cm]	% error
30,1	28	6,976744186
37	36	2,702702703
46,5	45	3,225806452
56,7	55	2,998236332
66,7	66	1,049475262
76,7	76	0,912646675
86,7	85	1,960784314
96,7	95	1,758014478
106,7	105	1,593252109
116,7	114	2,313624679
136,7	134	1,975128018
156,7	154	1,723037652
166,7	164	1,619676065
176,7	174	1,528013582
216,7	213	1,707429626
315,7	311	1,488755147

Tabla 57. Verificación de la precisión del sensor de infrarrojo.

GP2DO2YK		
Real [cm]	Sensado [cm]	% error
13,2	13,1	0,76
20,1	17,9	10,95
29,7	28,4	4,38
40	38,5	3,75
50	48,6	2,8
60	57,9	3,5
70	67,4	3,71
80	78,1	2,38
90	86,3	4,11
100	95,7	4,3
120	112	6,67
140	130	7,14
150	138,4	7,73
160	146,2	8,63
200	150	25

Conclusiones de la prueba:

- La exactitud en la medición del sensor de ultrasonido disminuye a medida que la distancia sensada es mayor a 60 cms.
- El ángulo de incidencia de la onda ultrasónica sobre la superficie sensada genera variaciones en la medida registrada.
- El error del sensor infrarrojo es mayor que el ultrasónico debido a que su medida se ve afectada por el ruido eléctrico presente en la señal de salida, el error de conversión propio del modulo embebido, el error por linealización de la característica propia del dispositivo, entre otras. A pesar de lo anterior su implementación es eficiente siempre y que el algoritmo de evasión desarrollado maneje condiciones en rangos de

medida y ejecute estrategias adecuadas para lecturas de distancia críticas.

8.3.4 Verificación de la lectura de orientación de la brújula.

Objetivo: Verificar el dato de ángulo respecto al norte adquirido del dispositivo implementado, dando orientación a la plataforma mecánica respecto a una referencia cardinal marcada.

Descripción: se realizó una marca sobre el terreno indicando los puntos cardinales y sobre esta se ubicó el prototipo y se programó para girar sobre su eje central, deteniéndose en los puntos cardinales según la lectura adquirida de la brújula electrónica. Se realizó un video de la prueba del cual se extrajeron las siguientes imágenes de las paradas efectuadas.



Figura 169. Parada del móvil respecto al este, sur, oeste y norte.

Conclusiones de la prueba:

- Debido a la inercia rotativa que debe disipar el móvil al momento de dar la orden de frenado sobre el punto cardinal, se desfasa del punto ideal de parada. El error observado en el instante que el robot desenergiza los motores respecto a las marcas es menor a diez grados.

- Visualizando el dato de ángulo registrado continuamente a través de la interface inalámbrica se puede observar un aumento gradual a medida que el móvil rota.

8.3.5 Estimación del error en la medida de posición dada por el GPS.

Objetivo: obtener un valor práctico del error presentado en la medida de posición, que permita determinar la capacidad real del prototipo en la navegación autónoma y la implementación de aplicaciones acordes a esta imprecisión.

Descripción: se programó el robot para recibir los datos principales de posición como son la latitud y longitud, almacenarlos en un vector y enviarlos periódicamente de forma inalámbrica a la central de supervisión mientras el vehículo se encuentra estático. Tabulando esta información se determinará la variación en la medida ofrecida por el modulo GPS implementado.

Datos: la siguiente tabla muestra los parámetros de posición arrojados por el sistema de posicionamiento, para un total de 36 muestras.

Tabla 58. Variación de la posición global dada por el GPS con el móvil estacionario.

Nº	Latitud N		Longitud W		Nº	Latitud N		Longitud W	
	Grados	minutos	Grados	minutos		grados	minutos	grados	minutos
1	7	4,8628	73	6,6055	11	7	4,8846	73	6,5138
2	7	4,8717	73	6,5733	12	7	4,8846	73	6,5138
3	7	4,8787	73	6,5432	13	7	4,885	73	6,5128
4	7	4,8822	73	6,5336	14	7	4,885	73	6,5113
5	7	4,8839	73	6,5261	15	7	4,8848	73	6,5091
6	7	4,8842	73	6,525	16	7	4,885	73	6,5093
7	7	4,8837	73	6,5237	17	7	4,8854	73	6,5092
8	7	4,884	73	6,521	18	7	4,8854	73	6,5121
9	7	4,8839	73	6,5212	19	7	4,8854	73	6,513
10	7	4,8845	73	6,5171	20	7	4,8856	73	6,5143

21	7	4,886	73	6,5185	29	7	4,8859	73	6,5163
22	7	4,8858	73	6,5184	30	7	4,8857	73	6,513
23	7	4,886	73	6,5175	31	7	4,8869	73	6,5093
24	7	4,8858	73	6,5154	32	7	4,8869	73	6,5086
25	7	4,8856	73	6,5143	33	7	4,887	73	6,5082
26	7	4,8854	73	6,5134	34	7	4,8871	73	6,5082
27	7	4,8855	73	6,5125	35	7	4,8866	73	6,5114
28	7	4,8856	73	6,514	36	7	4,8856	73	6,514

Se obtuvo el valor máximo y mínimo de las muestras en minutos y el rango total de variación para la latitud y longitud.

Latitud N (minutos)	Longitud W (minutos)
Max: 4,8871	Max: 6,6055
Min: 4,8628	Min: 6,5082
Rango: 0,0243	Rango: 0,0973

Para hallar la variación respectiva en metros se realizó la transformación de esta cifra en minutos a grados, luego a radianes y luego a metros empleando el radio de la tierra, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Error_lat} = \text{rango_lat}' \times \frac{1^\circ}{60'} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 6356000\text{m}$$

Error_lat= 44,92792 metros.

$$\text{Error_lon} = \text{rango_lon}' \times \frac{1^\circ}{60'} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 6378000\text{m}$$

Error_lon= 180,5192 metros.

Estos resultados no concuerdan con las especificaciones descritas por el fabricante del módulo implementado. Realizando una observación detallada del comportamiento de las medidas registradas, se encuentra una disminución en la diferencia entre muestras luego del décimo dato, lo que indica un ajuste en la calibración del módulo luego de un tiempo de operación. En consecuencia se realizó la determinación del error

descartando los primeros diez datos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Latitud N (minutos)	Longitud W (minutos)
Max: 4,8871	Max: 6,5185
Min: 4,8846	Min: 6,5082
Rango: 0,0025	Rango: 0,0103

$$\text{Error_lat} = \text{rango_lat}' \times \frac{1^\circ}{60'} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 6356000\text{m}$$

Error_lat= 4,62221364 metros.

$$\text{Error_lon} = \text{rango_lon}' \times \frac{1^\circ}{60'} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 6378000\text{m}$$

Error_lon= 19,1094354 metros.

$$\text{Error_Total} = \sqrt{\left(\frac{4,62221364}{2}\right)^2 + \left(\frac{19,1094354}{2}\right)^2} = 9,83025\text{m}$$

Conclusiones de la prueba:

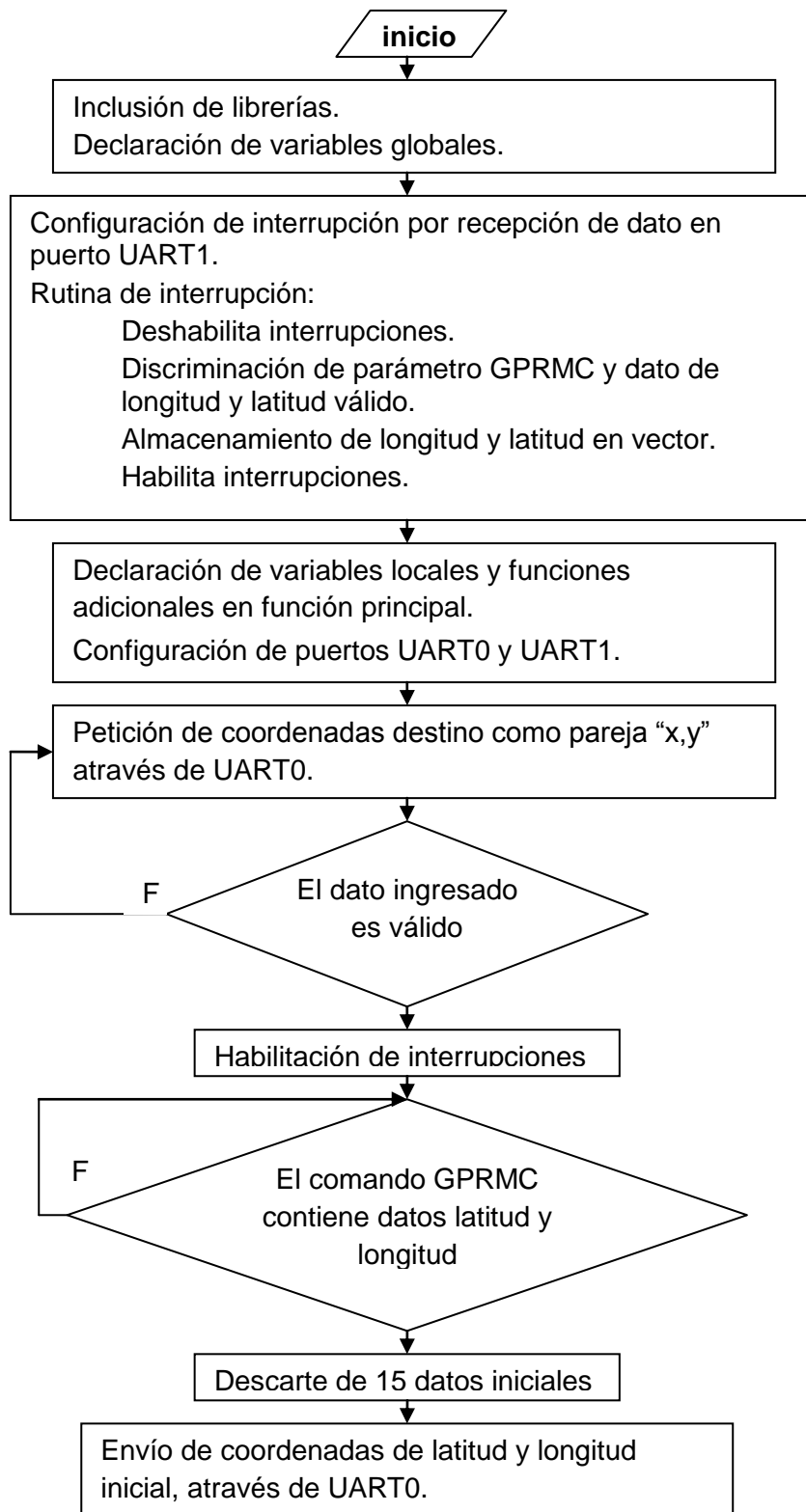
- El radio total de error limita al robot para desempeñar tareas con objetivos ubicados dentro de un área menor a un radio de 10 metros. Los puntos objetivos deben situarse en un área mayor a 100x100 m² para que los errores en posicionamientos sean menores al 10%.
- Al momento de programar algoritmos que empleen el modulo GPS se debe dar un tiempo de arranque o estabilización en la medida que involucra descartar por lo menos 20 datos iniciales de posición.

8.3.6 Navegación autónoma hacia un punto objetivo.

Objetivo: comprobar la efectividad del móvil en la ejecución de una rutina de evasión de obstáculos, posicionamiento y direccionamiento para alcanzar un punto objetivo de forma autónoma.

Descripción: se programó el robot para recibir datos del punto objetivo como coordenadas (x,y) tomando el norte como eje coincidente con y . Se planteo como criterio de parada que la distancia al punto calculada fuera menos de 10 metros, de lo contrario se ejecuta cíclicamente la rutina de posicionamiento, orientación y evasión.

El esquema general del programa ejecutado por el prototipo para la prueba se presenta en la figura 170.



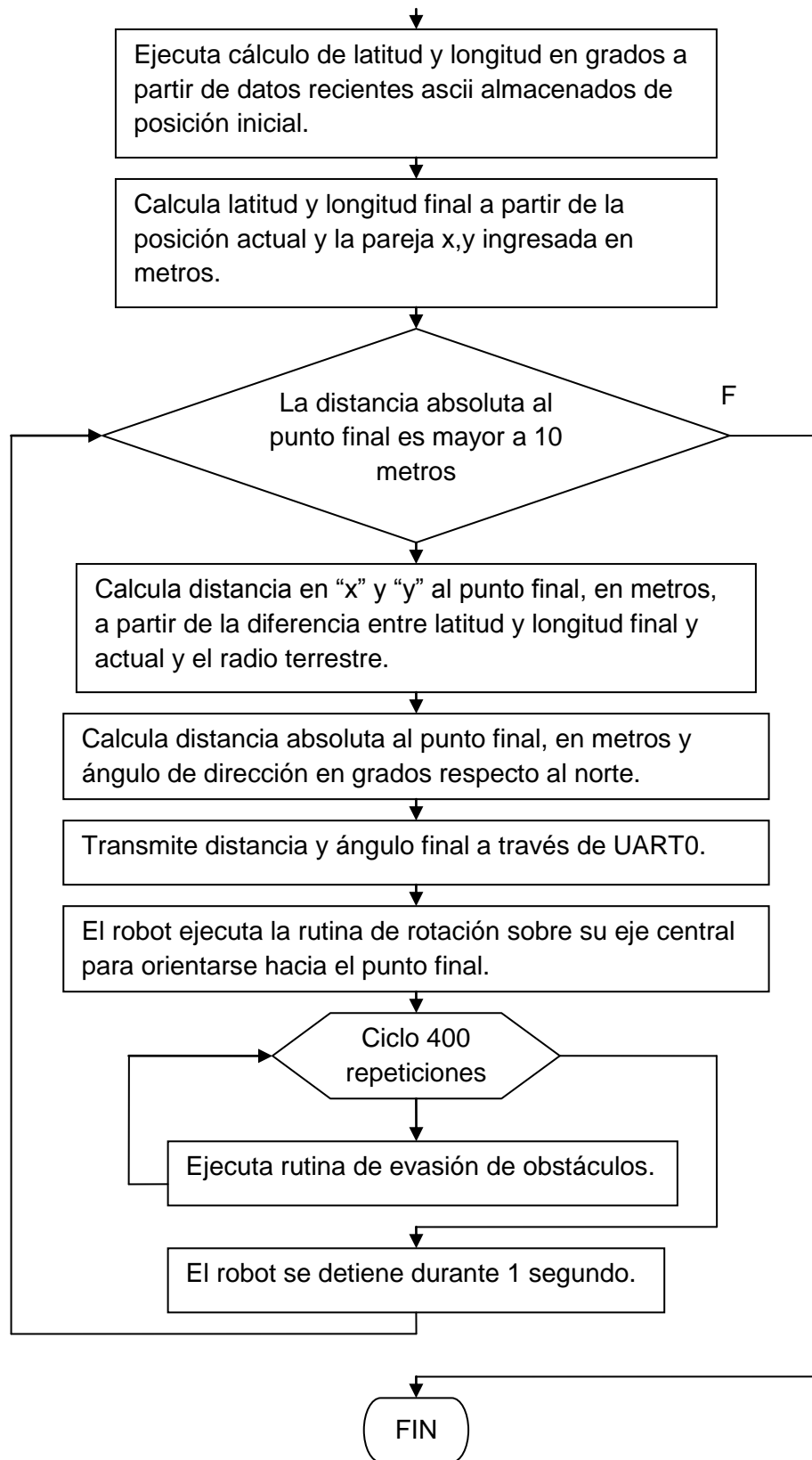


Figura 170. Diagrama de flujo general del programa.

La rutina de evasión de obstáculos emplea tres sensores, dos de infrarrojo (GP2D12) situados sobre los soportes de dirección de las ruedas delanteras para medir distancia izquierda y derecha, y uno de ultrasonido (SRF02) montado sobre un servomotor en la parte central delantera de la carrocería del robot.

El algoritmo de evasión empleado en la prueba está estructurado bajo tres condiciones básicas ejecutadas luego de leer los tres sensores:

- 1. La distancia izquierda o derecha es menor a 75 cm.** Si ambas distancias son menores a 75 cm se detiene el avance y de acuerdo a la cercanía del obstáculo se generan rutinas de evasión en forma de retroceso o giro diferencial. Si alguna de ellas es mayor a 75 cms se generan rutinas de evasión por medio de giros simples (ángulos de dirección menor a 70°).
- 2. La distancia central es menor a 450 cm.** Se realiza un barrido tipo radar tomando muestras cada 20° donde cada medida genera un vector de repulsión con magnitud inversamente proporcional a la distancia registrada y dirección inversa al ángulo de posición del sensor. El vector resultante de la suma de las componentes vectoriales de repulsión en el barrido es restado a un vector de atracción de magnitud fija (igual a la máxima magnitud de repulsión posible) con el ángulo del punto objetivo, la magnitud total resultante se escala de 0 a 50 para establecer la velocidad de desplazamiento y el ángulo total resultante establece la dirección de las ruedas. Es vital la lectura continua de los sensores laterales durante el barrido de radar, con el fin de evitar colisiones con objetos que se presenten de forma repentina, de darse este caso se detiene el móvil y se reinicia el algoritmo de evasión para ejecutar la

metodología más adecuada según la percepción del robot. La figura 171 ilustra la estrategia de evasión descrita.

- 3. Ninguna de las anteriores.** El robot se desplaza en línea recta hacia el punto final con velocidad del 50%.

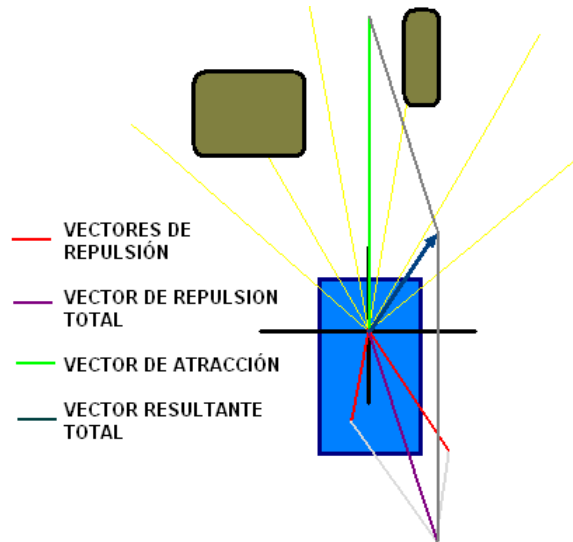


Figura 171. Estrategia de evasión tipo radar mediante vectores de repulsión.

Se ubicó el robot sobre una calle pavimentada libre de tráfico con obstáculos propios del área y artificiales para efecto de prueba. Se dieron como coordenadas objetivo para la prueba la pareja (-2,+35), que coincide con la esquina contraria de la calle. Los datos arrojados por el robot a través de la comunicación remota fueron los siguientes:

Posición Actual	0705.0348, N, 07306.4026, W,
(Distancia)	(Angulo)
0034	3486
0031	3476
0028	3493
0026	3482

0024	3474
0021	3459
0019	3369
0018	3358
0016	3318
0013	3089
0010	3076

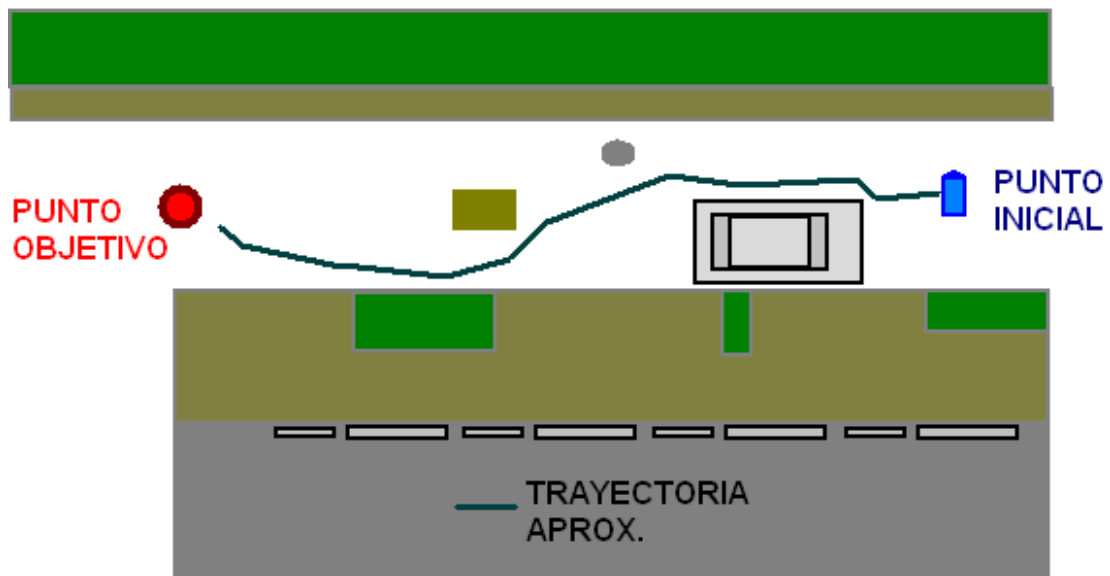


Figura 172. Ruta de navegación efectuada durante la prueba.

Conclusiones de la prueba:

- La irregularidad del terreno explorado demanda una eficiencia superior en la estrategia de evasión de obstáculos de manera que se requieren más elementos de percepción que le permitan al robot actuar frente a condiciones de bloqueo, desnivel agudo, peligro de volcadura o caída. La estrategia planteada tiene una eficiencia limitada debido a que el rastreo de largo alcance no incluye el eje z o altura de los obstáculos.

- La precisión de la brújula y su interacción con el GPS permiten dar una orientación rápida y mantener un curso continuo hacia el punto objetivo a pesar de las desviaciones provocadas por objetos cercanos a la trayectoria.
- El error del módulo GPS es manejable si se descartan como mínimo los 15 datos iniciales arrojados, se explora un área no menor a $50 \times 50 \text{m}^2$ y se da un rango de acierto mínimo de 5 metros de distancia absoluta.
- La rapidez, robustez y confiabilidad del algoritmo de navegación permiten realizar tareas de forma eficaz y eficiente sin generar riesgos para el prototipo. Los tiempos de respuesta de los dispositivos implementados son cruciales en el aumento de la capacidad de reacción del móvil ante eventos repentinos y permiten que la velocidad de navegación pueda ser incrementada.
- El tiempo de autonomía del prototipo es cercano a 80 minutos para ensayos que involucran todos los dispositivos de la plataforma básica operando y desplazándose en terrenos semiplanos.

CONCLUSIONES

- Por medio de este proyecto se desarrolló una herramienta que posibilitará la implementación de nuevas prácticas en cursos como: máquinas eléctricas, instrumentación electrónica, sistemas de control, inteligencia artificial y robótica móvil y que brindará la posibilidad adicional de realizar investigaciones con objetivos académicos, industriales o científicos. Básicamente se desarrolló una plataforma con el hardware y software de control necesario para la locomoción y se propuso el uso de algunos dispositivos de apoyo a la navegación como sensores de percepción, posicionamiento y orientación. Es probable que en un futuro estos últimos sean reemplazados por dispositivos más sofisticados y con mejor rendimiento, por lo tanto se dejó la posibilidad de adaptarlos fácilmente al hardware desarrollado.
- El robot es apto para la realización de prácticas en los ambientes externos de la universidad. Obviamente tiene unas limitaciones de funcionamiento y unas habilidades determinadas que deben ser tenidas en cuenta durante su utilización. De otra parte, la plataforma electrónica desarrollada lo hace apto para la implementación de diversas prácticas que involucren los elementos implementados, es decir, sensores infrarrojos, sensores de ultrasonido, brújula electrónica y GPS u otros que manejen los protocolos de comunicación I2C, SPI, UART y conversión analógico-digital.
- El desarrollo de dispositivos sofisticados de tipo electromecánico requiere integración de ingenieros mecánicos y electrónicos y un trabajo en equipo a lo largo de cada una de las fases del proyecto, diseño, fabricación y puesta en funcionamiento, para lograr la correcta interacción entre la

plataforma mecánica y el sistema de control. El trabajo de los ingenieros converge en múltiples puntos del proceso en los cuales se toman decisiones que van marcando el rumbo del proyecto y van definiendo pautas para el trabajo que cada uno puede desarrollar individualmente. Debe hacerse retroalimentación constante para verificar el cumplimiento de las decisiones tomadas y de los requerimientos de diseño establecidos.

- El uso de herramientas computacionales facilita enormemente el diseño y posibilita la elaboración de sistemas sofisticados. En cuanto al diseño mecánico, el uso del software CAD SolidWorks y del software CAE Ansys Workbench deben ir de la mano, generando diseños paramétricos que faciliten la verificación y optimización estructural del mismo.
- La construcción de las piezas de un sistema robótico requiere la utilización de máquinas de control numérico para garantizar la precisión de las mismas. Para facilitar la manufactura a este nivel, es indispensable contar con una herramienta CAM como MasterCAM, programa en el que fueron diseñados los procesos de mecanizado de la mayoría de las piezas del prototipo desarrollado.
- Este prototipo puede ser reproducido fácilmente gracias a la implementación de manufactura en CNC, pues ya se tienen los programas de mecanizado listos para ser utilizados nuevamente cuando se requiera. En cuanto a la parte electrónica, basta con reimprimir los circuitos diseñados y soldar todos los elementos adecuadamente.
- El desarrollo de una plataforma de control digital permite la ejecución de diversas aplicaciones en robótica u otras áreas. La selección de un dispositivo de procesamiento de gama alta permite manejar diferentes

puertos, buses y protocolos de comunicación para la adquisición y transmisión de información primordial para cada implementación realizada. La unidad de control como dispositivo individual puede ser utilizada para tareas que van desde la ejecución de ensayos básicos de lógica digital, hasta el control autónomo de robots móviles de diversas características morfológicas y funcionales.

- La construcción de interfases electrónicas para dispositivos de comunicación, genera una búsqueda detallada de alternativas de bajo costo y alta integración que apunta al desarrollo de prototipos eficientes y de tamaño reducido.
- La utilización de tecnología de localización y posicionamiento como el GPS constituye la base de conocimiento introductorio a la investigación de aplicaciones civiles e industriales. Los equipos de posicionamiento requieren de una precisión coherente con los requerimientos y objetivos de cada aplicación. Los costos de estos módulos son elevados si se requieren incertidumbres menores a decenas de centímetros. Cabe aclarar que al momento de implementar equipos de posicionamiento más eficientes y precisos en el robot desarrollado, no se requiere alterar el hardware ni software planteado, ya que se manejaron los estándares correspondientes para la adquisición de información de estos dispositivos.
- La eficiencia en el manejo de la potencia constituye un objetivo primordial en el diseño de cada uno de los esquemas y dispositivos electrónicos que integran un prototipo de robot móvil autónomo. El tiempo de autonomía energética de una hora en algunos casos limita el grado de dificultad de la misión o tarea a realizar por el móvil.

- El diseño de equipos como herramienta para la práctica de disciplinas técnicas, plantea la inclusión de aspectos importantes como lo son la usabilidad, ergonomía, reproducibilidad, estandarización, entre otros.
- En el diseño y ensamble de circuitos impresos se debe tener en cuenta factores que afectan su calidad y funcionalidad, debido al proceso de fabricación artesanal que se ofrece localmente.
- La generación de funciones y librerías de programación propias, facilita la configuración y manejo de cada uno de los módulos periféricos del microcontrolador y reduce el tiempo de programación de aplicaciones avanzadas sobre la plataforma construida, permitiendo al programador concentrarse en la lógica del algoritmo que esté implementando.
- Cada configuración sensorial para la percepción del entorno, proporciona una alta gama de alternativas para la programación de estrategias de evasión de obstáculos y exploración, elementales o avanzadas.
- La utilización de dispositivos de orientación y posicionamiento global permite la investigación e implementación de aplicaciones robóticas en ambientes externos. La navegación en este tipo de escenarios involucra múltiples factores que deben ser tenidos en cuenta en el desarrollo del diseño mecánico, hardware y software de control inteligente.

RECOMENDACIONES

- Dar continuidad a la línea de investigación en robótica móvil e invertir en el desarrollo de plataformas adicionales que permitan la implementación de un curso formal dirigido a estudiantes de la facultad de ingenierías físico mecánicas. La investigación debería mantenerse en ambos frentes, el desarrollo de hardware con el objetivo de construir plataformas cada vez más robustas y principalmente en el desarrollo de software de control y algoritmos de navegación inteligente.
- Estimular a los estudiantes para que participen activamente en el escenario de la robótica nacional, desarrollando robots para las competencias que se llevan a cabo en diferentes universidades del país.
- En proyectos posteriores de desarrollo de plataformas de locomoción para robots de exploración, hacer la selección de los motores con base en un requerimiento de torque igual a tres veces el torque que el móvil necesita para su desplazamiento, así como considerar una velocidad de navegación no superior a 50 cms/s. Esto asegura la superación de los obstáculos sin necesidad de tener un impulso inicial del móvil y velocidades coherentes con la rapidez de procesamiento y adquisición de señales de percepción del entorno.
- Implementar un control en lazo cerrado de la velocidad de los motores de tracción para mejorar el comportamiento de la plataforma ante la superación de los obstáculos. La implementación de controles de lazo cerrado aplicados a variables de locomoción como velocidad y ángulos de dirección se hace indispensable para la obtención de un vehículo móvil

flexible, más confiable y con mayores capacidades de adaptación a las irregularidades de terrenos exteriores.

- Para mejorar el comportamiento del sistema de dirección, se deben reemplazar los servos de dirección utilizados por los que realmente fueron seleccionados. Los servos seleccionados no pudieron ser implementados por su costo superior. Además, debe evaluarse el comportamiento de ruedas caster en cuanto a maniobrabilidad, confiabilidad del sistema de dirección y consumo de energía.
- Implementar un pack de batería adicional para la alimentación independiente de la unidad de control, con el fin de aumentar la autonomía energética del prototipo.
- Implementar un modulo GPS de mayor precisión y/o utilizar un GPS adicional estacionario para aprovechar la metodología de posicionamiento diferencial (DGPS) y así mejorar la eficiencia en la navegación autónoma del móvil.
- Se recomienda el estudio de alternativas de integración con dispositivos de procesamiento de alto nivel embebidos, los cuales permitan la evolución hacia algoritmos de navegación inteligente. Su interconexión puede darse a través del puerto de expansión de memoria o los buses de comunicación I2C o SPI, dispuestos en la tarjeta de control.
- Diseñar e implementar bumpers como elementos de protección de la plataforma y detectores de colisiones de bajo nivel que garanticen la integridad del prototipo.

FUTUROS TRABAJOS

- Desarrollo de una interface de supervisión y control del móvil, en la que se tenga acceso rápido a información recopilada por los diferentes elementos instalados sobre el mismo y facilite la transmisión de órdenes, planeación de tareas y seguimiento de puntos objetivos.
- Diseño y construcción de un manipulador acoplable a la estructura del prototipo, como herramienta para la ejecución de tareas más complejas y constructivas. De igual manera la implementación de controles manuales en la central de supervisión, que permitan la operación tanto de la plataforma móvil como del manipulador, para aplicaciones que requieran intervención remota.
- Implementación de accesorios de diagnóstico y supervisión de estado del prototipo, como indicadores de nivel de carga de batería, sensores de temperatura de los drivers de manejo de motores de tracción, indicadores de desniveles (inclinómetros, acelerómetros) para evitar el desplazamiento del móvil a través de terrenos con inclinaciones por encima de los rangos admisibles, entre otros.
- Desarrollar un sistema de programación remota del móvil. El microcontrolador utilizado brinda esta posibilidad.
- Desarrollo de algoritmos de navegación autónoma de alto nivel, basados en técnicas avanzadas de programación como las redes neuronales y los algoritmos genéticos.

- Implementación de un sistema de percepción de entorno basado en scanner láser que reemplace los sensores infrarrojos y de ultrasonido utilizados.
- Investigación en el campo de la visión artificial. Implementación de una cámara que capte las imágenes del entorno del robot y las envíe a una unidad de procesamiento exclusivamente dedicada al tratamiento de las mismas para generar ordenes al sistema de locomoción.
- Investigación en el campo de los robots cooperativos. Para esto es necesaria la construcción de plataformas adicionales.
- Desarrollo de plataformas con diferentes sistemas de suspensión para realizar estudios comparativos de los mismos. Desarrollar ruedas que mejoren la tracción del vehículo en terrenos arenosos y simultáneamente sirvan para absorber la energía de los impactos que pueda sufrir el mismo contra los obstáculos a superar o los causados por cambios bruscos de nivel (reingeniería de las ruedas de los MER de la NASA).

BIBLIOGRAFÍA

APOSTOLOPOULOS, Dimitrios. Systematic configuration of robotic locomotion. Final report. Reporte N°: CMU-RI-TR-96-30. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University (US): 1996 Jul.

CARRELLI, Ricardo, SECCHI, Humberto y MUT, Vicente. Algorithms for stable control of mobile robots with obstacle avoidance. Paper, Instituto de automatica (INAUT), Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

CHEMPLAVIL, Shaun y JAYARAMAN, Ramaprabhu. "TANKZILLA", University Of California, Riverside, USA, 2003.

DEUTSCHMAN, Aaron, MICHELS, Walter, WILSON, Charles. Diseño de máquinas teoría y práctica. Editorial CECSA "Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México". Novena reimpresión. México, 1999. Capítulo 10.

ELLERY, A, PATEL, N, RICHTER, L, BERTRAND, R, DALCOMO, J. Exomars rover chassis analysis & design. En: ISAIRAS 2005. International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space; 2005 Sep 5-9; Munich, Germany

ESTIER, T, CRAUSAZ, Y, MERMINOD, B, LAURIA, M, PIGUET, R, SIEGWART, R. An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities. Institute of Robotic Systems, EPFL (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne), Switzerland

FOLEY, Chris, HORN, Kris, PITTMAN, Richard y WILLIS, Michael. GPS navigation for field mobile robots. Texas A&M University, College Station, USA, 2004.

GARCÍA, Nelson y GONZALES, Melvin. Robot de exploración terrestre “GEOBOT”. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2003.

GONZALES, Javier y OLLERO, Anibal. Estimación de la posición de un robot móvil, Universidad de Malaga/Universidad de Sevilla, España.

GONZALES, Melvin y OJEDA, José. Robot móvil de vigilancia con sistema de omnivisión y navegación autónoma con GPS, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2005.

KUBOTA, T, KUNII, Y, KURODA, Y, et al. Japanese lunar robotics exploration by co-operation with lander and rover. Paper. Meiji University, Chuo University and The institute of space and astronautical science (Japan). *J. Earth Syst. Sci.* 114, No. 6, December 2005, pp. 777–785

KUNTSEVICH, S, BEKKER, D. “H2X - HUMMER H2” Explorer autonomous dual navigation system vehicle. Rochester Institute of Technology, New York, USA, 2006.

KURODA, Y, KONDO, K, NAKAMURA, K, KUNII, Y, KUBOTA, T. Low power mobility system for micro planetary rover “Micro5”. Meiji University, Chuo University and The institute of space and astronautical science (Japan). En: ISAIRAS 99. International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space; 1999 Jun 1-3. Noordwijk, The Netherlands.

LEE, C, DALCOLMO, J, KLINKNER, S, RICHTER, L, TERRIEN, G, KREBS, A, SIEGWART, R, WAUGH, L, DRAPER, C. Design and manufacture of a full size breadboard exomars rover chassis. En: 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2006, 28 – 30 November 2006 at ESTEC, Noordwijk, the Netherlands.

MATSUOKA, Masayoshi, ROCK, Stephen y BUALAT, Maria. Autonomous Deployment of a Self-Calibrating Pseudolite Array for Mars Rover Navigation. Paper, Aerospace Robotics Laboratory, Stanford University.

MILLER, D, RAVINE, M, BELL, J, MALIN, M. Semi autonomous rover operation: a Mars technology program demonstration. Malin Space Science Systems, San Diego, CA; Cornell University, Ithaca, NY; School of aerospace & mechanical engineering, University of Oklahoma, Norman, OK, 2002.

PATEL, N, SCOTT, G, ELLERY, A. Application of Bekker Theory for Planetary Exploration through Wheeled, Tracked and Legged Vehicle Locomotion. Surrey Space Centre, University of Surrey, Guildford, UK.

PINILLA, Albeiro, CARVAJAL, Omar, MORALES, Hernando, ERASO, Fabio. Diseño y construcción de un sistema robótico modular que permita la configuración de distintos robots móviles programables, proyecto interdisciplinario desarrollado entre la escuela de diseño industrial y la escuela de ingeniería electrónica. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, UIS. 2006.

PROVENZO, José et al. Estructuras mecánicas especiales. Trabajo realizado para la asignatura de micro robots de la Universidad de Alcalá. Universidad de Alcalá, España. 2006

RCL. Engineering support on rover locomotion for exomars rover phase A – “ESROL - A”. Executive summary prepared for the European Space Agency. Science & Technology Rover Company Ltd (RCL). 2004 Dec 13.

ROJAS, Hernán. Manual de Ajustes y tolerancias. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica.

SHIGLEY, Joseph, MITCHELL, Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica. Tercera edición en español. Editorial McGraw-Hill. Mexico, 1985. Página 874.
SIEGWART, Roland, NOURBAKHSH, Illah. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 2004. 321p.

USHER, Kane. Obstacle avoidance for a non-holonomic vehicle using occupancy grids. Paper, Autonomous Systems Laboratory, CSIRO ICT Centre, 2006.

WANG, SL. Case studies on NASA Mars rover’s mobility system. Paper, Department of Mechanical Engineering, North Carolina A&T State University, Greensboro (US): 2000

ZIDEK, Kamil. “USABILITY OF GPS SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTS NAVIGATION”, Technical University of Kosice, Slovakia.

ANEXO A. Manual del usuario

VENOM

MANUAL DE USUARIO.



INTRODUCCIÓN

El prototipo de robot móvil presentado sirve como herramienta para la práctica e investigación en robótica móvil sobre terrenos exteriores. Como plataforma básica está compuesta por un cuerpo escualizable provisto de mecanismos de tracción y dirección, adecuados para su desplazamiento en terrenos irregulares. Una etapa de manejo de potencia de alimentación y de suministro a los actuadores de desplazamiento y una etapa de control reprogramable con interfaces a diferentes periféricos. En el presente documento se exponen características relevantes tanto de su hardware como software que facilitan una rápida implementación.

CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO

- ✦ Estructura en aluminio con alta resistencia y bajo peso.
- ✦ Alta tracción en sus ruedas tipo todo terreno.
- ✦ Sistema de dirección independiente servo controlada.
- ✦ Tracción independiente en sus seis ruedas.
- ✦ Sistema de suspensión adaptable a terrenos irregulares.
- ✦ Mecanismo diferencial para nivelación del cuerpo.
- ✦ Batería recargable libre de efecto memoria.
- ✦ Reguladores de tensión de alta eficiencia.
- ✦ Sistema de detección de obstáculos con sensores de distancia ópticos y ultrasónicos.
- ✦ Sistema de posicionamiento global GPS y orientación mediante brújula electrónica.
- ✦ Sistema de comunicación inalámbrica bidireccional con tecnología ZigBee.
- ✦ CPU reprogramable multipuerto, con memoria expandible.

ELEMENTOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO

ELEMENTO	CANTIDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
LLanta	6	Pro Line 1075	Labrado en V, diámetro externo 140mm, ancho 84mm.
Rin	6	P1.00	Fabricado en Aluminio, diseño original
Motores de Tracción	6	GHM-04	Motores DC con caja a 7.2V, 175 RPM.
Servomotores	5	HS-322HD	Servomotores de 180º de excursión, alimentación de 4.8V-6V, torque de 3Kg.cm.

Conjunto Barras de suspensión	2	P1.02	Platinas de aluminio base del sistema de dirección y suspensión del móvil
Mecanismo diferencial	1	P1.03	Mecanismo de engranajes rectos en bronce y chumaceras con rodamientos
Chasis	1	P1.04	Estructura en perfil cuadrado de aluminio.
Batería	1	Tenergy 9.6V/4500mAh	Batería recargable de NiMh, 700g.
Circuito Impreso de Potencia	1	P1.05	Tarjeta doble cara en fibra de vidrio con capa protectora. Provista de tres puentes H duales integrados.
Circuito Impreso de Control	1	P1.06	Tarjeta doble cara en fibra de vidrio con capa protectora. Provista múltiples conectores y microcontrolador en montaje superficial.
Modulo GPS	1	EM-406	Modulo GPS encapsulado con conector de 6 pines
Brújula electrónica	1	CMPS03	Circuito impreso con procesador integrado y sensores hall
Modulo inalámbrico abordo	1	P1.07	Circuito impreso base del Xbee Pro e interfase con el controlador
Modulo inalámbrico estacionario	1	P1.08	Circuito impreso base del Xbee Pro e interfase con el PC
Sensores infrarrojos	2	GP2D02YK	
Sensores ultrasónicos	2	SRF02	
Cargador de batería	1		
Cubiertas en fibra de vidrio	2		

ELEMENTOS ADICIONALES PARA SU OPERACIÓN

- Programador AVR ISP (Figura 183)
- Cable serial
- Computador
- CD de Instaladores: AVR Studio 4 y WinAVR (Descarga gratuita)
- Driver sistema USB
- Llaves bristol
- Fuente de alimentación 7,5-9 V DC, 500mA

REQUERIMIENTOS INFORMÁTICOS MÍNIMOS

- Procesador 512 MHZ (recomendado pentium)
- RAM 16 MB
- Espacio libre de disco duro 20MB
- WINDOWS 95/98/2000/XP
- Puerto RS-232C o USB

INICIO RAPIDO

El robot se encuentra programado con una rutina de diagnostico que envía información de todos los periféricos conectados a través del modulo de comunicación inalámbrica. Para el funcionamiento del programa de prueba es indispensable tener conectados todos los módulos periféricos y el modulo remoto RS232 conectado al puerto serial del computador como se muestra en la figura 1.

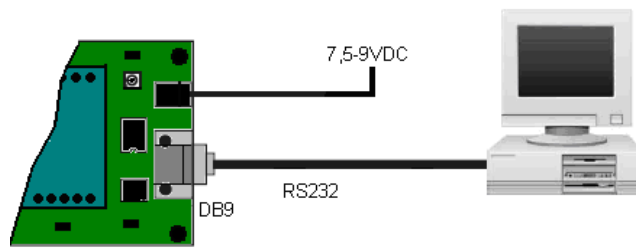


Figura 1. Conexión entre el PC y el módulo de comunicación inalámbrica.

DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

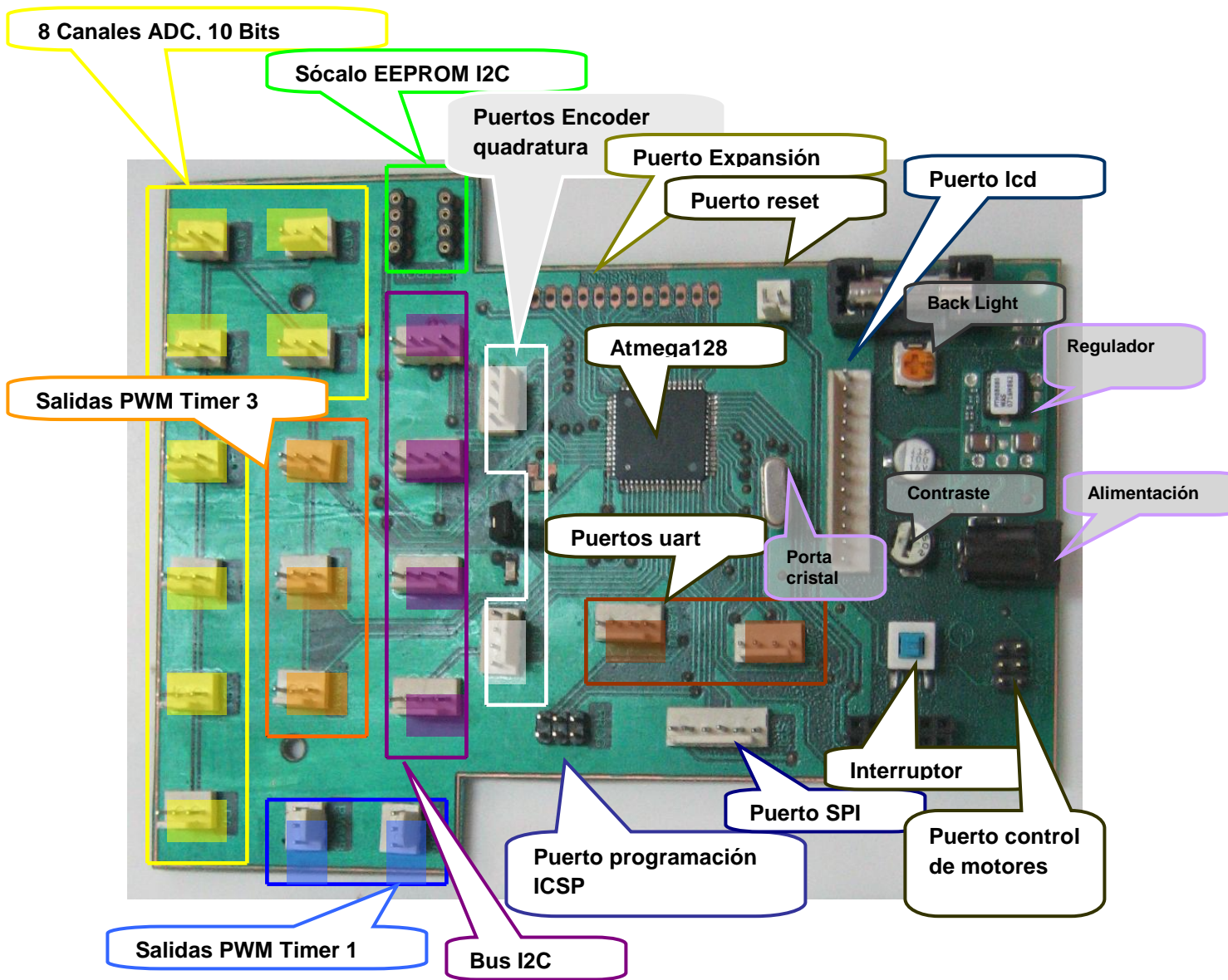


Figura 2. Distribución de componentes y puertos sobre la tarjeta de control

Es posible segmentar la tarjeta de control en los siguientes subsistemas:

ALIMENTACIÓN: la etapa de alimentación eléctrica está compuesta básicamente por la entrada de tensión continua con un rango admisible de entre 6,5 y 12 volts (La polaridad de conexión es mostrada en la figura 3). El regulador conmutado de tensión ajustado para entregar una salida de 5VDC (el esquema de implementado para la regulación es mostrado en la figura 4) y un fusible como protección al regulador.



Figura 3. Polaridad de la conexión de alimentación de la tarjeta de control.

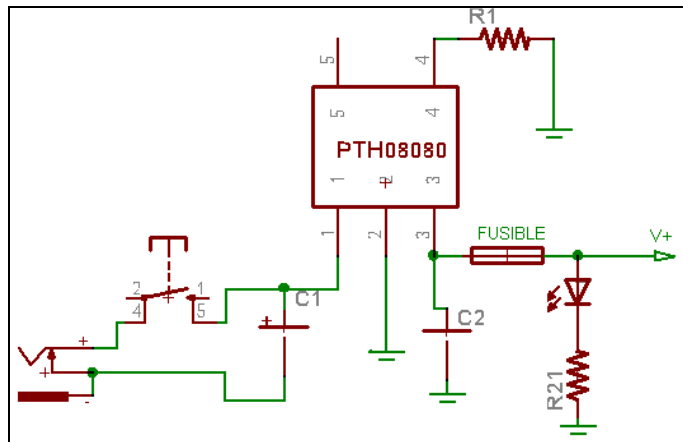


Figura 4. Esquema implementado para la regulación.

PUERTO DE CONVERSIÓN ANALÓGICA: está compuesto por 8 canales de conversión de 10 bits con conexión de 3 pines y filtro pasa bajas dispuestos como lo muestra la figura 5.

PUERTO DE BUS I2C: para la adquisición de datos de dispositivos que operan bajo el estándar de comunicación I2C, se tienen conectados todos

ellos a dos hilos, el de datos SDA y el de sincronismo SCL, donde el microcontrolador cumple el rol de maestro. La conexión de los puertos disponibles se encuentran conectados de la manera que muestra la figura 6, las resistencias de elevación a 5V se encuentran instaladas cerca a los pines del controlador.

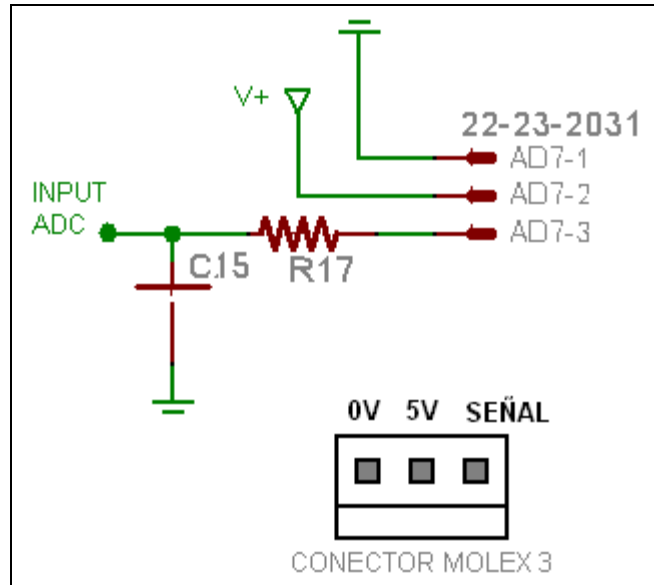


Figura 5. Puertos de conversión analógica.

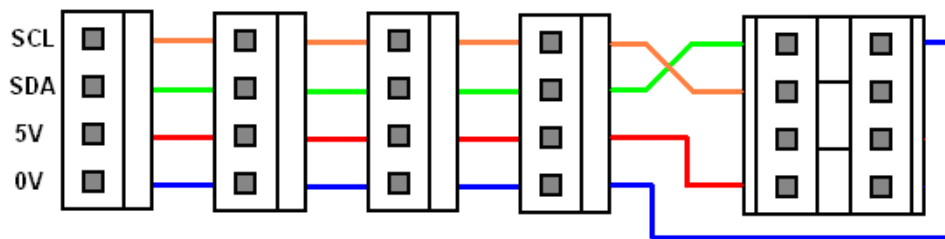


Figura 6. Puerto de bus I2C.

⚡ PUERTOS DE SALIDA PWM: para el control de servomotores o cualquier dispositivo que requiera señales de PWM o temporizadas, se dispone del timer 1 con 2 canales (OC1A y OC1B) y el timer 3 con 3 canales (OC3A, OC3B y OC3C). Cada canal tiene una conexión de tres

pinos idéntica a la de entrada analógica, que coincide con el estándar de conexión de un servomotor común. Los timer 0 y 2 de 8 bits fueron destinados para el control de velocidad de cada grupo de ruedas laterales, de modo que se encuentran ubicados en el conector de señales dirigido a la tarjeta de manejo de potencia de los motores de tracción (figura 7).



Figura 7. Puerto de salida PWM.

PUERTOS UART: para realizar la comunicación con dispositivos que requieran el estándar UART como lo es el módulo inalámbrico o el módulo GPS, el microcontrolador cuenta con dos puertos de este tipo, en la figura 8 se muestra la disposición de pines para aplicación de estos módulos.

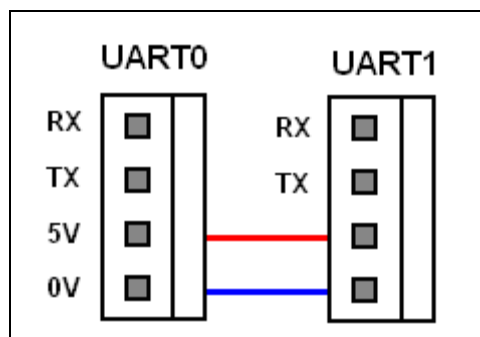


Figura 8. Puertos UART (serial).

PUERTOS PARA LECTURA DE ENCODER: para la aplicación de encoders de cuadratura se habilitaron dos puertos de conexión (derecho

e izquierdo), que cuentan con dos canales de entrada a puerto digital. En la figura 9 se muestra la distribución de pines sobre la tarjeta de control para su conexión.

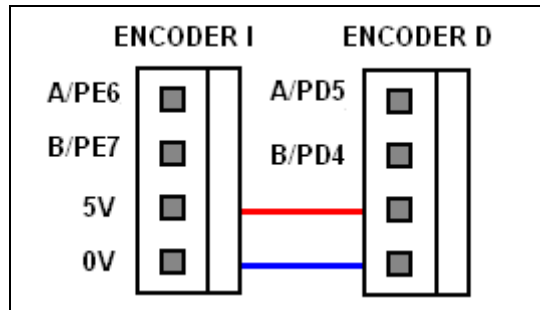


Figura 9. Puertos para lectura de encoder.

PUERTO PARA LCD: Se dispuso de un puerto para el manejo de una pantalla LCD alfanumérica de 2x16 caracteres, mediante transmisión de datos en 4 bits. Se incluyó 2 trimmers para el ajuste de contraste y backlight. Para la implementación de este elemento se presenta la asignación de pines en la figura 10.

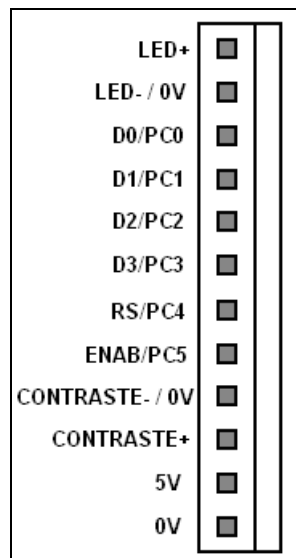


Figura 10. Puerto para LCD.

La tarjeta de manejo de potencia (figura 11) permite la distribución de la alimentación. Existen puertos marcados para la conexión directa de la batería, para la conexión del cargador a través de un conector fijado a la carcasa del robot, un puerto de tres pines es conectado a un switch de dos polos donde en estado apagado conecta la batería con el cargador y en estado encendido la conecta a la carga, esto se muestra en la figura 12.

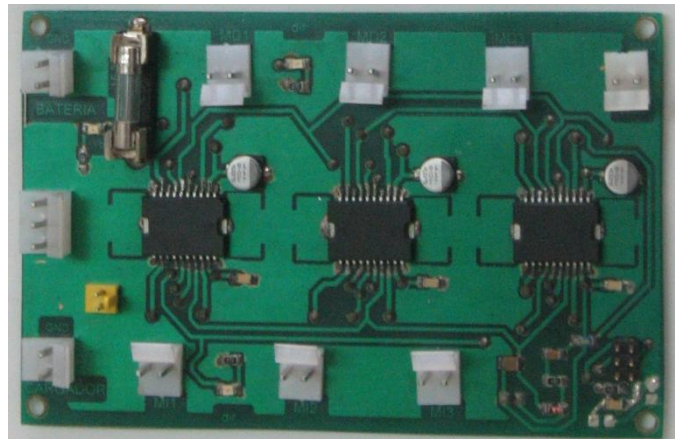


Figura 11. Tarjeta de manejo de potencia.

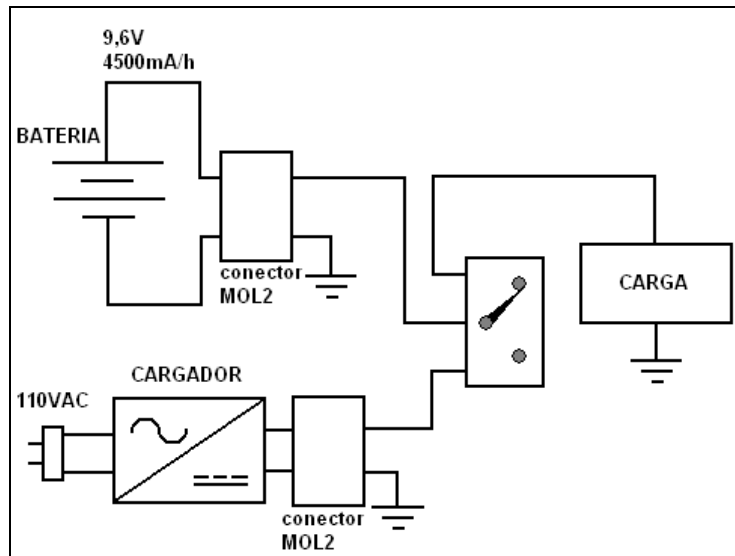


Figura 12. Esquema del switch on – off del robot.

- La distribución de pines de señales de control sobre esta tarjeta es idéntica a la mostrada en la figura 174. El fusible instalado es una protección de la batería, de ser reemplazado no debe exceder los 20 A de corriente de ruptura.
- El pin de habilitación de los puentes h integrados es conectado al reset del microcontrolador para evitar el movimiento del vehículo durante la programación de la memoria flash.
- La conexión de los motores de cada lado del móvil puede hacerse sin ningún orden específico debido a que son controlados con la misma señal de PWM.
- La alimentación de la tarjeta de control es extraída de la batería mediante un puerto marcado. Una forma de extender el tiempo de autonomía del robot es incluir una batería adicional para la alimentación de la tarjeta de control. Esta batería extra puede tener una tensión entre 6.5 y 10 Voltios y una carga de 1800 a 2500 mA/h.

DESPIECE MECÁNICO

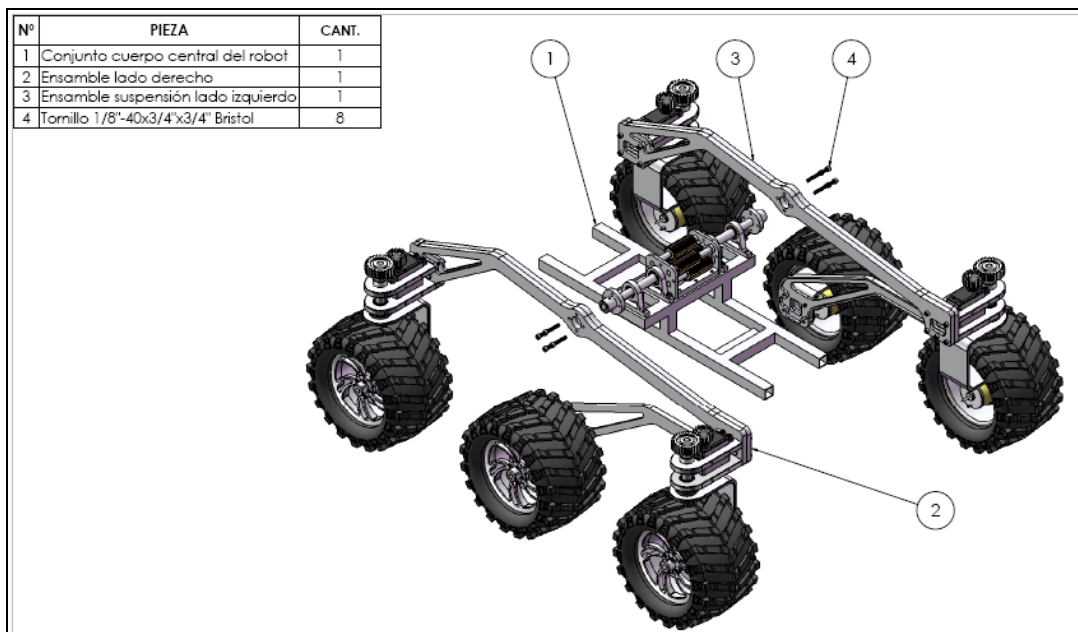


Figura 13. Ensamble general

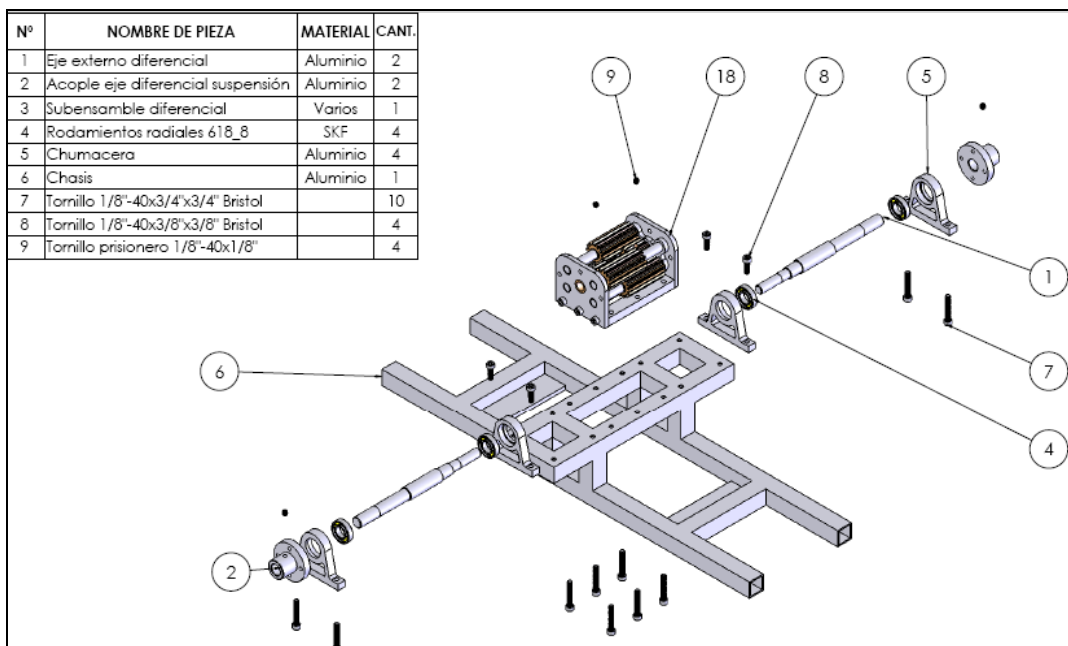


Figura 14. Ensamble del sistema diferencial

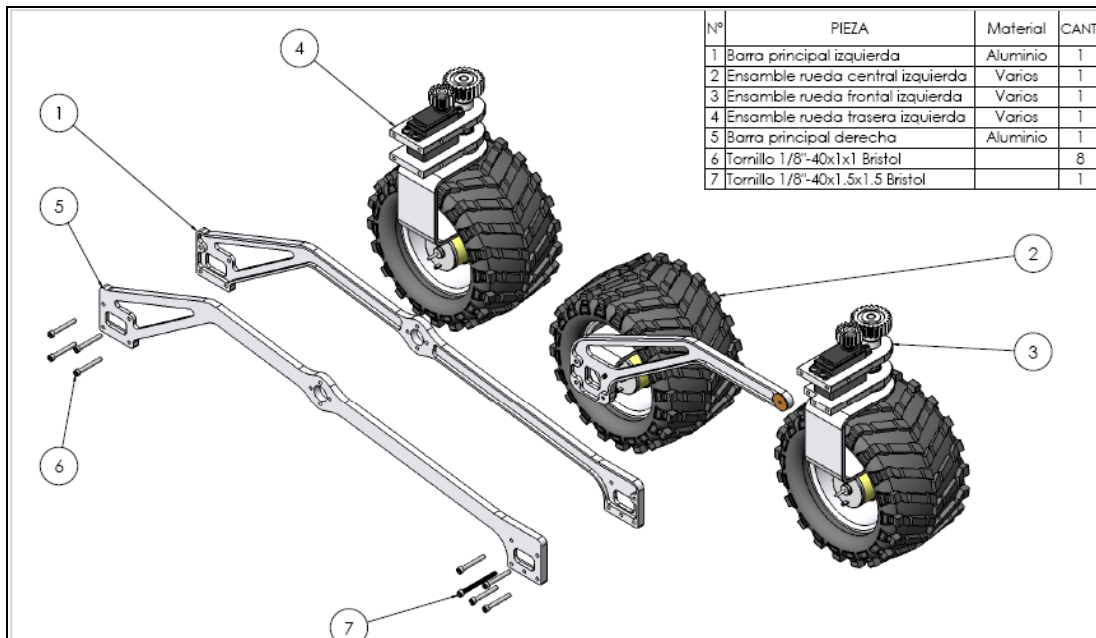


Figura 15. Ensamble de sistema de suspensión

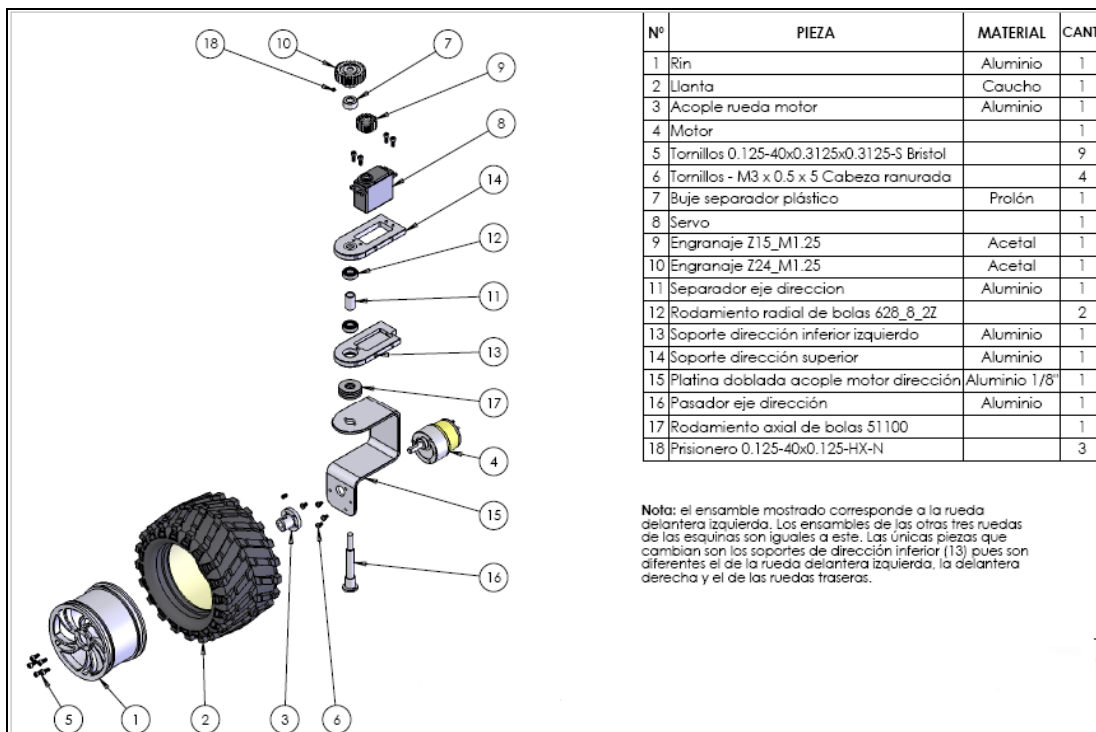


Figura 16. Ensamble de sistema de dirección

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Para una implementación rápida de cada uno de los dispositivos se encuentran programadas funciones en código C, distribuidas en librerías. Existen dos tipos de librería, las básicas dedicadas a la obtención o transmisión de datos a través de protocolos o procedimientos generales y las librerías que realizan procesos partiendo de las funciones básicas y generan comportamientos sobre la plataforma.

LIBRERÍAS BÁSICAS:

↻ ADC.H: para manejo de conversión analógica.

`AD_conver(#puerto)`; función de tipo entero sin signo que configura los registros del conversor y selecciona el puerto, realiza la conversión y la guarda en el registro D de 16 bits para retornarla como resultado.

↻ I2C.H: para adquisición de datos mediante bus I2C, ejecuta cada una de las etapas del protocolo.

`I2C_start()`; función de tipo void que genera la condición de start en el bus.

`I2C_stop()`; genera la condición de stop en el bus.

`I2C_enviar(Direccion)`; realiza el envío sobre el bus de una palabra de 8 bits.

`I2C_recibir()`; función de tipo carácter sin signo que recibe una palabra puesta en el bus por el esclavo, para retornarla como resultado.

🔩 PWM.H: Configura los módulos temporizadores para la generación de señales PWM.

PWM8_config(Fclk,Fo,sel); configura el timer 0 y timer 2 de 8 bits como salida PWM, ingresando la frecuencia del cristal empleado (Fclk), la frecuencia de salida requerida ($Fo < 65\text{KHz}$) y el número de timer (0,2).

PWM8(CU,sel); genera la salida de PWM con frecuencia de 10kHz, con el ciclo útil requerido, en el canal argumentado 'sel' (0,2).

PWM16_config(); configura el timer 1 y timer 3, de 16 bits como salida PWM, con un preescalador de 8.

PWM16(per,pul,sel); arranca el timer 1 o timer 3 con 'per' como valor de conteo de periodo (16bits), 'pul' como valor de conteo del ancho del pulso (16bits) y 'sel' como selector entre salida 'A' y 'B' del timer 1 y 'C', 'D', 'E' del timer 3.

servo(sel,ang); genera una señal de PWM a 50Hz para el control de posición de servomotores, 'sel' es el selector de canal ('A' y 'B' del timer 1 y 'C', 'D', 'E' del timer 3) y 'ang' es el valor de ángulo requerido entre 0 y 180°.

🔩 Ascii.h: Realiza la transformación de una variable tipo entero, en su representación ascii.

ascii(dist); devuelve en los registros n3,n2,n1,n0 cada uno de los códigos ascii que componen el valor de la variable dist.

🔩 SCI.H: configura los puertos UART 0 y UART 1. permite la transmisión y recepción de datos en forma serial.

Tx_Char('A',sel); realiza el envío del código ascii de la letra argumento, en este caso la A. El argumento 'sel' (0,1) direcciona la acción al puerto 0 o 1.

Tx_Cadena("ERA",sel); realiza el envío de los código ascii de la cadena de caracteres ingresada.

Rx_Char(sel); función tipo caracter sin signo que recibe el byte, lo almacena y lo devuelve como resultado.

SCI_config(fHz,Baud,sel) configura en modulo para una frecuencia de cristal y rata de comunicación en baudios.

🔗 LCD.H: para manejo de pantalla alfanumérica de 2x16.

ini(); realiza la rutina de inicialización de la LCD.

posicion(fila,columna); selección de posición del puntero para escritura.

letra('A'); escritura de una letra en la posición anterior.

palabra("Atmel"); escritura de la cadena de caracteres en la posición indicada.

desplazar(#lugares); desplaza los caracteres escritos a la derecha, el numero de lugares deseados.

LIBRERÍAS COMPUESTAS:

↗ IR.H: efectúa cálculos de distancia mediante la caracterización realizada a sensores de infrarrojo. Utiliza la librería adc.h para la lectura de puerto.

IR_2yk(canal) función de tipo entero sin signo que devuelve la distancia en décimas de cms, de un GP2Y0A02YK conectado al canal AD argumentado.

IR_2d12(canal) devuelve la distancia en décimas de cms, de un GP2D12 conectado al canal AD argumentado.

↗ CMPS.H: para la adquisición del ángulo de desviación respecto al norte de la brújula CMPS03. Esta librería utiliza la I2C.h como base para la comunicación.

CMPS03(); Función de tipo entero sin signo que recibe el dato de orientación como dos byte y la devuelve como entera en el rango de 0 a 3600 grados.

↗ SRF.H: par la configuración y medición de distancia de sensores ultrasónicos srfo2 o srf08. Esta librería utiliza la I2C.h como base para la comunicación.

SRF08(dir) función de tipo entero son signo que devuelve la distancia del sensor medida en cms, ingresando la dirección de dispositivo en el bus i2c.

SRF_direc(diri,dirf) Cambia la dirección de dispositivo, ingresando la dirección inicial y la dirección final deseada.

↻ GPS.H: Para la conversión de los caracteres recibidos del GPS en valores de latitud y longitud tipo flotante, en radianes.

Lat(gp); función de tipo flotante que devuelve el valor del ángulo de latitud como flotante en radianes. El argumento es un vector tipo caracter de 25 posiciones donde debe estar almacenada el tramo de cadena de caracteres que corresponde con la latitud y longitud del comando GPRMC.

Lon(gp); función de tipo flotante que devuelve el valor del ángulo de longitud como flotante en radianes. El argumento es un vector tipo caracter de 25 posiciones donde debe estar almacenada el tramo de cadena de caracteres que corresponde con la latitud y longitud del comando GPRMC.

↻ VENOM.H: para el control de la locomoción de la plataforma mecánica. Esta librería utiliza la PWM.h como base.

VENOM(vel,dir); Esta función realiza el control de dirección de los servos y de velocidad de cada grupo de ruedas para lograr un desplazamiento uniforme. La velocidad introducida esta en los rangos enteros de -100 a -20, 0 y 20-100, valores por fuera son aproximados al límite más cercano en cada rango. La dirección introducida es en grados y esta en un rango de -80 a 80, donde valores negativos generan un giro a la izquierda y positivos a la derecha, valores superiores a 80 producen un giro diferencial sobre el eje central del móvil ubicando las ruedas en dirección correcta para evitar deslizamiento.

PROGRAMACIÓN

Para la programación de aplicaciones se requiere ejecutar los pasos descritos a continuación:

- **Primer paso:** instalar los programas requeridos para la edición, simulación y compilación del programa en C. Los instaladores necesarios pueden ser descargados gratuitamente. Ejecute el archivo “WinAVR-20070122-install.exe” y siga los pasos indicados. Ejecute el archivo “aStudio4b528.exe” y siga los pasos mostrados por el asistente de instalación.
- **Segundo paso:** abrir el software AVR Studio 4, generar un proyecto nuevo como AVR GCC y seleccionar la plataforma a utilizar como lo muestra la figura 17 y 18.

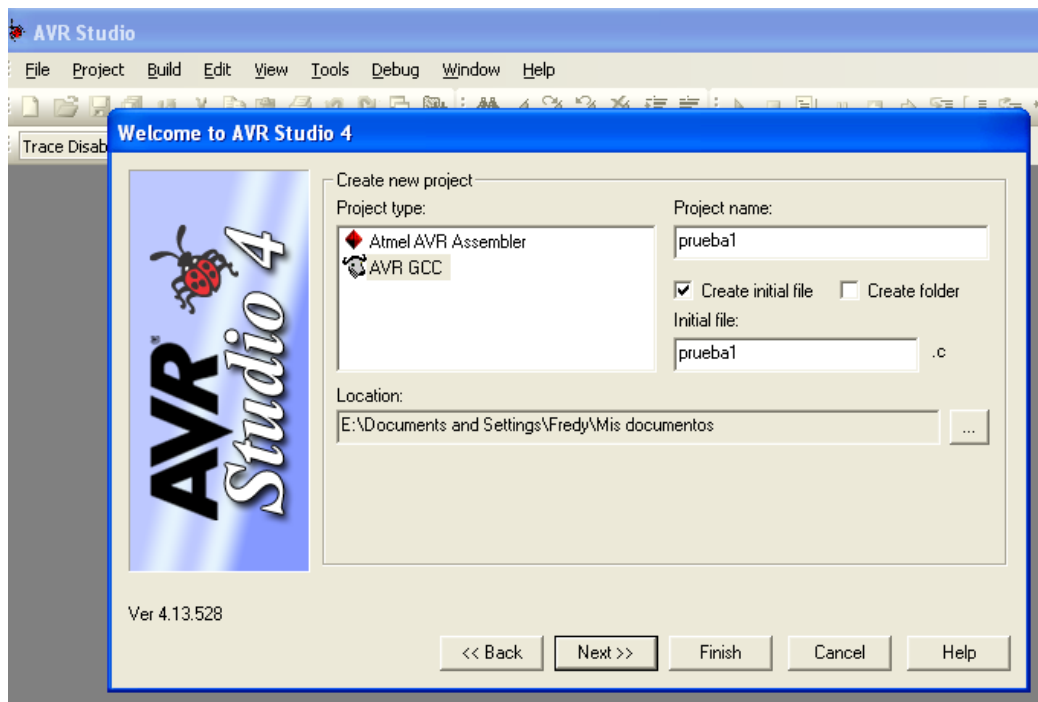


Figura 17. Generar un proyecto nuevo en AVR Studio.

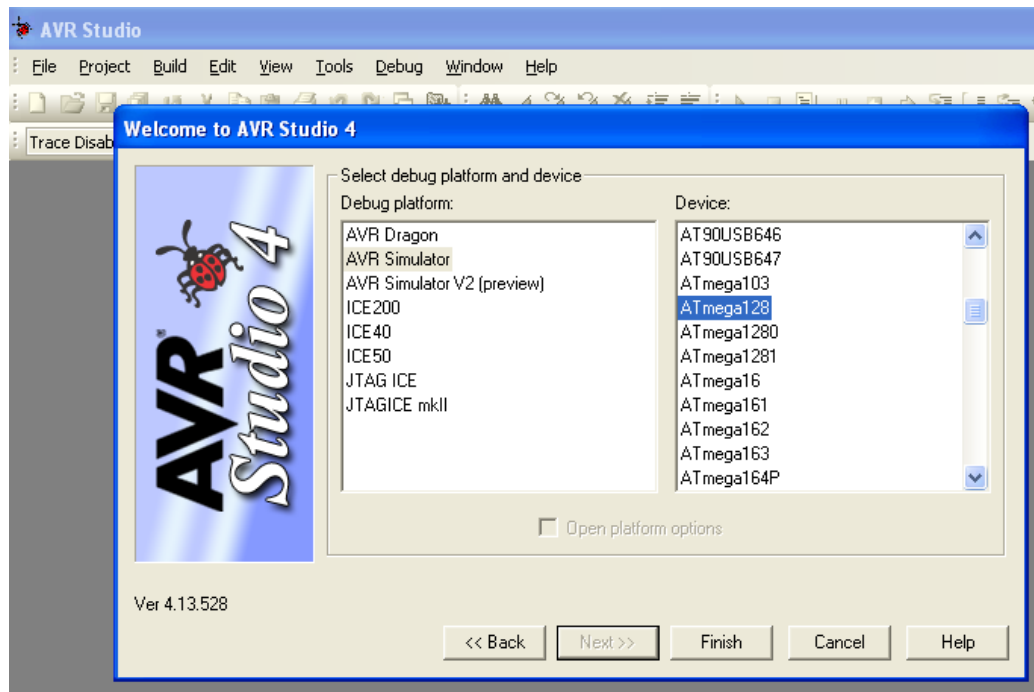


Figura 18. Seleccionar el microcontrolador a quemar.

➤ Tercer paso: Incluir las librerías a utilizarse en el archivo “.C” en blanco generado por el programa, como es mostrado en el siguiente ejemplo:

```
#include <avr/io.h> // indispensable para todo programa
#include <avr/interrupt.h> // manejo de interrupciones
#include <math.h> // manejo de funciones trigonométricas
#include "SCI.h"
#include "ADC.h"
#include "IR.h"
//Declaración de Variables:
unsigned char gp[25];
int distancia;
// Función principal:
void main()
```

```
{  
// escriba su programa aquí.  
}
```

Cabe aclarar que el archivo .C base para el código, es generado con el mismo nombre que el proyecto y está ubicado en la misma carpeta donde se creó este.

Cuarto paso: luego de escribir el código deseado, ejecute el comando de compilar con la herramienta mostrada en la Figura 19.

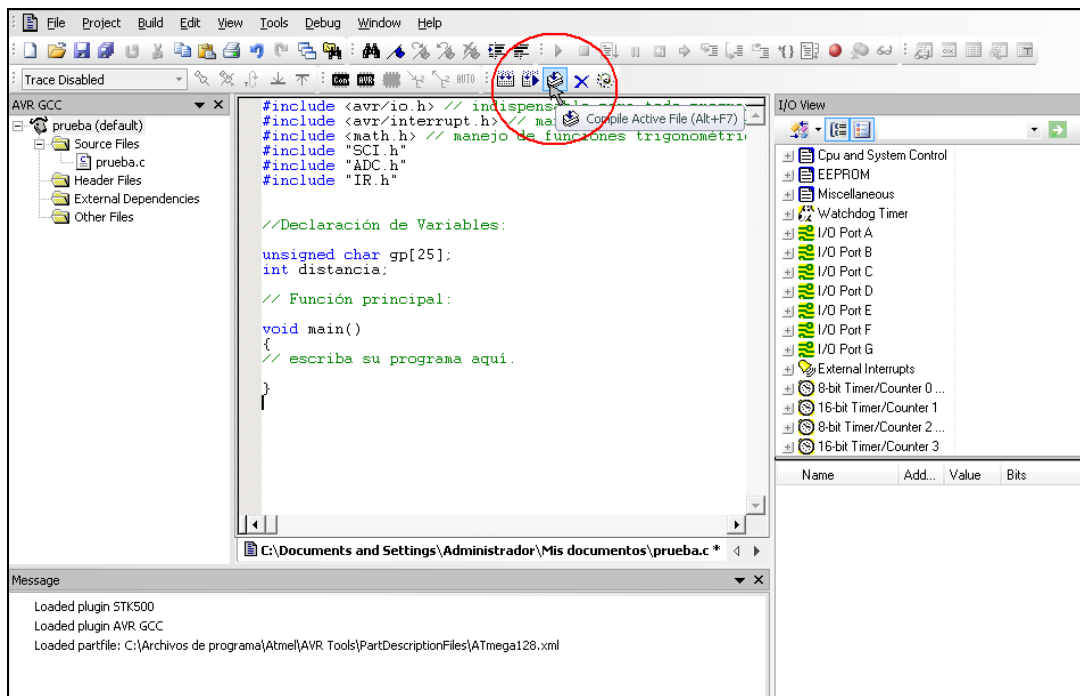


Figura 19. Compilación del programa desarrollado con el AVR Studio.

Nota: es importante tener en cuenta que los archivos de librerías a utilizarse deben ser copiados a la carpeta donde se generó el proyecto.

Quinto paso: para cargar el programa sobre el microcontrolador abordo se debe conectar la tarjeta programadora a la interfase ISP del robot como se muestra en la figura 20. Con el robot encendido se procede a escoger el puerto de comunicación a utilizar para el proceso de transferencia pulsando el icono "CON" mostrado en la figura 21.

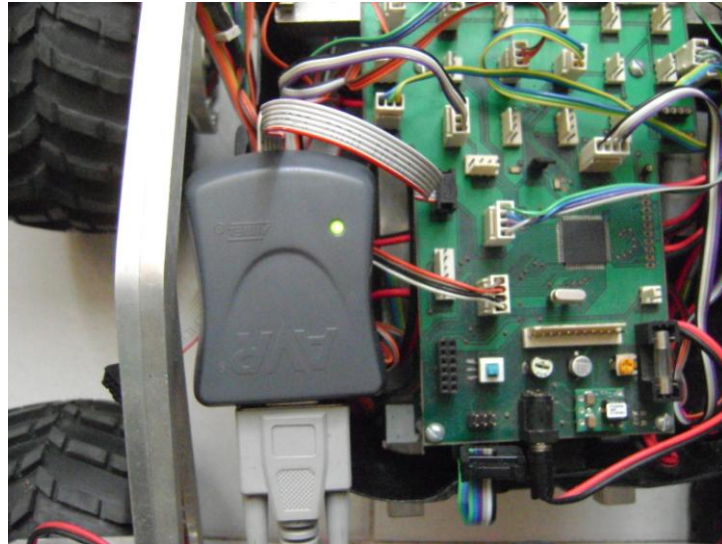


Figura 20. Conexión entre la tarjeta quemadora y la controladora.

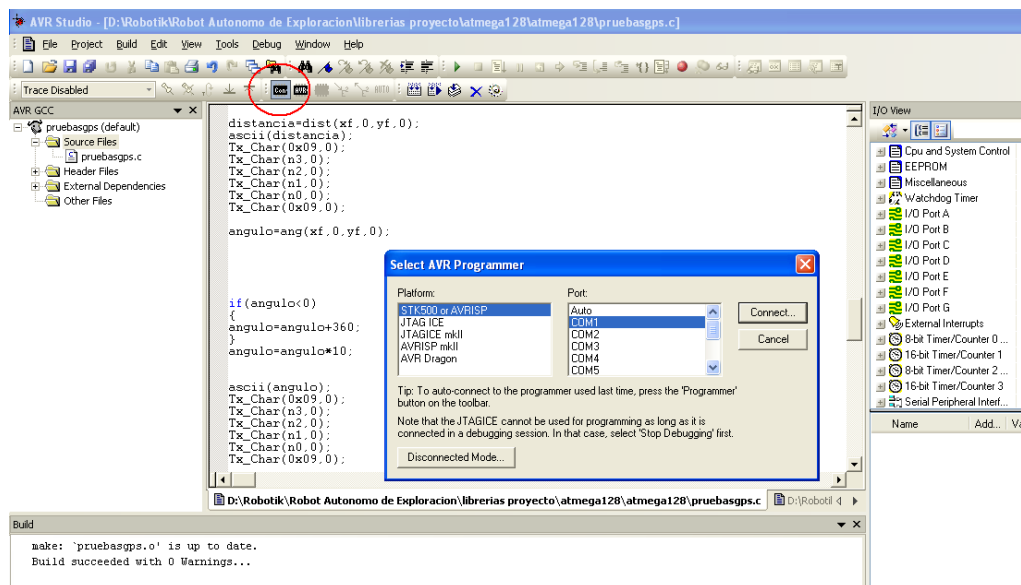


Figura 21. Selección del puerto de comunicación para quemar la tarjeta.

Se selecciona el puerto y se pulsa “connect”, luego de lo cual se establece la comunicación y se despliega la ventana que permite la configuración de la transferencia.

Sexto paso: se selecciona del archivo .HEX que se requiere cargar sobre la memoria flash del microcontrolador como se muestra en la figura 22. Se pulsa el botón “program”. En la parte inferior de la ventana se registran los eventos presentados en este proceso.

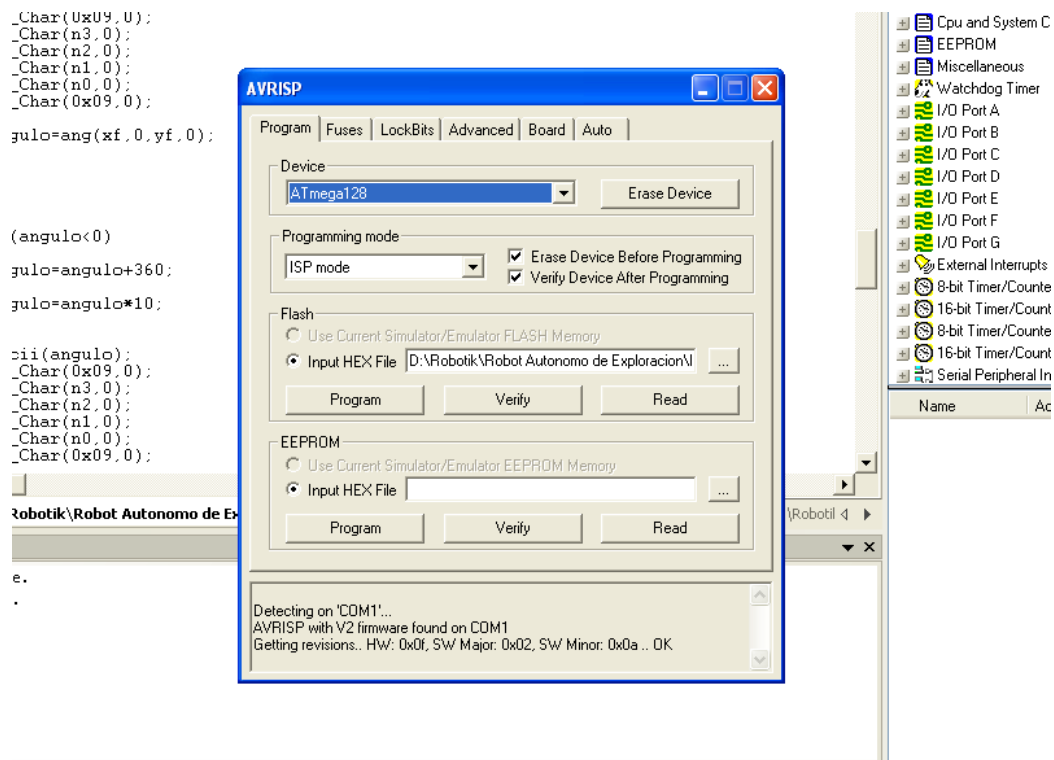


Figura 22. Sexto paso.

La ventana presentada también permite realizar la configuración de los fusibles del controlador que intervienen en la velocidad de trabajo entre otros parámetros importantes para la ejecución del código cargado.

RECOMENDACIONES DE USO DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA

A continuación se mencionan algunos aspectos que se deben tener en cuenta para la utilización del robot:

- El límite de carga útil es de 3 kgf.
- La carga de la batería puede durar hasta una hora cuando el robot es sometido a trabajo continuo en terreno plano.
- El sistema de locomoción le permite superar obstáculos de hasta 14 cm de altura siempre y cuando el robot tenga impulso cuando haga contacto con el obstáculo.
- A pesar de que el robot fue diseñado para resistir impactos es recomendable evitar que estos sucedan.
- Cuando se desee ubicar sobre el cuerpo del robot elementos adicionales y de peso considerable deben tratar de distribuirse de tal forma que el centro de gravedad siga manteniéndose cerca del centro geométrico del robot.
- Hay que tratar de mantener una distribución uniforme del peso en las cuatro ruedas de las esquinas para evitar hundimientos desiguales cuando se desplace sobre terrenos arenosos.
- Antes de utilizar el prototipo debe verificarse el ajuste de los tornillos de la estructura.
- En el inicio de los programas es recomendable ejecutar la función de control de la locomoción del móvil con argumentos de velocidad y ángulo de dirección cero, tal como se muestra a continuación: VENOM(0,0); esto debe hacerse con el fin de verificar la alineación de las ruedas, cada vez que el robot se encienda.
- Es posible que cuando el robot sufra un golpe fuerte en alguna de sus ruedas de dirección, estas se desalineen. Si esto ocurre, debe apagarse el

robot y encenderse de nuevo para que los servos se desplacen a su posición media y poder hacer la alineación manual de la rueda aflojando y posteriormente apretando los tornillos prisioneros del engranaje plástico montado sobre el eje de dirección.

- El sistema de suspensión no está diseñado para que el robot suba o baje escaleras, solo puede subir o bajar escalones individuales de hasta 14 cm.

USOS POSIBLES

El robot puede ser utilizado en la implementación de prácticas que incluyan:

A. Ejecución de rutas predefinidas: el móvil realiza movimientos con velocidades y direcciones controladas describiendo rutas previamente definidas por el usuario según el algoritmo programado. Esto se puede combinar con las señales de los sensores de percepción, brújula y GPS para dar mayor versatilidad a las prácticas.

B. Detección de objetos y mapeo: el móvil detecta la presencia y posición (respecto a él) de objetos cercanos mediante el uso de sensores de distancia infrarrojos y de ultrasonido. Puede realizar un mapa digital del entorno efectuando un barrido tipo radar con el sensor de ultrasonido que toma muestras periódicamente mientras rota.

C. Posicionamiento y orientación: realiza la lectura y almacenamiento periódico de su orientación por medio de la brújula electrónica CMPS03 y posición respecto al terreno explorado con el GPS de tal manera que puede desplazarse a diferentes puntos de interés definidos por el usuario o desplazarse en rumbos específicos, como por ejemplo siguiendo el norte, o el este, etc.

D. Transmisión y recepción de datos: envía datos adquiridos de sus dispositivos de percepción, encoders, brújula, GPS a una central remota, además puede recibir datos que le permitan realizar acciones específicas.

E. Navegación autónoma: esta aplicación puede abarcar las anteriores ya que debe desplazarse en ambientes poco controlados realizando evasión de obstáculos, enviando periódicamente datos de sus sensores, sistemas de percepción y ubicación a la central de supervisión, posicionándose en puntos de interés de su exploración o misión y ejecutando algoritmos de navegación y planeación autónoma.

En investigación puede ser utilizado como plataforma móvil o de locomoción con unidades de procesamiento adicionales dedicadas a la planeación de trayectorias de desplazamiento y dejar al microcontrolador implementado en la tarjeta principal, solo las labores de control de periféricos (motores, servomotores, sensores).

ANEXO B. Estudio de la cinemática del mecanismo de suspensión.

Este anexo muestra inicialmente un análisis del mecanismo de suspensión seleccionado ante la superación de obstáculos. Más adelante se muestran las conclusiones a las que se llegó mediante las simulaciones del sistema de suspensión realizadas en WorkingModel 2D.

A. Elevación de la rueda delantera: despreciando el peso de la barra secundaria, e ignorando el resorte, las fuerzas que intervienen y hacen posible el proceso de elevación de la rueda delantera surgen de la siguiente manera:

- 1.** La rueda delantera encuentra el obstáculo y queda instantáneamente detenida igual que toda la estructura.
- 2.** La fuerza de tracción de la rueda central (A_x figura 185), es equilibrada estáticamente por la fuerza B_x , que aparece en el pivote de la barra secundaria cuando la rueda delantera queda trancada. Esta fuerza hace que se incremente la normal entre la rueda delantera y la pared vertical, mejorando la tracción en esa superficie y generando una fuerza de tracción vertical hacia arriba que ayuda en la superación del obstáculo, pero que no es suficiente para lograrlo.
- 3.** Las fuerzas A_x y B_x forman un par que es equilibrado estáticamente por el par de fuerzas B_y y A_y . La fuerza B_y , actúa verticalmente hacia arriba sobre la barra principal ayudando a elevar la parte delantera de la estructura para superar el obstáculo.

4. La fuerza A_y incrementa la normal entre la rueda central y el suelo y por lo tanto aumenta la fuerza de tracción de ésta. Como consecuencia de dicho aumento, también aumenta la fuerza B_x y por lo tanto aumenta el par que forma con A_x , dando como resultado un nuevo incremento de las fuerzas A_y y B_y .

5. Debido a que la distancia Y_1 se incrementa a medida que la rueda delantera supera el obstáculo, el par formado entre A_x y B_x se incrementa también. Además la distancia X_1 disminuye, por lo tanto las fuerzas A_y y B_y deben aumentar para alcanzar el equilibrio. En conclusión todas las fuerzas siguen incrementándose hasta que la rueda delantera supera el obstáculo.

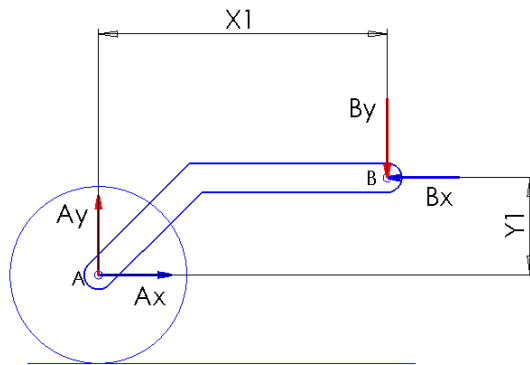


Figura 173. Fuerzas generadas sobre la barra secundaria al superar un obstáculo.

Haciendo sumatoria de momentos en A (figura 173) se tiene:

$$\sum M_A = 0$$

$$B_x * Y_1 = B_y * X_1 \rightarrow B_y = \frac{Y_1}{X_1} * B_x \quad (\text{Ec. 41})$$

De esta ecuación se puede concluir lo siguiente:

- Según el proceso descrito anteriormente, solo se requiere una pequeña distancia $Y1$, para tener un par inicial disponible y así desencadenar el proceso de elevación de la rueda delantera. Por lo tanto, no es necesario maximizar la relación $Y1/X1$, aunque esto sería lo deseable para incrementar la fuerza B_y . Además, el pivote debe ubicarse en una posición cercana al eje de la rueda delantera, que sea viable en términos prácticos, para garantizar una trayectoria de la rueda central que permita geoméricamente superar obstáculos de la altura requerida.
- La distancia $Y1$ no puede ser muy grande porque la fuerza de tracción generada por la rueda central, la cual es transmitida a través de la barra secundaria hasta el punto de pivote B, puede hacer que la rueda trasera tienda a levantarse del suelo cuando la rueda delantera intenta superar el obstáculo. Si el pivote es bajo, el momento no será suficiente para elevar la rueda trasera.
- Otra opción para incrementar la fuerza B_y , es incrementar la fuerza de tracción de la rueda central.

Si se supone que el centro de gravedad del robot está ubicado en la mitad del robot (que coincide con la posición de la rueda central) entonces la fuerza B_y (ver figura 34 capítulo 4) debe ser tal que:

$$\sum M_d = 0$$

$$L/2 * W = B_{y_min} * (L/2 + X1) \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde:

W : peso del cuerpo del robot

B_{y_min} : es la fuerza vertical mínima requerida en B para facilitar la elevación de la parte delantera de la estructura.

L: distancia entre los ejes de las ruedas delantera y trasera.

De la ecuación 42, se puede concluir que entre mayor sea la distancia X_1 menor es la fuerza B_{y_min} requerida para la elevación de la parte delantera del robot. Por lo tanto es conveniente que el punto B se ubique tan cercano al extremo delantero del robot como sea posible. Esta posición coincide con la posición en la cual es geoméricamente posible superar obstáculos de mayor altura.

B. Elevación de la rueda central: la rueda central no genera mayor resistencia para superar el obstáculo que su propio peso, el cual debe ser vencido fácilmente por los motores de tracción de las ruedas delantera y trasera.

1. La tracción de las ruedas delantera y trasera tiran la barra secundaria desde el punto de pivote por medio de una fuerza B_x . La fuerza A_x surge en el punto de contacto de la rueda central con la pared del obstáculo.

2. A_x y B_x forman un par de fuerzas que se convierten en un momento que hace subir la barra secundaria, venciendo el peso del conjunto rueda central y barra secundaria y por lo tanto la rueda central supera el obstáculo.

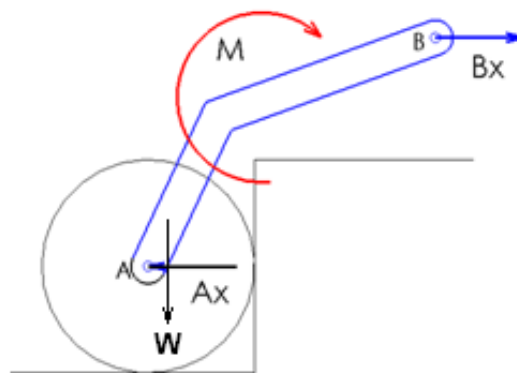


Figura 174. Fuerzas que intervienen en la elevación de la rueda central.

C. Elevación de la rueda trasera: en la elevación de la rueda trasera intervienen fuerzas generadas por la rueda delantera y central. El proceso se describe a continuación:

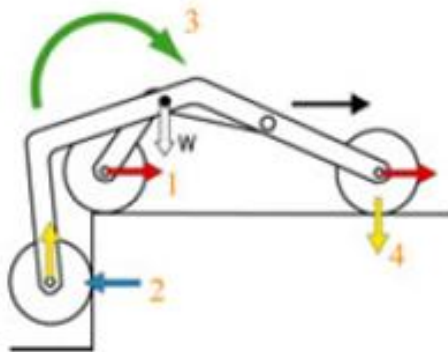


Figura 175. Superación del obstáculo con la rueda trasera.

1. La rueda trasera choca contra la pared del obstáculo y se detiene instantáneamente.

2. Las fuerzas de tracción generadas por la rueda central y la rueda delantera, son equilibradas estáticamente por la fuerza horizontal hacia atrás generada en el punto de contacto de la rueda trasera con la pared del obstáculo. Dicha fuerza normal que actúa sobre la rueda trasera incrementa la fricción entre esta y la pared vertical del obstáculo generando una fuerza de tracción vertical hacia arriba que ayuda en la elevación de la parte trasera del móvil, pero que no es suficiente para lograrlo.

3. Las fuerzas horizontales en el punto de pivote de la barra secundaria y en el punto de contacto de la rueda trasera con la pared vertical del obstáculo forman un par de fuerzas que se convierte en un momento por medio del cual se logra la elevación de la parte trasera del móvil.

4. Dicho momento, hace que la fuerza normal sobre la rueda delantera aumente incrementando así mismo su tracción. Esa tracción adicional se ve reflejada en un aumento de la fuerza horizontal que la pared vertical ejerce sobre la rueda trasera, aumentando por lo tanto el momento que ayuda a elevarla.

D. Simulación del sistema de suspensión: para lograr una mejor comprensión del funcionamiento de la cinemática y cinética de este mecanismo, con la distribución simétrica de las ruedas que se desea, sus alcances y debilidades, se utilizó el software Working Model 2D, (versión de evaluación). Mediante este programa se determinaron cualitativamente algunas de las características geométricas principales del sistema de suspensión del móvil y se estudió el comportamiento de este con y sin resorte. En la figura 176 se muestran algunas imágenes del modelo final simulado en Working Model.

Las consideraciones geométricas que se hicieron en la construcción de los modelos simulados son las siguientes:

- Las ruedas fueron simétricamente distribuidas siguiendo lo establecido en el diseño conceptual.
- Se tuvo en cuenta la relación entre el diámetro real de las ruedas y la longitud total del robot, es decir, 14/60.
- Altura del obstáculo a superar igual al diámetro de las ruedas. La altura que se requiere superar es de 10cm y las ruedas del robot son de 14cm, por lo tanto esta consideración está un poco por encima del requerimiento.
- Masa total de la estructura igual a 3.75 Kg y masa de cada rueda igual a 0.6 Kg. Se le dio esta masa a la estructura para simular la masa de la

mitad del robot. Solo se considera la mitad de la masa porque se esta simulando solo tres ruedas.

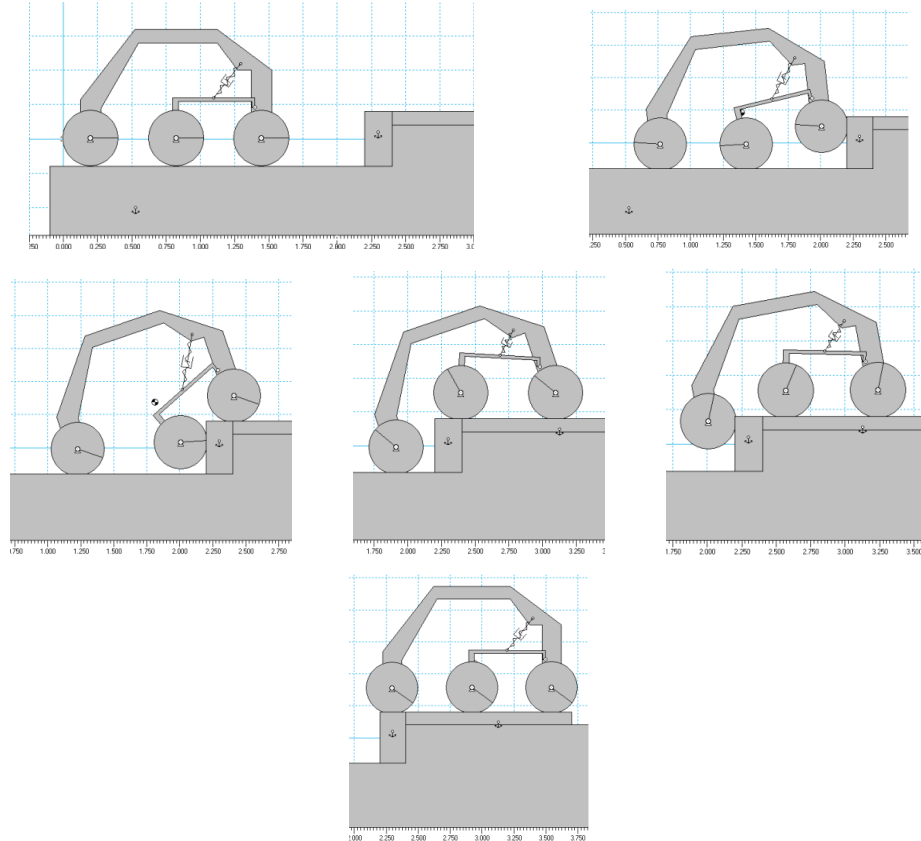


Figura 176. Simulación en Working Model 2D del sistema de locomoción seleccionado.

Conclusiones de las simulaciones:

1. Teniendo en cuenta la distribución simétrica de las ruedas y la relación establecida entre el diámetro de estas y la longitud total del robot, se encontró que es cinemáticamente imposible sobrepasar obstáculos de alturas superiores al diámetro de las ruedas. Si se corriera la rueda del medio hacia atrás, rompiendo con la distribución simétrica y aumentando la longitud total del robot, la cinemática del mecanismo cambia y se hace posible,

geométricamente hablando, superar obstáculos de alturas superiores al diámetro de las ruedas. Como esto se sale del diseño conceptual planteado, simplemente se analizó y se concluyó lo anterior pero no se consideró para la realización de este prototipo.

2. El pivote de la barra secundaria debe ubicarse en un punto cercano al eje de la rueda delantera, a una altura moderada de este para tener un brazo de palanca inicial que permita la elevación de la parte delantera del móvil. Ubicando el pivote en dicha posición, el mecanismo es cinemáticamente capaz de superar un obstáculo de altura igual al diámetro de la rueda. Mientras más se aleje este punto de la zona mencionada, disminuye la altura de los obstáculos que geométricamente se pueden superar ya que es imposible mantener el contacto de la rueda del medio con el suelo, es decir, hablando en términos prácticos, la rueda quedaría colgando.

3. Es necesario el uso de un resorte para mejorar la tracción de la rueda central y acumular energía que ayude a elevar la rueda delantera y la rueda trasera. Dicho resorte ayuda a disminuir la carga soportada por las ruedas delantera y trasera transmitiéndola a la rueda central correspondiente. Además, debe estar levemente deformado cuando el robot se encuentre sobre una superficie horizontal plana, para tener inicialmente una energía disponible. Una vez las ruedas delantera y central hayan superado el obstáculo, el resorte tendrá una deformación un poco mayor a la que tenía inicialmente y tendrá una mayor energía acumulada disponible para ayudar a la rueda trasera a superar el obstáculo.

4. Cuando la rueda central está superando el obstáculo, la tracción generada por las ruedas trasera y delantera debe vencer no solo el peso del conjunto barra secundaria y rueda central, sino también la fuerza del resorte que

empieza a comprimirse. Por lo tanto la constante no puede incrementarse demasiado.

5. Al aumentar la constante elástica del resorte los coeficientes de fricción necesarios para la superación del obstáculo disminuyen. El resorte debe diseñarse cuidadosamente de tal forma que se mantenga la distribución uniforme de las cargas sobre las ruedas delantera y trasera y pensando en mejorar la tracción de la rueda central y el comportamiento de todo el sistema en general. Si dicha constante es muy grande, la rueda trasera puede perder tracción y si es muy pequeña la acción del resorte no es apreciable en ninguna de las etapas del proceso de superación del obstáculo. Se encontró que se obtiene un buen funcionamiento cuando el resorte es diseñado tal que la carga soportada por la rueda central cuando el robot se encuentra en un terreno plano horizontal, sea $1/2$ de la carga que soporta una de las ruedas delantera o trasera, es decir, $1/10$ de la carga total del robot.

6. El centro de gravedad debe ubicarse en la mitad del robot para facilitar tanto la elevación de la rueda delantera como la elevación de la trasera. Además esto es indispensable para que la distribución de la carga sobre las cuatro ruedas de las esquinas sea uniforme. Es necesario mantener la uniformidad en la carga que soporta cada rueda para que cuando se desplace sobre terrenos blandos como la arena no se presente mayor hundimiento y por consiguiente mayor resistencia al movimiento en unas ruedas que en otras.

7. Si el centro de gravedad se ubica en la mitad del robot, en teoría se puede distribuir la carga uniformemente en todas las ruedas, pero la constante del resorte debe incrementarse para lograrlo. El inconveniente de esto, es que sería más complicado para el móvil subir la rueda central aunque mejoraría considerablemente la superación del obstáculo con las ruedas delantera y

trasera. Lo mejor es colocar un resorte con constante media que ayude a disminuir la carga de las ruedas trasera y delantera pero que sea fácil de vencer en el momento de superar el obstáculo.

8. El centro de gravedad debe ser tan bajo como sea posible. Esto garantiza la estabilidad de toda la estructura y facilita la superación del obstáculo ya que se logra una mejor distribución de la carga sobre las ruedas durante todo el proceso de superación del obstáculo.

9. El robot puede superar el obstáculo sin el uso del resorte, si la velocidad del mismo en el momento de chocar contra el obstáculo es alta.

ANEXO C. Estudio del torque necesario para la dirección.

El torque necesario para hacer girar cada una de las ruedas de las esquinas alrededor de su eje vertical de dirección depende principalmente del tipo de terreno (los terrenos considerados son: arena, grama, asfalto, tierra suelta y compacta y concreto) sobre el cual se encuentre la rueda y de la carga soportada por la misma. Es necesario conocer el valor máximo que puede alcanzar este parámetro para poder hacer una selección adecuada de los servos de dirección y así garantizar que el robot puede desplazarse adecuadamente por todos los terrenos considerados. Un dispositivo con características mecánicas semejantes al sistema de dirección diseñado para el robot móvil, fue construido para determinar experimentalmente el torque requerido para la dirección de cada rueda en función del tipo de terreno y la carga soportada por la misma. Las características del dispositivo, condiciones y elementos utilizados son los siguientes:

- En la figura 177 se puede apreciar el diseño del dispositivo utilizado para realizar las mediciones del torque requerido para la dirección.

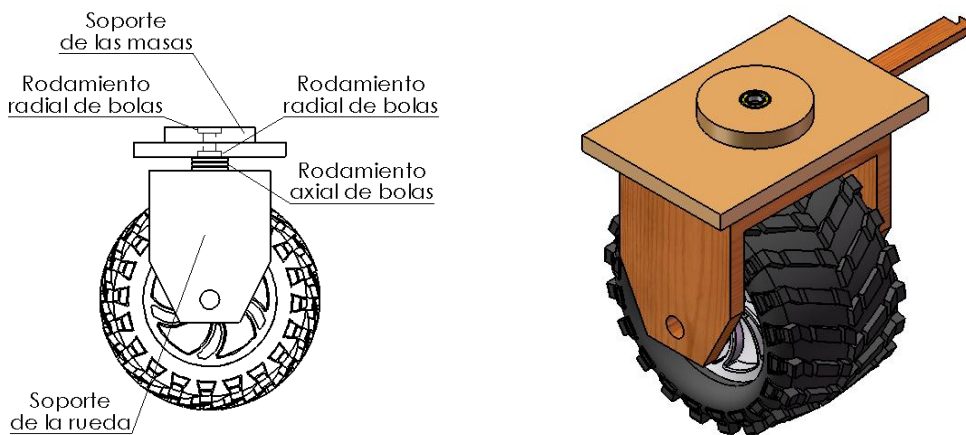


Figura 177. Esquema del soporte construido para las pruebas de torque

- El torque requerido para hacer girar la rueda sobre los diferentes terrenos considerados fue medido indirectamente por medio de un dinamómetro mecánico cuya calibración fue verificada utilizando unas masas patrón. Dichas masas y el dinamómetro fueron facilitadas por el laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Industrial de Santander.
- Dinamómetro: sensibilidad = 10 g, rango = 0 – 250 g. (figura 178)
- El cálculo del torque se realizó con base en los valores medidos por el dinamómetro y el brazo de palanca o distancia medida desde el punto de unión entre dicho dinamómetro y el dispositivo, hasta el eje de dirección.

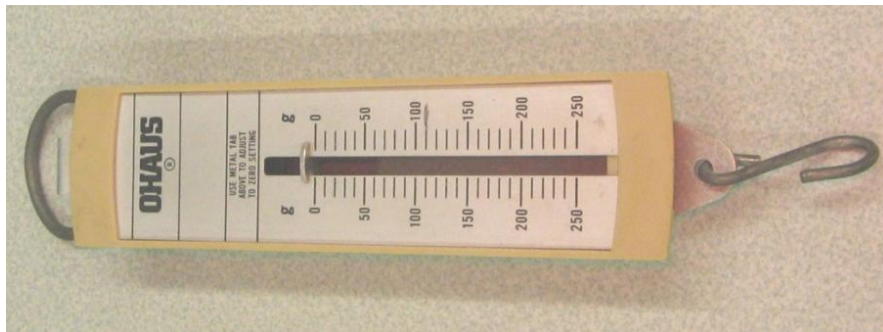


Figura 178. Dinamómetro utilizado para la medición del torque de dirección.

- Las masas utilizadas para simular la carga soportada por cada rueda, son masas calibradas de medio, uno y dos kilogramos (figura 179).
- Las mediciones fueron realizadas entre dos personas, una sosteniendo el soporte de las masas para mantenerlas verticales y estables y la otra halando del dinamómetro y tomando la lectura de este.



Figura 179. Masas utilizadas para simular la carga sobre las ruedas.

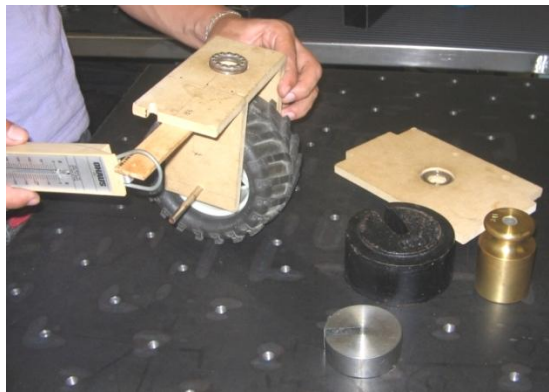


Figura 180. Elementos utilizados en la prueba de torque de dirección.

- Cada medición fue realizada tres veces y el promedio de las tres mediciones fue el valor que se tuvo en cuenta.
- Los terrenos sobre los cuales fue realizada la prueba son: tierra compacta, tierra suelta, arena, asfalto, concreto y grama que son los terrenos considerados en los objetivos del proyecto.

En el caso de las mediciones que se hicieron con la rueda y el dispositivo construido, solo interesa conocer el valor máximo del torque que se presenta al intentar girar la rueda sobre cada superficie. Los valores de los coeficientes de fricción no son relevantes en este caso. El valor puntual de interés es el valor máximo que marca el dinamómetro durante cada prueba,

que corresponde a la fuerza máxima requerida para vencer la fricción estática. Si se graficaran todos los valores que marca el dinamómetro durante cada prueba, las gráficas resultantes serían similares a la mostrada en la figura 181.

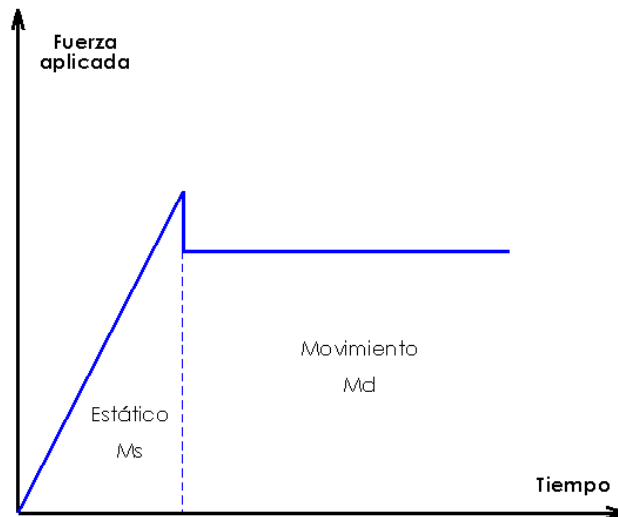


Figura 181. Evolución de la fuerza aplicada a un objeto en contra de la fuerza de fricción

La tabla 59 muestra los resultados de las mediciones realizadas por medio del dispositivo construido. La figura 182 muestra la tendencia de los datos registrados en la tabla anterior. Se puede decir que tienen una tendencia lineal, tal como era esperado, con pendiente igual al coeficiente de fricción estático.

Algunas mediciones no pudieron ser realizadas con el dispositivo utilizado, debido a que la fuerza requerida sobrepasaba el rango de medición del dinamómetro. Sin embargo, se sabe de antemano que la masa total del móvil no superará los 10 kg, por lo tanto el valor de la carga por rueda se puede considerar igual a 2 kg (teniendo en cuenta que gracias a los resortes colocados entre las barras principal y secundaria, parte del peso es

soportado por las ruedas centrales también), razón por la cual, los valores registrados son suficientes para este proyecto.

Tabla 59. Torque requerido para la dirección de una rueda sobre diferentes superficies.

TERRENO	TORQUE [Kg*cm]					
	0,5 Kgf	1 Kgf	1,5 Kgf	2 Kgf	2,5 Kgf	3 Kgf
CONCRETO	3,06	5,44	5,61	7,14	7,31	7,99
TIERRA COMPACTA	1,615	2,125	2,89	4,08	5,1	5,78
SUPERFICIE DE ARENA	1,53	2,04	2,72	3,57	4,76	5,1
ARENA SUELTA	2,04	2,72	4,59	4,93	5,78	6,46
GRAMILLA	2,72	4,42	5,1	7,22	-	-
TIERRA SUELTA	2,55	2,89	3,57	4,25	4,93	5,61
ASFALTO	2,72	4,25	6,46	7,14	-	-

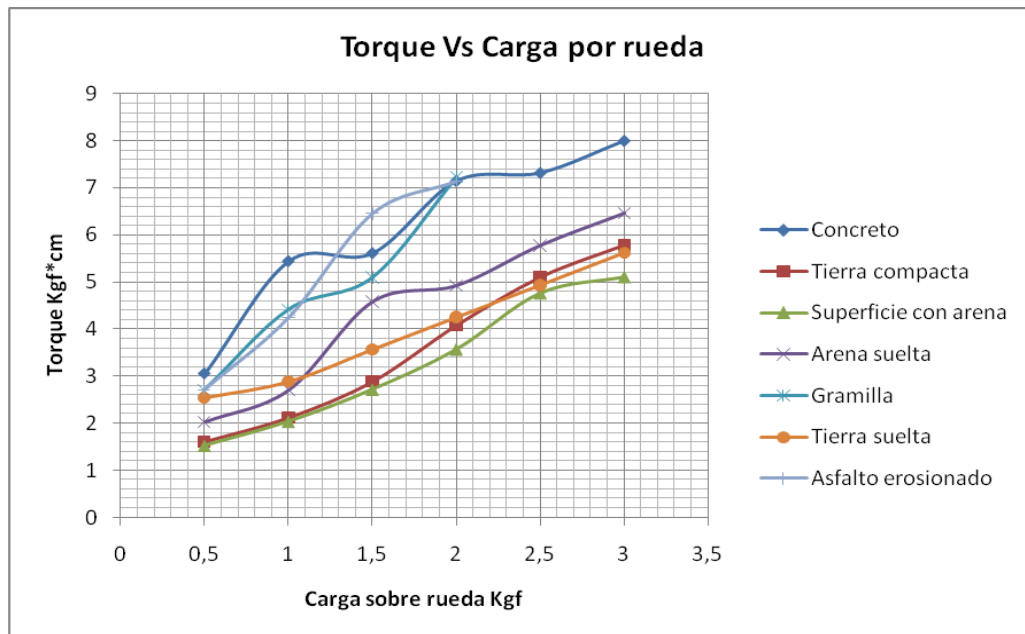


Figura 182. Gráfica de torque vs pesos simulados sobre la rueda

Conclusiones de la prueba:

- Los valores más altos, corresponden a las superficies de gramilla, asfalto y concreto. En la gramilla los valores de torque requeridos para la dirección son mayores a los requeridos en otras superficies, debido a que las raíces de la hierba se enredan con los labrados de la rueda. Lo mismo pero en menor medida sucede sobre el concreto y el asfalto. Sobre estos tres tipos de superficie, no es tan apreciable una tendencia lineal como la que se presenta en los otros casos. El valor del torque requerido para la dirección de la rueda puede variar ampliamente de una medición a otra, incluso utilizando el mismo peso, simplemente cambiando el sitio en el cual se hace la medición. En los otros terrenos las irregularidades encontradas son menores y por lo tanto exhiben una tendencia lineal.
- La superficie con arena es la que representa menor esfuerzo para el mecanismo de dirección. La rueda puede deslizarse con mayor facilidad gracias a los pequeños granos de arena sobre la superficie. Sin embargo, dicho deslizamiento podría llegar a ser contraproducente para la tracción de las ruedas.
- Los valores medidos sobre superficies de tierra compacta, arena suelta y tierra suelta son similares y representan una menor resistencia al giro de la rueda que sobre superficies de concreto, asfalto y grama.
- Cabe resaltar que el movimiento de dirección de las ruedas no siempre se realizará con el móvil estacionario, es decir, la mayoría de las veces la dirección se hará mientras el robot se está desplazando, lo que facilitará el trabajo de los servos pues disminuye el torque que se requiere para hacer rotar las ruedas. Sin embargo, para garantizar el correcto funcionamiento de los servos y evitar que trabajen con frecuencia al límite de su

capacidad, se deben seleccionar con base en el máximo valor registrado bajo una carga igual o menor a 2 kgf, que es el valor aproximado de la carga por rueda determinado en la sección 3.5.1. Dicho valor máximo es igual a 7.22 kgf*cm y se presenta sobre grama, bajo un peso de 2 kgf. En conclusión la selección del servo debe hacerse con base en un torque requerido de 7.22 Kgf x cm.

ANEXO D. Servomotores analógicos y motores de corriente continua.

1. Servomotores analógicos

Un servomotor es un motor eléctrico que tiene la capacidad de ser controlado tanto en velocidad como en posición⁶⁴. El servomotor puede clasificarse dentro de un grupo más grande de actuadores llamados servomecanismos que pueden ser rotativos o no rotativos (como el caso de los cilindros hidráulicos o neumáticos), los cuales poseen los elementos suficientes de control para poder monitorear los parámetros de su actuación mecánica tales como posición, velocidad, fuerza, torque, etc.

En robótica es muy común el uso de servomotores eléctricos de tipo analógico, los cuales tienen muy buen desempeño y son ampliamente ofrecidos en el mercado a precios muy razonables. Las características principales de estos dispositivos son las siguientes:

- El voltaje de operación está entre cuatro y ocho voltios dependiendo de la marca y el tamaño.
- Generalmente pueden ser operados a diferentes voltajes con lo que puede obtenerse mayor o menor torque en la salida.
- Pueden mantener de manera estable una posición manteniendo la fuerza o el torque, gracias al control en lazo cerrado que poseen internamente.
- El rango de giro es limitado por topes mecánicos que permiten giros entre 90° y 180° dependiendo del modelo.
- Tienen tres terminales, un terminal positivo que recibe la alimentación del motor (4V - 8V), un terminal de referencia o tierra y un terminal de control

⁶⁴ ROBOTS ARGENTINA. Servomotores. [en línea]
<http://robots-argentina.com.ar/MotorServo_basico.htm>

que recibe la señal del controlador externo del servo. Los colores de los tres cables del servo varían de una marca a otra. En el siguiente link es posible encontrar los colores de los terminales para diferentes marcas de servos: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Servomotor>>

Los servomotores analógicos requieren los siguientes elementos para su funcionamiento:

- **Motor de corriente continua:** un pequeño motor de corriente continua de altas revoluciones se utiliza para convertir la energía eléctrica en energía mecánica y dar movimiento al servo.
- **Caja reductora de engranajes:** una serie de engranajes se encargan de reducir la velocidad del motor y aumentar el torque en el eje de salida del servo. Dichos engranajes pueden ser plásticos o metálicos dependiendo de la capacidad torsional del servo. Adicional a los engranajes deben utilizarse bujes o pequeños rodamientos para soportar las cargas radiales que actúan sobre los ejes de la pequeña caja reductora. Los rodamientos metálicos se utilizan en los servos de alto torque, en los otros servos se utilizan bujes.
- **Potenciómetro:** el potenciómetro se utiliza como sensor de posición angular acoplado mecánicamente al eje de salida para dar el feedback necesario al control del servo.
- **Circuito de control:** se encarga del control de la posición del motor. Recibe la señal de un controlador externo y convierte esta señal en una orden al motor para llevarlo a la posición requerida, la cual es alcanzada con precisión y mantenida a pesar de las fluctuaciones en el torque exigido al servo, gracias al potenciómetro que brinda la señal necesaria para cerrar el lazo de control.

duración o ancho del pulso con la posición del servo. La siguiente ecuación relaciona el ancho del pulso con el ángulo de posicionamiento de un servo marca FUTABA cuyos valores de ancho de pulso y frecuencia de pulso son iguales a los descritos arriba.

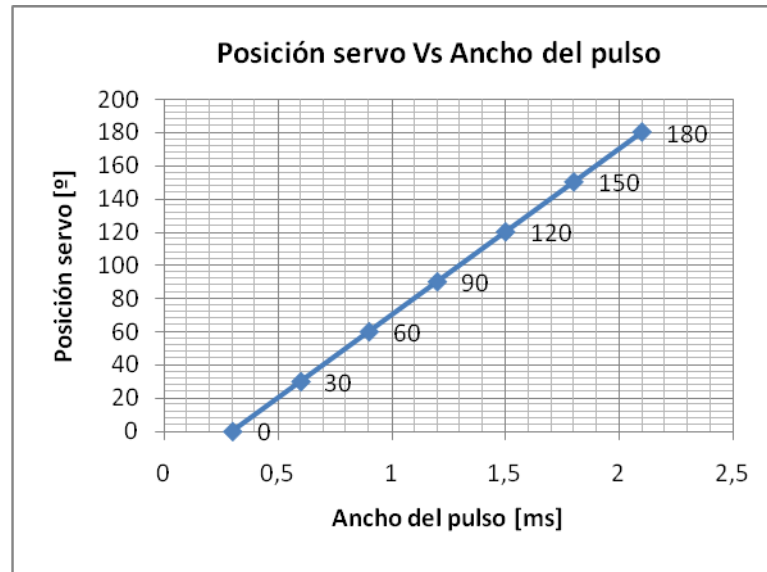


Figura 184. Posición servo VS ancho del pulso (duración del pulso).

$$\theta_{\text{posición}} = \frac{180}{2,1-0,3}t - 30 \therefore \theta_{\text{posición}} = 100t - 30 \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

Θ posición: ángulo de posición del servo [°]

t: duración del pulso o ancho del pulso [ms]

2. Motores de corriente continua

Acerca de los motores de corriente continua que serán utilizados para la tracción del móvil se pueden mencionar las siguientes características generales:

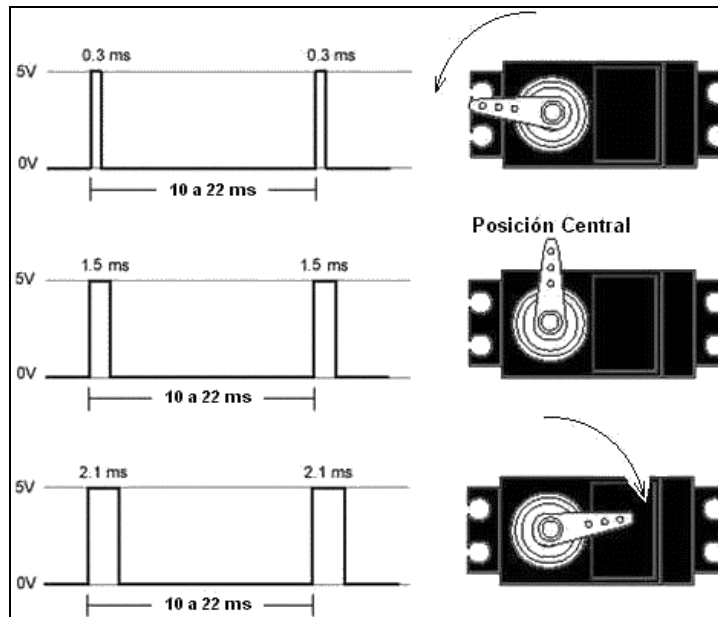


Figura 185. Señales y posiciones servos⁶⁴.

- La velocidad es directamente proporcional al voltaje disponible en los terminales.
- El torque es directamente proporcional a la corriente.
- El sentido de giro depende de la polaridad del voltaje aplicado.
- A medida que aumenta el torque exigido al motor, se produce un aumento en la corriente consumida y una caída en la velocidad.

Cuando la velocidad del motor se regula por medio de PWM (Pulse Width Modulated, ancho de pulso modulado, ver figura 186), el motor recibe siempre un voltaje nominal constante pero no de forma continua sino intermitente, en forma de pulsos cuadrados. La velocidad depende entonces del porcentaje de tiempo del ciclo en el que el motor esta energizado, a mayor porcentaje, mayor velocidad (ver figura 186). Sin embargo, así como el voltaje es intermitente, también lo es la corriente y por consiguiente el torque máximo disponible se ve disminuido al igual que la velocidad.

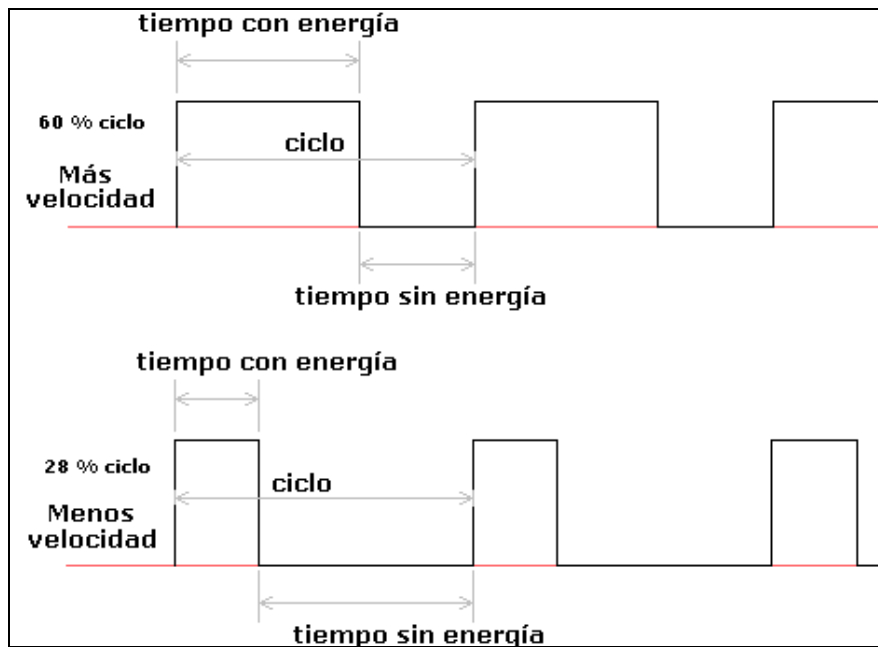


Figura 186. Regulación de la velocidad del motor por medio de PWM⁶⁴.

Independientemente de cuál sea la forma por medio de la cual se esté regulando la velocidad del motor, sea por voltaje o por PWM, siempre se presentará una caída en la velocidad del motor cuando aumenta la carga arrastrada por este, a menos que se implemente un sistema de control para mantener la velocidad constante. Un control en lazo cerrado, donde la señal de feedback se obtenga por medio de un encoder conectado directamente al eje del motor, es ideal para garantizar la velocidad constante del mismo a pesar de las fluctuaciones en el torque exigido.

ANEXO E. Alternativas de diseño del sistema que promedia la posición del cuerpo central en Walking Wheels Robots.

En muchos diseños conceptuales de robots móviles se utilizan sistemas de suspensión independientes en cada lado del cuerpo o chasis principal del robot. Estas configuraciones brindan gran capacidad de escualización y adaptación al terreno, gracias a la independencia entre los sistemas de suspensión de cada lado, los cuales se unen mediante un único eje en su parte central. Para mantener dicho nivel de escualización, el cuerpo del robot no debe interferir con tales sistemas de suspensión, por consiguiente, debe encontrarse la manera de mantener su estabilidad y adecuada posición a pesar de estar sostenido por medio de un único eje.

Si el centro de gravedad del cuerpo se ubica justamente debajo del eje único que lo atraviesa, se puede obtener una estabilidad estática, pero no es posible mantener la estabilidad dinámica. Por consiguiente, el cuerpo oscilará cada vez que el móvil acelere o desacelere. Además, tendrá la tendencia a mantenerse siempre en una posición horizontal, independientemente de la inclinación que puedan tener las barras de suspensión. Por lo tanto, cuando el robot se desplace por una superficie inclinada, el cuerpo se mantendrá en una posición horizontal y los sensores a bordo observarán el suelo y posiblemente lo detecten como un obstáculo, ocasionando un comportamiento errático del móvil. Como esta situación es indeseable, sea cual sea la posición del centro de gravedad del cuerpo del robot (a la altura del eje, por encima del eje o por debajo de este), es necesario colocar un mecanismo que lo mantenga en una posición promedio con respecto a la inclinación relativa existente entre las barras de suspensión de cada lado.

Dos alternativas diferentes existen para el mecanismo requerido⁶⁵:

1. **Diferencial acoplado al chasis:** el chasis o cuerpo central del robot se mantiene en una posición intermedia con respecto a las posiciones de las barras de suspensión, gracias a un mecanismo diferencial acoplado rígidamente sobre él. En este caso, el eje que atraviesa el cuerpo del robot está dividido en dos. Cada semieje está unido rígidamente a la barra de suspensión del lado correspondiente. En un mecanismo diferencial tradicional, como el usado en los automóviles, el movimiento entra por la corona principal que aloja los engranajes planetarios o satélites y sale por los engranajes soles acoplados a los dos ejes transversales que dan movimiento a las ruedas. En este caso, el movimiento entra por los ejes transversales, que no están conectados a las ruedas sino a las barras de suspensión, y sale por el soporte de los engranajes planetarios que va rígidamente unido al chasis y que hace las veces de corona.

La figura 187 muestra un esquema de este mecanismo. Esta configuración hace que el chasis permanezca siempre en una posición intermedia entre las dos barras principales de suspensión cuando el robot se desplaza sobre terrenos irregulares. También, se logra reducir el ángulo de inclinación del chasis a la mitad de la inclinación máxima que pueda alcanzar cualquiera de las dos barras cuando esté superando un obstáculo. Esto es ventajoso en robots controlados por medio de cámaras o por medio de sensores de escaneo laser, ya que se reduce el movimiento del chasis principal y la orientación de este es casi siempre paralelo a la superficie⁶⁵.

⁶⁵ SANDIN, Paul. Robot mechanisms and mechanical devices. MacGraw Hill. 2003. Páginas 144 - 147

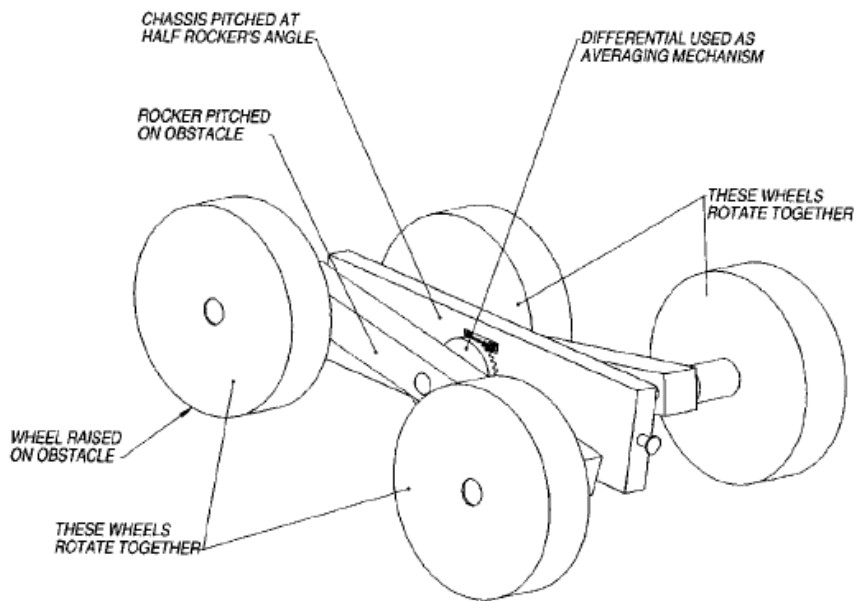


Figura 187. “Averaging mechanism” o mecanismo de promedio del cuerpo del robot basado en diferencial⁶⁵.

2. **Resortes acoplados entre las barras de suspensión y el chasis:** la segunda opción que se tiene para lograr que el chasis se mantenga en la posición intermedia y estable, es colocar un resorte amortiguado entre el chasis y cada una de las barras de suspensión. En este caso un solo eje atraviesa de lado a lado el cuerpo del robot y deben existir rodamientos en sus extremos para permitir el movimiento de las barras de suspensión. Tales resortes deben funcionar a tensión y compresión y se requiere uno en cada lado del robot. Su posición puede cambiar dependiendo de cada diseño específico. En la figura 188, los resortes aparecen en la parte trasera del vehículo, pero también pueden colocarse en la parte delantera o en la parte central. Juntas a rótula pueden llegar a ser requeridas en los extremos del resorte – amortiguador, si se necesita un grado de libertad adicional en tales uniones.

Cuando una de las ruedas delanteras del vehículo encuentra un obstáculo y solo actúa el mecanismo de suspensión del lado

correspondiente a tal rueda, o cuando el robot se desplaza sobre un terreno tal que las ruedas de un lado queden a desnivel con respecto a las ruedas del otro lado, la barra de suspensión del lado más inclinado tira el chasis por medio del resorte correspondiente. El resorte del lado contrario se estira impidiendo que el chasis continúe moviéndose de tal forma que este se queda en una posición intermedia.

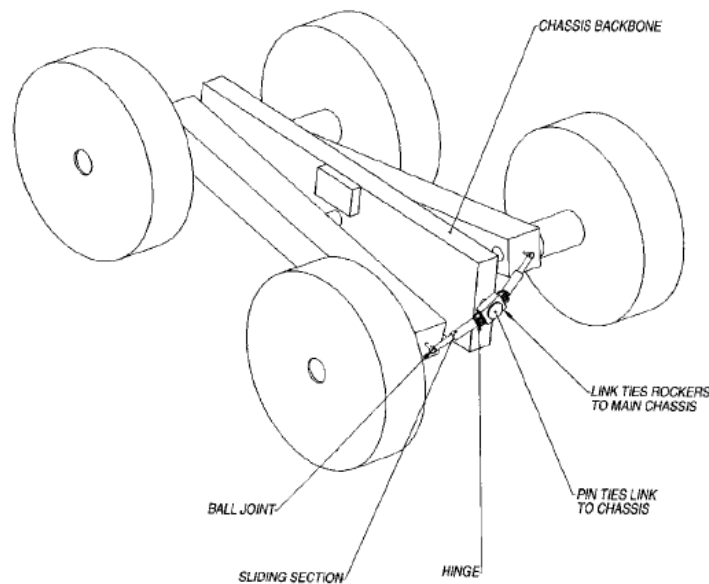


Figura 188. “Averaging mechanism” o mecanismo de promedio del cuerpo del robot basado en resortes⁶⁵.

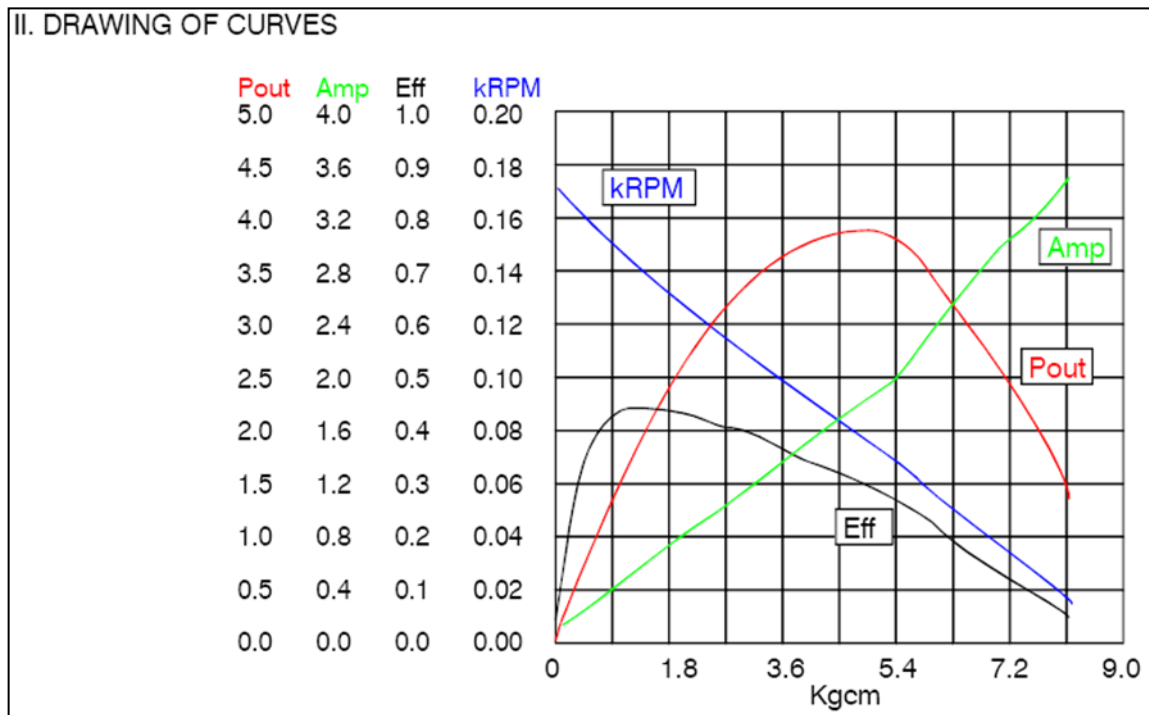
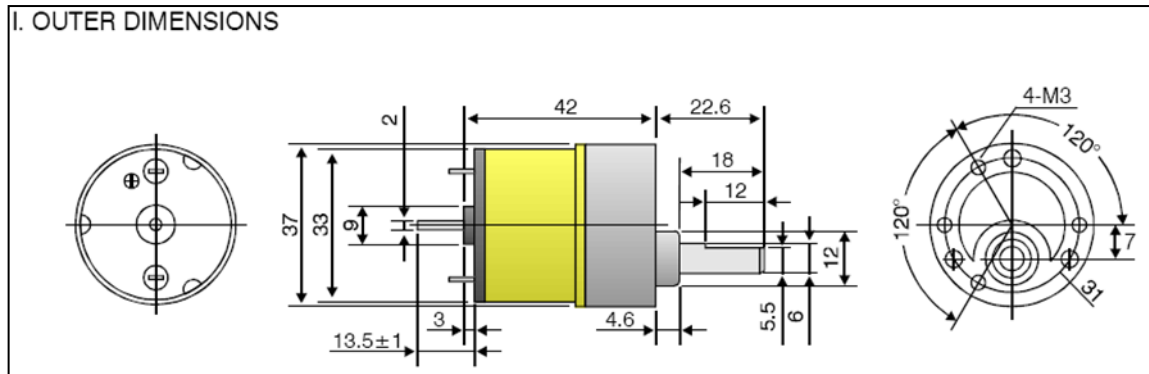
Este sistema tiene una desventaja y es que el rango de movimiento del chasis está limitado por la longitud de los resortes. Otra desventaja es que por medio de este sistema el chasis principal tiene menos estabilidad que con el sistema de diferencial, ya que los resortes permiten cierta vibración u oscilación cada vez que las barras de suspensión se mueven. Esta desventaja hace que este sistema no sea adecuado en robots móviles autónomos cuyos sensores principales estén ubicados sobre el cuerpo principal del robot, debido a que las vibraciones afectan la estabilidad de los sensores y la confiabilidad de las lecturas tomadas por

estos. Sin embargo tiene la ventaja de ocupar poco espacio en comparación con el espacio requerido por el diferencial y la ventaja de ser más ligero o de aportar poco peso a la estructura.

Las desventajas antes mencionadas con respecto al sistema que utiliza los resortes, tienen mayor peso que sus ventajas y por lo tanto son suficientes para inclinar la balanza a favor del sistema diferencial.

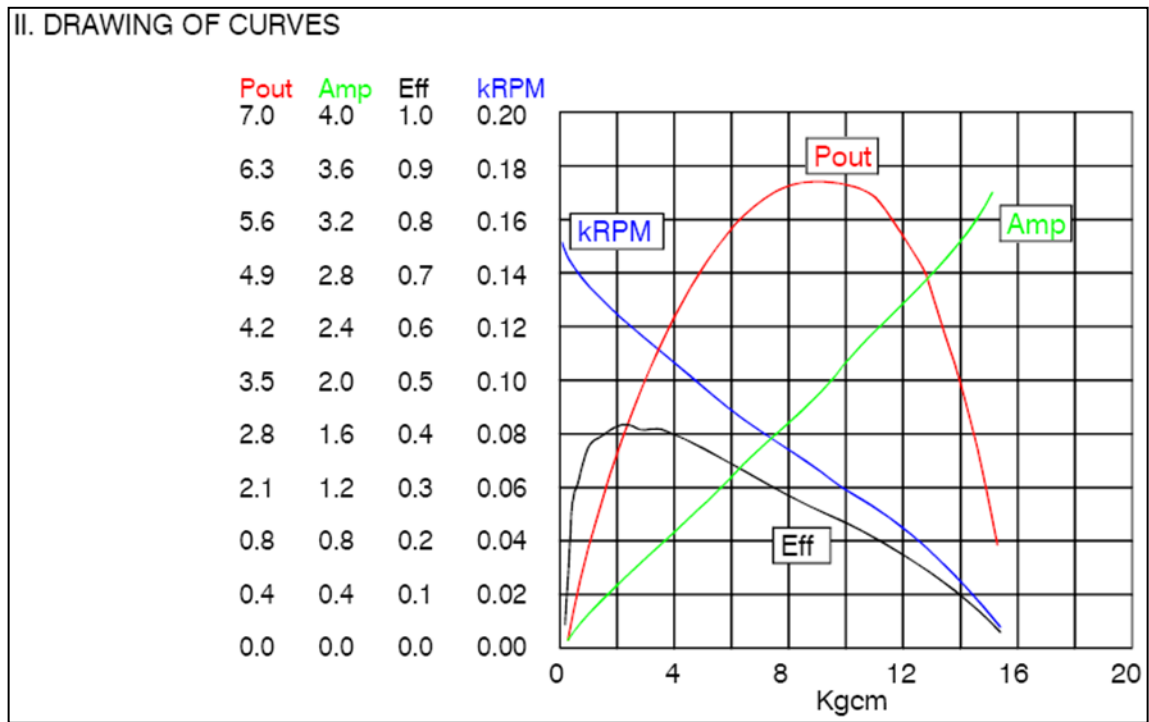
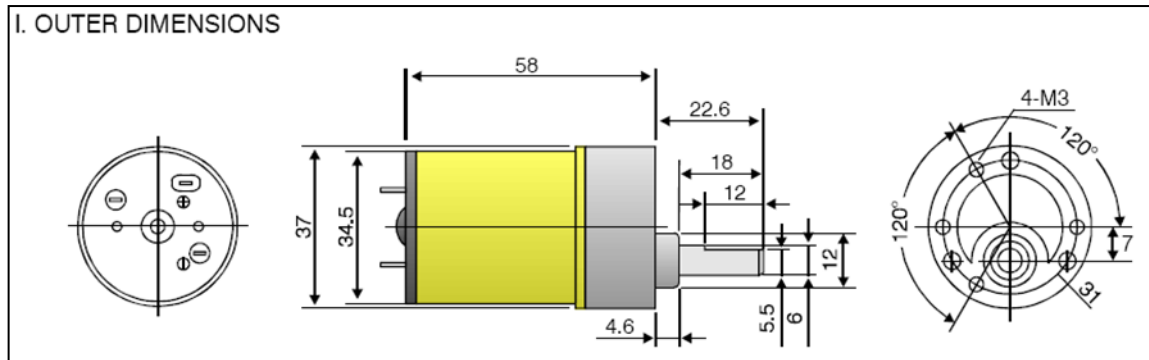
ANEXO F. Tablas

1. Motor DC, GHM-04



Fuente: www.lynxmotion.com

2. Motor DC, GHM-13



Fuente: www.lynxmotion.com

3. Motor DC, RA – 37GM


直流馬達 (DC Carbon-brush motors)

**RA-35C
GEARED MOTOR
SERIES**

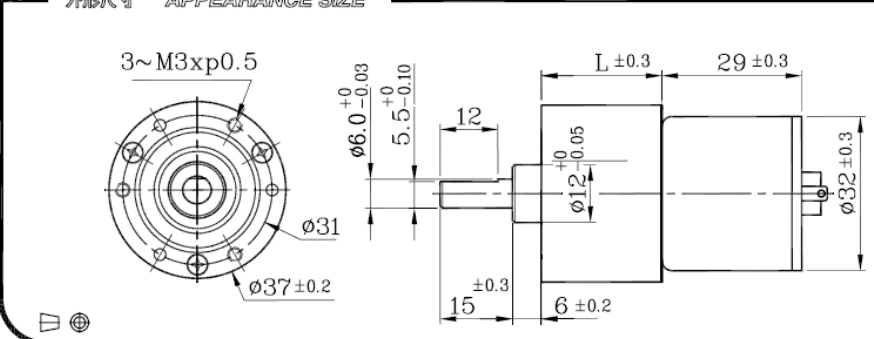
RA-37GM

11&12 TYPE

REDUCTION RATIO	L	REDUCTION RATIO	L
1/6	21.8	1/219~1/625	32.1
1/16~1/21	24.6	1/750~1/1875	34.5
1/31~1/69	27.1	1/2813~1/5625	37.0
1/75~1/188	29.6		



外形尺寸 APPEARANCE SIZE



scale: 9:10

	減速比 Reduction ratio	1/6	1/16	1/21	1/31	1/56	1/75	1/104	1/125	1/156	1/188	1/219	1/250	1/312	1/469	1/625	1/750	1/938	1/1875	1/3750	1/5625	
		12V	定格扭力(Kg-cm) Rated torque	0.3	0.68	0.9	1.25	2.2	2.6	3.6	4.4	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	定格回轉數(rpm) Rated speed	800	310	245	155	90	67	49	41	33	28	24	21.5	17.6	12.3	9.1	7.8	6.3	3.2	1.6	1.0	
24V	定格扭力(Kg-cm) Rated torque	0.3	0.7	0.9	1.25	2.3	2.7	3.8	4.5	5.7	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	定格回轉數(rpm) Rated speed	780	308	240	150	87	65	48	40	32	27	23.5	21.5	17.5	12	9.0	7.8	6.2	3.2	1.6	1.0	

馬達單體型式 / MOTOR DATA

定格電壓 Rated volt (V)	定格扭力 Rated torque (g-cm)	定格回轉數 Rated speed (rpm)	定格電流 Rated current (mA)	無負荷回轉數 No load speed (rpm)	無負荷電流 No load current (mA)	定格出力 Rated output (W)	重量 Weight (g)
12	60	5100	≤ 470	6200	≤ 120	3.14	75
24	62	5000	≤ 210	6200	≤ 60	3.17	75

馬達單體特性圖 / MOTOR CHARACTERISTICS

©Shayang Ye September 2006

Fuente: www.shayye.com.tw

4. Motor DC, RB – 37GM

直流馬達 (DC Carbon-brush motors)

RB-35C
GEARED MOTOR
SERIES

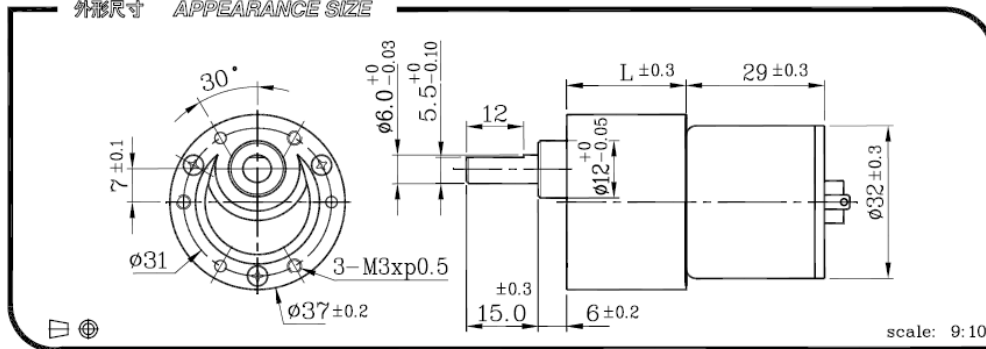
RB-37GM

11&12 TYPE



REDUCTION RATIO	L	REDUCTION RATIO	L
1/6~1/10	19.5	1/120~1/300	27.0
1/18~1/30	22.0	1/350~1/1000	29.5
1/36~1/100	24.5	1/1500~1/3000	32.0

外形尺寸 APPEARANCE SIZE



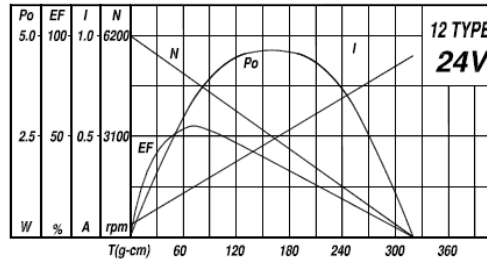
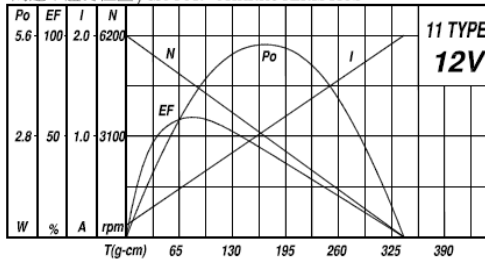
GEARED MOTOR TORQUE/SPEED

	減速比 Reduction ratio	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		10	18	30	50	60	75	90	100	120	150	180	200	250	300	500	600	750	1000	1500	3000
12V	定格扭力(Kg-cm) Rated torque	0.5	0.8	1.3	2.0	2.4	2.9	3.5	3.9	4.2	5.3	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	定格回轉數(rpm) Rated speed	490	270	168	100	84	67	57	51	42.5	34	29	26	22	19	11.2	9.5	8.0	6.0	4.1	2.0
24V	定格扭力(Kg-cm) Rated torque	0.5	0.8	1.4	2.0	2.4	3.0	3.6	4.0	4.4	5.4	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	定格回轉數(rpm) Rated speed	480	250	160	98	83	65	56	50	41.5	33	28.5	26	22	19	11	9.3	7.9	5.9	4.0	2.0

馬達單體型式 / MOTOR DATA

定格電壓 Rated volt (V)	定格扭力 Rated torque (g-cm)	定格回轉數 Rated speed (rpm)	定格電流 Rated current (mA)	無負荷回轉數 No load speed (rpm)	無負荷電流 No load current (mA)	定格出力 Rated output (W)	重量 Weight (g)
12	60	5100	≤ 470	6200	≤ 120	3.14	75
24	62	5000	≤ 210	6200	≤ 60	3.17	75

馬達單體特性圖 / MOTOR CHARACTERISTICS



©Shayang Ye

September 2006

Fuente: www.shayye.com.tw

5. Empresas comercializadoras de moto-reductores pequeños utilizados en robots

- <http://www.robotstorehk.com>
- <http://www.batteryspace.com>
- <http://www.active-robots.co.uk>
- <http://www.lynxmotion.com>
- <http://www.acroname.com>
- <http://www.roboticsconnection.com>
- <http://www.superrobotica.com>
- <http://www3.towerhobbies.com>
- <http://www.superdroidrobots.com>
- <http://www.sdp-si.com>

6. Fabricantes de motores pequeños utilizados en robots

En algunas compañías es posible seleccionar de una gran lista de motores y reductores acoplables modularmente para obtener el sistema motriz justamente requerido. Los motores producidos por las empresas cuyas direcciones electrónicas son mostradas a continuación, son de alta calidad y por consiguiente son considerablemente más costosos, sin embargo, si se desea contar con motores de gran precisión y muy bajo juego en el eje de salida del motor-reductor, estos son los indicados.

- <http://www.faulhaber-group.com>
- <http://www.maxonmotor.com>
- <http://www.islproducts.com>

Otras empresas fabricantes no ofrecen tal nivel de flexibilidad en la configuración de los motor-reductores requeridos pero ofrecen una buena gama de ellos que puede facilitar la selección.

- <http://www.hsiangnengmotors.com.tw>
- <http://www.ms-motor.com>
- <http://hennkwell.com.tw>
- <http://www.shayye.com.tw>

8. Esfuerzos recomendados para utilizar en la ecuación de Lewis⁶⁶.

Tabla 10-3 Esfuerzos estáticos de seguridad para usar en la ecuación de Lewis.

Material	S_o lb/plg ²	BHN
Fundición gris		
ASTM 25	8 000	174
ASTM 35	12 000	212
ASTM 50	15 000	223
Acero vaciado (bajo carbón)		
0.20% C sin tratamiento térmico	20 000	180
0.20% C WQT	25 000	250
Acero al carbón forjado		
SAE 1020 endurecimiento superficial y WQT	18 000	156
SAE 1030 sin tratamiento	20 000	180
SAE 1035 sin tratamiento	23 000	190
SAE 1040 sin tratamiento	25 000	202
SAE 1045 sin tratamiento	30 000	215
SAE 1045 endurecido por WQT	32 000	205
SAE 1050 endurecido por OQT	35 000	223
Aceros aleados		
SAE 2320 endurecimiento superficial y WQT	50 000	225
SAE 2345 endurecido por OQT	50 000	475
SAE 3115 endurecimiento superficial y OQT	37 000	212
SAE 3145 endurecido por OQT	53 000	475
SAE 3245 endurecido por OQT	65 000	475
SAE 4340 endurecido por OQT	65 000	475
SAE 4640 endurecido por OQT	55 000	475
SAE 6145 endurecido por OQT	67 500	475
Materiales a base de cobre		
SAE 43 (ASTM B147-52, 8A) (manganeso bronce)	20 000	100
SAE 62 (ASTM B143-52, 1A) bronce de cañón	10 000	80
SAE 65 (ASTM B144-52, 3C) (fósforo bronce)	12 000	100
SAE 68 (ASTM B148-52, 98) (aluminio bronce tratado térmicamente)	22 000	180
No metales		
Baquelita, Micarta, Celerón	8 000	

⁶⁶ DEUTSCHMAN, Aaron, MICHELS, Walter, WILSON, Charles. Diseño de máquinas teoría y práctica. Editorial CECSA "Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México". Novena reimpresión. México, 1999. p. 576.

9. Propiedades típicas de algunas aleaciones de cobre y latón⁶⁷.

Tabla A-22 PROPIEDADES TÍPICAS DE ALGUNAS ALEACIONES A BASE DE COBRE

Todas las resistencias de fluencia corresponden al método del 0.5% de desplazamiento. Para obtener su equivalente en kpsi se multiplican por 0.145, las cantidades en MPa.

Número UNS	Nombre de la aleación	Forma	Revenido	Resistencia de fluencia a la tensión MPa	Resistencia a la tensión MPa	Elongación en 50 mm %	Dureza Rockwell H_R
C17000	Berilio	Varilla	Duro	515	790	5	90B
		Varilla	Suave	170	415	50	77B
		Lámina	Duro	1000	1240	2	...
C21000	Latón de dorar	Lámina	Duro	345	305	5	64B
		Lámina	Suave	70	235	45	46F
C22000	Bronce comercial	Lámina	Suave	370	420	5	70B
		Lámina	Suave	70	255	45	53F
		Varilla	Duro	380	415	20	60B
		Varilla	Suave	70	275	50	55F
C23000	Latón rojo	Lámina	Duro	395	480	5	77B
		Lámina	Suave	85	275	47	50F
		Varilla	Duro	360	395	23	75B
		Varilla	Suave	70	275	55	55F
C26000	Latón para cartuchos	Lámina	Duro	435	525	8	82B
		Lámina	Suave	105	325	62	64F
		Varilla	Duro	360	480	30	80B
		Varilla	Suave	110	330	65	65F
C27000	Latón amarillo	Lámina	Duro	415	510	8	80B
		Lámina	Suave	105	325	62	64F
		Varilla	Duro	310	415	25	80B
		Varilla	Suave	110	330	65	65F

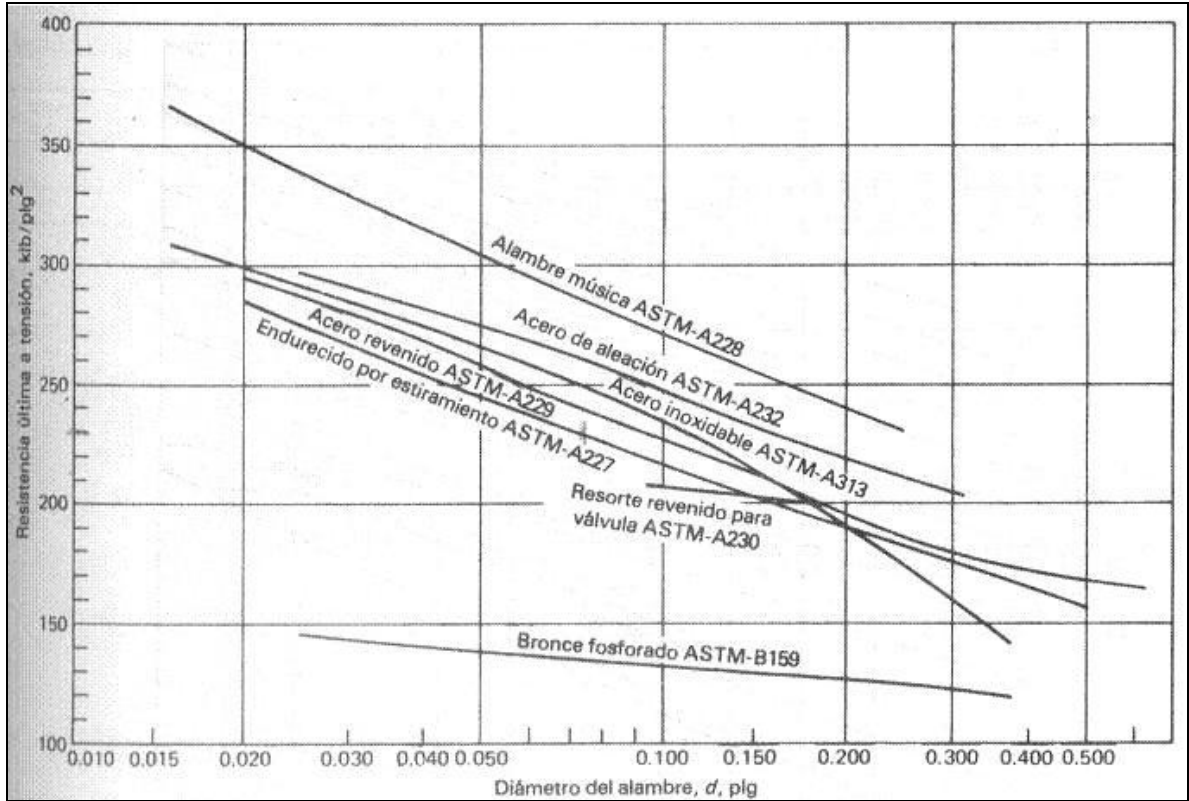
⁶⁷ SHIGLEY, Joseph, MITCHELL, Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica. Tercera edición en español. Editorial McGraw-Hill. Mexico, 1985. p. 874.

10. Propiedades de diferentes tipos de tierras⁶⁸.

Soil	Specific Gravity (ρ_g)	Soil Cohesion (Pa)	Friction Angle ($^\circ$)	k_c (N/m^{n+1})*	k_ϕ (N/m^{n+2})*	Consistency ($k=k_c+bk_\phi$)	Deformation Coeff (n)**
DLR soil simulant A	4.24	188	24.8	2370	60300	8400	0.63
DLR soil simulant B	4.24	441	17.8	18773	763600	95133	1.1
VL1 drift	4.29	1600	18	1400	820000	83400	1.0
VL1 blocky	5.97	5500	30.8	1400	820000	83400	1.0
VL2 crusty-cloddy	5.22	1100	34.5	1400	820000	83400	1.0
PL drift	4.36	380	23.1	1400	820000	83400	1.0
PL cloddy	5.70	170	37	1400	820000	83400	1.0
Dry sand	5.67	1040	28	990	1528000	153790	1.1
Sandy loam	5.67	1720	29	5270	1515000	156770	0.7
Clayey soil	5.67	4140	13	13190	692200	82410	0.5
MER-B 'sandy loam'	4.24	4800	20.0	28000	7600000	788000	1.0
MER-B 'slope soil'	4.24	500	20.0	6800	210000	27800	0.8

⁶⁸ PATEL, N, SCOTT, G, ELLERY, A. Application of bekker theory for planetary exploration through wheeled, tracked and legged vehicle locomotion. Surrey Space Centre, University of Surrey, Guildford, UK

11. Resistencia última a la tensión de diferentes materiales para resortes versus el diámetro del alambre⁶⁹.



⁶⁹ DEUTSCHMAN, Op. cit., p. 927

12. Velocidades de avance y corte recomendadas por Mellin Tool company para escariadores de extremo plano.

MVH - VARIABLE HELIX END MILLS

Speed and Feed Data

Material	SFM	Chip Load per Tooth			
		1/8"	1/4"	1/2"	1"
Aluminum Alloys	1200	.0010	.0020	.0040	.0080
Carbon Steel	300-600	.0010	.0015	.0030	.0060
Cast Iron	350-550	.0010	.0015	.0030	.0060
Copper Alloys	500-900	.0010	.0020	.0030	.0060
Steel - Annealed	350-500	.0010	.0020	.0030	.0050
Steel - Rc 18-24	150-500	.0004	.0008	.0015	.0045
Steel - Rc 25-37	125-200	.0003	.0005	.0010	.0030
Stainless Steel - Free Machining	250-400	.0005	.0010	.0020	.0030
Stainless Steel - Other	150-300	.0005	.0010	.0020	.0030
Inconel/Monel	60-100	.0005	.0010	.0015	.0030
Titanium	175-300	.0005	.0008	.0015	.0030

All speeds and feeds are suggested starting points. They may be increased or decreased depending on machine condition, depth of cut, finish required, coolant, etc.

ROUGHING END MILLS

Speed and Feed Data

Material	SFM	Chip Load per Tooth			
		1/8"	1/4"	1/2"	1"
Aluminum Alloys	125-250	.0010	.0020	.0025	.0030
Magnesium	125-250	.0010	.0020	.0025	.0030
Copper	75-100	.0008	.0015	.0030	.0060
Brass	85-110	.0008	.0015	.0030	.0060
Bronze	75-100	.0008	.0015	.0030	.0060
Cast Iron	100-125	.0008	.0015	.0025	.0050
Cast Steel	75-100	.0008	.0015	.0025	.0050
Malleable Iron	80-120	.0008	.0015	.0025	.0050
Stainless Steel					
Free Machining	75-90	.0005	.0007	.0012	.0020
Other	50-75	.0005	.0007	.0012	.0020
Steel					
Annealed	100-125	.0010	.0020	.0040	.0060
Rc 18-24	75-100	.0070	.0012	.0030	.0050
Rc 25-37	40-75	.0005	.0010	.0020	.0040
Titanium					
Up to Rc 30	40-75	.0005	.0012	.0025	.0050
Rc 30+	20-25	.0005	.0010	.0020	.0035
High Temp Alloys					
Austenitic	12-20	*	.0007	.0015	.0030
Ferritic	50-75	.0004	.0007	.0020	.0050
Nickel Base	20-25	.0004	.0007	.0015	.0030
Cobalt Base	8-15	*	.0007	.0015	.0030

LIST OF SYMBOLS

F = NUMBER OF FLUTES
D = DIAMETER OF CUTTER
R.P.M. = REVOLUTIONS PER MINUTE
S.F.M. = SURFACE FEET PER MINUTE
I.P.M. = FEED RATE: INCHES PER MINUTE
I.P.R. = FEED RATE: INCHES PER REVOLUTION

MACHINING FORMULAS

S.F.M. = 0.262 x D x R.P.M.
R.P.M. = $\frac{3.82 \times \text{S.F.M.}}{D}$
I.P.R. = $\frac{\text{I.P.M.}}{\text{R.P.M.}}$ or CHIP LOAD x F
I.P.M. = R.P.M. x I.P.R.
CHIP LOAD = $\frac{\text{I.P.M.}}{\text{R.P.M.} \times F}$ or $\frac{\text{I.P.R.}}{F}$

Phone: (800) 521-1078 □ (216) 362-4200 Fax: (800) 521-1558 □ (216) 362-4230

115


Fuente: catálogo de Mellin Tool Company..

13. Velocidades de corte y avance recomendadas en función de el material a mecanizar y del diámetro de la herramienta, para escariadores de HSS.

MATERIAL		HEAT-RESISTANT COBALT BASE ALLOYS (60-50 C)		HEAT-RESISTANT AUSTENITIC ALLOYS (66-50 C)		HEAT-RESISTANT NICKEL BASE ALLOYS, HIGH STRENGTH STAINLESS STEELS, HIGH STRENGTH TITANIUM ALLOYS		HIGH STRENGTH STAINLESS STEELS, HIGH TENSILE STEELS (40-50 C)		TITANIUM ALLOYS		HEAT-RESISTANT FERRITIC BASE ALLOYS, MEDIUM STRENGTH STAINLESS STEELS, UNALLOYED TITANIUM TOOL STEELS (30-40 C)		MACHINE STEEL, HARD BRASS AND BRONZE, ELECTROLYTIC COPPER, MILD STEEL FORGINGS (20-30 C)		CAST IRON, MILD STEEL, HALF-HARD BRASS AND BRONZE		BRASS, BRONZE, ALLOYED ALUMINUM, ABRASIVE PLASTICS		ALUMINUM, PLASTICS, WOOD	
		DA OF ENDMILLS	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM	FEED CHIP LEAD PER TOOTH	SPEED RPM
1/16	332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/2	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15/16	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 3/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 5/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 3/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 7/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 1/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 1/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 3/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 1/2	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 5/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 3/4	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 7/8	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Note: All speed and feed data are suggested starting points. They may be increased or decreased depending on machine condition, depth of cut, finish required, coolant, etc.

14. Recomendaciones de uso de los recubrimientos en herramientas de corte.

BLUE-MASTER® 

RECOMENDACIONES DE USO DE LOS RECUBRIMIENTOS PVD

CORTE

	ACEROS	FUNDICION	ALUMINIO (>12% Si)	ALUMINIO (<12% Si)	SUPER ALEACIONES (Ti, Ni, Mg, Fe)	COBRE	PLASTICOS	BRONCE LATON
Taladrado	1ª GRADVIC	GRADVIC	AlTiN	TiCN-MP	AlTiN	CrN	TiCN	TiCN-MP
	2ª AlTiN	AlTiN	TiCN	GRADVIC	GRADVIC		TiCN-MP	TiAlCN
Torneado	1ª TiAlCN	GRADVIC	AlTiN	TiCN-MP	AlTiN	CrN	TiCN	TiCN-MP
	2ª AlTiN	AlTiN	TiCN	GRADVIC	GRADVIC		TiCN-MP	TiAlCN
Fresado	1ª TiAlCN	GRADVIC	AlTiN	GRADVIC	GRADVIC	CrN	TiCN	TiCN-MP
	2ª GRADVIC	AlTiN	TiCN-MP	TiCN-MP	AlTiN		TiCN-MP	TiAlCN
Roscado	1ª TiCN-MP	TiAlCN	GRADVIC	CROMVIC	TiCN-MP	CrN	TiCN	TiCN-MP
	2ª GRADVIC	TiCN-MP	TiCN-MP	TiCN-MP	GRADVIC		TiCN-MP	TiAlCN
Serrado	1ª TiAlCN	TiCN-MP	TiAlCN	TiCN-MP	TiAlCN	CrN	TiCN	TiCN-MP
	2ª TiN	TiN	TiN	TiN	TiN		TiCN-MP	TiAlCN
Brochado, Escariado	1ª TiCN-MP	AlTiN	AlTiN	TiAlCN	TiCN-MP	CrN	TiCN	
	2ª AlTiN	TiCN-MP	TiCN-MP	TiCN-MP	GRADVIC		TiCN-MP	

CONFORMADO SIN ARRANQUE DE VIRUTA

	ACEROS	FUNDICION	ALUMINIO (>12% Si)	ALUMINIO (<12% Si)	SUPER ALEACIONES (Ti, Ni, Mg, Fe)	COBRE	PLASTICOS	BRONCE LATON
Moldes de inyección	1ª TiN		TiN	TiN	TiN	CrN	CrN	TiN
	2ª CrN		CrN	CrN	CrN		TiN	CrN
Estampación	1ª TiCN-MP		TiCN-MP	TiCN-MP	TiCN-MP	CrN	TiCN	
	2ª TiAlCN		TiCN	GRADVIC	GRADVIC		TiCN-MP	
Embutición, Conformado	1ª TiCN-MP		TiCN-MP	TiCN-MP	TiCN-MP	CrN	TiCN	
	2ª TiAlCN		GRADVIC	GRADVIC	GRADVIC		TiCN-MP	



INFORMACIÓN FACILITADA POR LA EMPRESA METALESTALKI

1ª Recomendación
 2ª Recomendación

371 |

Fuente: catálogo de Blue Masters.

15. Condiciones de corte recomendadas en operaciones de taladrado.

 		APLICACIONES DE LAS BROCAS EN LOS MATERIALES MAS USUALES				
MATERIAL	Tipo de Broca	Calidad	Angulo de Punta	Velocidad de Corte m/min.	Avances s/Tabla	Refrigerante
ACEROS DE DECOLETAJE Hasta 500 N/mm ²	*N	HSS	118°	20-25	D	EMULSION
	N	HSSCo	135°	25-30		
	N	TIN	118°/135°	45-50		
ACERO NO ALEADO CON CONTENIDO EN CARBONO ≤ 0,4%. Durezas 800 N/mm ²	*N	HSS	118°	15-20	D	EMULSION
	*N	HSSCo	135°	20-25		
	N	TIN	118°/135°	35-40		
ACERO NO ALEADO CON CONTENIDO EN CARBONO ≤ 0,4% Dureza 800-1000 N/mm ² ACERO CEMENTADO Y TEMPLADO REVENIDO DUREZA ≤ 700 N/mm ²	N	HSS	118°	12-15	C	EMULSION
	*N	HSSCo	135°	15-20		
	*N	TIN	118°/135°	25-30		
ACERO NO ALEADO PARA HERRAMIENTAS Dureza 800-1000 N/mm ² ACERO CEMENTADO Y TEMPLADO Y REVENIDO DUREZA 700-1000 N/mm ²	N	HSS	118°	10-12	C	EMULSION
	*N	HSSCo	135°	15-17		
	*N	TIN	118°/135°	20-25		
ACERO ALEADO PARA HERRAMIENTAS Dureza 800-1000 N/mm ² ACERO CEMENTADO DUREZA 1000-1200 N/mm ²	--	--	--	--	B	EMULSION
	*N	HSSCo	135°	10-12		
	*N	TIN	118°/135°	18-20		
ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO DUREZA > 1200 N/mm ²	--	--	--	--	A	EMULSION (Aceite)
	*N	HSSCo	135°	4-5		
	*N	TIN	118°/235°	8-10		
ACEROS MARTENSITICOS INOXIDABLES Cr-Mo	--	--	--	--	A	EMULSION (Aceite)
	*W/INOX	HSSCo	135°	8-10		
	W/INOX	TIN	135°	18-20		
ACEROS AUSTENITICOS INOXIDABLES Cr-Ni ACEROS TERMOESTABLES	--	--	--	--	A	ACEITE
	*N	HSSCo	135°	8-10		
	*N	TIN	118°/135°	15-20		
ACEROS CON MANGANESO > 10% Mn	--	--	--	--	A	SECO
	*N	HSSCo	135°	3		
	*N	TIN	118°/135°	5-6		
ACEROS PARA MUELLES	--	--	--	--	A	SECO
	*N	HSSCo	135°	5		
	*N	TIN	118°/135°	8-10		
ALEACIONES HASTELLOY	--	--	--	--	A	ACEITE
	*N	HSSCo	135°	4		
	*N	TIN	118°/135°	6-8		
FERRO TIC	--	--	--	--	A	SECO (Aire)
	*N	HSSCo	135°	3		
	*N	TIN	118°/135°	5-6		
TITANIO Y ALEACIONES DE TITANIO	--	--	--	--	A	ACEITE
	*N	HSSCo	135°	5		
	*N	TIN	118°/135°	8-10		
FUNDICION GRIS FUNDICION MALEABLE	*N	HSS	118°	20-25	E	SECO (Emulsión)
	*N	HSSCo	135°	30-35		
	N	TIN	118°/135°	40-50		
FUNDICION DURA (Semimaleable)	--	--	--	--	D	SECO (Emulsión)
	*N	HSSCo	135°	8-10		
	*N	TIN	118°/135°	15-16		
LATON DURO	*H	HSS	118°	50-60	F	SECO (Aceite)
	--	--	--	--		
	H	TIN	118°	90-100		
LATON TENAZ	*H/N	HSS	118°	40-50	E	EMULSION
	--	--	--	--		
	H/N	TIN	118°	80-85		
COBRE SIDERURGICO	*W	HSS	118°	25-30	E	EMULSION
	--	--	--	--		
	W	TIN	118°	50-60		

372

* TIPO DE BROCA RECOMENDADA. SEGUN MATERIALES

(Continuación tabla 15)





**APLICACIONES DE LAS BROCAS
EN LOS MATERIALES MAS USUALES**

MATERIAL	Tipo de Broca	Calidad	Angulo de Punta	Velocidad de Corte m/min.	Avances s/Tabla	Refrigerante
COBRE ELECTROLITICO	—	—	—	—	E	EMULSION (Aceite)
	N	HSSCo	135°	20-25		
	N	TIN	118°/135°	45-50		
ARGENTON (Latón blanco)	N/H	HSS	118°	18-20	C	ACEITE (Emulsión)
	N/H	HSSCo	135°	22-25		
	—	—	—	—		
ALEACIONES COBRE-NIQUEL ALEACIONES COBRE-ESTAÑO	—	—	—	—	C	ACEITE (Emulsión)
	N	HSSCo	135°	22-25		
	N	TIN	118°/135°	35-40		
ALEACIONES COBRE-ALUMINIO	—	—	—	—	C	ACEITE (Emulsión)
	N/INOX	HSSCo	135°	10-13		
	N/INOX	TIN	118°/135°	20-25		
ALEACIONES COBRE-BERILIO	N/H	HSS	118°	8-10	B	ACEITE (Emulsión)
	N/H	HSSCo	135°	12-13		
	N/H	TIN	118°/135°	18-20		
ALEACIONES COBRE-MANGANESO ALEACIONES COBRE-SILICIO	—	—	—	—	C	ACEITE (Emulsión)
	N	HSS	118°	20-25		
	N	HSSCo	135°	30-35		
ALUMINIO PURO	W/	HSS	135°	40-50	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	50-55		
	—	—	—	—		
ALEACIONES ALUMINIO-MANGANESO ALEACIONES ALUMINIO-CROMO	W/	HSS	135°	40-50	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	50-55		
	—	—	—	—		
ALEACIONES ALUMINIO-PLOMO ANTIMONIO ESTAÑO	W/	HSS	135°	70-80	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	90-100		
	—	—	—	—		
ALEACIONES DE ALUMINIO Y COBRE CON SILICIO, MAGNESIO, PLOMO ESTAÑO, TITANIO Y BIRILIO	W/	HSS	135°	40-45	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	50-55		
	—	—	—	—		
ALEACIONES DE ALUMINIO Y SILICIO CON COBRE, MAGNESIO, MANGANESO Y CROMO	W	HSS	135°	40-45	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	50-55		
	W	TIN	135°	75-80		
ALEACIONES DE ALUMINIO Y MAGNESIO CON SILICIO, MANGANESO Y CROMO	W/	HSS	135°	70-80	E	EMULSION
	W/INOX	HSSCo	135°	90-100		
	—	—	—	—		
ALEACIONES DE MAGNESIO (Electrón) (1)	W/N	HSS	135°/118°	70-80	E	SECO (Sin Agua)
	W/N	HSSCo	135°	90-100		
	—	—	—	—		
ZINC, ZAMAC	N	HSS	118°	30-35	D	EMULSION
	N	HSSCo	135°	40-45		
	N	TIN	118°/135°	60-65		
PLASTICOS DUROS	—	—	—	—	C	SECO (Aire a Presión)
	H	HSSCo	90°	10-15		
	H	TIN	118°/90°	20-25		
TERMOPLASTICOS (Blandos)	W	HSS	130°	20-25	C	SECO (Aire a Presión)
	—	—	—	—		
	W	TIN	130°	45-50		
PAPEL DURO	H	HSS	118°/90°	15-20	C	SECO (Aire a Presión)
	W	HSSCo	135°	20-25		
	H	TIN	118°/135°	35-40		
GOMA DURA	—	—	—	—	F	SECO (Aire a Presión)
	H	HSS	90°	10-12		
	H	HSSCo	90°	18-20		
	H	TIN	90°	25-30		

(1) W = Agujeros Profundos N = Agujeros Cortos

Fuente: Catálogo de Blue Master.

16. Revoluciones por minuto recomendadas para corte con brocas en funcion de la velocidad de corte y el diametro de la herramienta.

**TABLA DE REVOLUCIONES POR MINUTO (R.P.M.)
SEGUN Ø BROCA Y VELOCIDAD DE CORTE (Vc)**

VDAD. CORTE	Ø BROCA Y REVOLUCIONES POR MINUTO																	
	m/min.	2	2,50	3	4	5	6,50	8	10	13	16	20	25	30	40	50	63	80
3	477	382	318	238	190	147	119	95	73	60	48	38	32	24	19	15	12	
5	796	636	530	398	318	245	198	159	122	99	80	64	53	40	32	25	20	
8	1.273	1.018	848	636	509	392	318	254	195	159	127	102	85	64	50	40	32	
10	1.592	1.273	1.061	795	636	490	398	318	245	199	159	127	106	80	64	50	40	
12	1.910	1.528	1.273	955	764	588	477	382	294	238	190	152	127	95	76	60	48	
15	2.387	1.910	1.592	1.194	955	735	596	477	367	298	138	190	159	119	95	75	60	
20	3.183	2.546	2.122	1.592	1.273	979	795	636	490	398	318	255	212	159	127	101	80	
25	3.979	3.183	2.652	1.989	1.592	1224	995	795	612	497	398	318	265	198	159	126	99	
30	4.775	3.820	3.183	2.387	1.910	1469	1.194	995	735	596	477	382	318	238	190	151	119	
35	5.570	4.456	3.714	2.785	2.228	1.714	1.393	1.114	857	696	557	445	371	278	222	176	139	
40	6.366	5.092	4.245	3.183	2.456	1958	1.592	1.273	979	795	636	509	424	318	255	202	159	
45	7.162	5.730	4.775	3.581	2.865	2.204	1.790	1.432	1.102	895	716	572	477	358	286	227	179	
50	7.958	6.366	5.305	3.978	3.183	2.448	1.990	1.592	1.224	995	795	636	530	398	318	252	198	
55	8.754	7.002	5.836	4.376	3.501	2.693	2.188	1.750	1.346	1.094	875	700	584	438	350	277	218	
60	9.550	7.639	6.366	4.775	3.820	2.938	2.388	1.910	1.469	1.194	955	764	636	477	382	303	238	
70	11.142	8.912	7.428	5.570	4.456	3.428	2.785	2.228	1.714	1.392	1.114	891	742	557	445	354	278	
75	11.937	9.549	7.958	5.968	4.775	3.672	2.981	2.387	1.836	1.492	1.194	955	795	596	477	378	298	
80	12.732	10.185	8.488	6.366	5.092	3.918	3.183	2.546	1.958	1.592	1.273	1.018	848	636	509	404	318	
90	14.324	11.459	9.550	7.162	5.730	4.407	1.581	2.865	2.204	1.790	1.432	1.145	955	716	572	455	358	
100	15.915	12.732	10.611	7.958	6.366	4.897	3.978	3.183	2.448	1.989	1.592	1.273	1.061	795	636	505	398	

FORMULAS DE CONVERSION

$$R.P.M = \frac{Vc \times 1.000}{\varnothing \times \Pi}$$

$$Vc. = \frac{R.P.M. \times \varnothing \times \Pi}{1.000}$$

EJEMPLO:

Material a taladrar: FUNDICION GRIS
Ø Broca: 10 Vc: 20 m/min.

$$R.P.M. = \frac{20 \times 1.000}{10 \times 3.1416} = 637$$

Fuente: catálogo de Blue Master.

17. Velocidades de avance recomendadas para operaciones de taladrado.


BLUE-MASTER® 

TABLA DE AVANCES

Ø BROCA	BLOQUE					
	A	B	C	D	E	F
2	0,02	0,025	0,032	0,040	0,05	0,063
2,50	0,025	0,032	0,04	0,050	0,063	0,08
3,00	0,030	0,04	0,05	0,060	0,08	0,1
4	0,04	0,05	0,063	0,080	0,1	0,125
5	0,04	0,05	0,063	0,080	0,1	0,125
6,50	0,05	0,063	0,08	0,1	0,125	0,16
8	0,063	0,08	0,1	0,125	0,16	0,2
10	0,08	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25
13	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22	0,27
16	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25	0,315
20	0,125	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4
25	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5
30	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5
40	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63
50	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8
63	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8	1,0
80	0,4	0,5	0,63	0,8	1,0	1,25

NOTA: ESTOS VALORES SON ORIENTATIVAMENTE VALIDOS PARA LAS SIGUIENTES CONDICIONES DE USO:

- Avance uniforme de taladrado.
- Utilización de brocas de dimensiones según DIN 338 o DIN 345.
- Calidades HSS, HSSCo.
- Longitud máxima de taladrado (barrenado) igual a 3 veces el diámetro de la broca.
- Buena estabilidad y rigidez en la máquina y en la fijación (amarre) de la pieza.
- Sin casquillos de guía de broca.
- Buena refrigeración (refrigerante, caudal, presión).
- Taladrado vertical y entrada y salida de broca, perpendiculares a la superficie (cara) a taladrar.

Caso de que no se cumplan las condiciones arriba descritas se deberán variar los valores de velocidad de corte y/o avance disminuyéndolos o aumentándolos.

Fuente: catálogo de Blue Master.

18. Tolerancias recomendadas para los alojamientos de los rodamientos radiales.

Radial bearings (except precision bearings) - non-split housings Calculations and graphics presentation			
Conditions	Examples	Tolerance ¹⁾	Displacement of outer ring
Rotating outer ring load			
Heavy loads on bearings in thin-walled housings, heavy shock loads ($P > 0,1 C$)	Roller bearing wheel hubs, big-end bearings	P7	Cannot be displaced
Normal to heavy loads ($P > 0,05 C$)	Ball bearing wheel hubs, big-end bearings, crane travelling wheels	N7	Cannot be displaced
Light and variable loads ($P \leq 0,05 C$)	Conveyor rollers, rope sheaves, belt tension pulleys	M7	Cannot be displaced
Direction of load indeterminate			
Heavy shock loads	Electric traction motors	M7	Cannot be displaced
Normal to heavy loads, ($P > 0,05 C$), axial displacement of outer ring unnecessary	Electric motors, pumps, crankshaft bearings	K7	Cannot be displaced as a rule
Accurate or quiet running²⁾			
Ball bearings	Small electric motors	J6 ³⁾	Can be displaced
Taper roller bearings	When adjusted via the outer ring	JS5	-
	Axially located outer ring	K5	-
	Rotating outer ring load	M5	-
¹⁾ For ball bearings with $D \leq 100$ mm, tolerance grade IT6 is often preferable and is recommended for bearings with thin-walled rings, e.g. in the 7, 8 or 9 Diameter Series. For these series, cylindricity tolerances IT4 are also recommended ²⁾ For high precision bearings to tolerance class P5 or better, other recommendations apply, see table T7 ³⁾ When easy displacement is required use H6 instead of J6			

Fuente: www.skf.com

ANEXO G. Listados

Tabla 60. Operaciones realizadas en el mecanizado de la platina del primer montaje.

Operación	Herramienta	P	S	F	N	P total	Geometría	T [min]	Observaciones
1. Peck drill – full retract*	Broca de centrar N° 1	1	4000	65	3	3	101 puntos	12.915	Profundidad medida desde la punta de la herramienta
2. Peck drill – full retract	Broca 1/8"	1.5	3500	50	5	7.5	101 puntos	27.048	La broca debe atravesar completamente la platina.
3. Peck drill – full retract	Broca 6.5mm	3	1958	125	3	9	66 puntos	15.761	La broca debe atravesar completamente la platina.
4. Peck drill – full retract	Broca 1/2"	4	850	200	3	12	5 puntos	2.869	Solo agujero central de la barra ppal de suspensión y agujeros de soportes de direcc
5-16. Pocket (Standard)**	End mill flat 1/4"	0.3 0.1	2500	400	13 1	4	40 cadenas 40 puntos	206.22	40 cadenas – geometría de los vaciados 40 puntos - agujeros de entrada de la hta.
17. Contour(2D) Desbaste	End mill flat 1/4"	0.3	2500	400	22	6.6	22 cadenas	47.562	22 cadenas – definen los contornos de todas las piezas.
18. Contour(2D) Afinado	End mill flat 1/4"	6.6	2500	400	1	6.6	18 cadenas	17.12	Los 4 contornos faltantes serán afinados con el escariador de 1/8".
19. Pocket (Standard)	End mill flat 1/8"	0.15	4000	200	44	6.6	1 cadena	23.171	El vaciado pasante de la chumacera.
20. Contour(2D)	End mill flat 1/8"	1	4000	200	7	6.6	4 cadenas	24.043	Acabado de los cuatro contorno a los que no se les dio afinado con el otro escariador
21. Contour(2D)	End mill flat 1/8"	1	4000	200	4	4	3 cadenas	13.268	Afinado del vaciado interno de los soportes inferiores de dirección.
22. Contour(2D)	End mill flat 1/8"	1	4000	200	7	6.6	4 cadenas	18.457	Afinado del vaciado interno de los soportes de dirección superiores

*La operación de taladrado Peck drill – full retract hace retroceder la herramienta hasta una altura de retroceso por encima de la superficie a taladrar.

**Esta operación permite hacer un afinado de las paredes del vaciado mecanizado. El espesor (XY), el número de pasadas (Z), las revoluciones y la velocidad de avance de tal afinado pueden adoptar valores diferentes a los valores principales de la operación. Cuando

esta alternativa fue utilizada con el escariador de 1/4", se hizo una sola pasada de 0.1mm de espesor (XY) a la profundidad total vaciado, 3000 rpm y 200mm/min.

P: profundidad de cada pasada [mm], **N:** número de pasadas, **S:** velocidad de giro del husillo [rpm], **F:** velocidad de avance [mm/min],

P total: profundidad de corte total de la operación [mm]

Tabla 61. Operaciones de mecanizado para la elaboración de los rines en CNC

Operación	Herramienta	P	S	F	N	P total	Geometría	T [min]	Observaciones
1. Peck drill – full retract*	Broca de centrar N° 1	1	4000	65	3	3	15 puntos	3.31	Profundidad medida desde la punta de la herramienta
2. Peck drill – full retract	Broca 1/8"	1.5	3500	50	10	14	15 puntos	5.98	La broca debe atravesar completamente la cara plana del rin.
3. Peck drill – full retract	Broca 6.5mm	3	1958	125	5	14	66 puntos	15.76	La broca debe atravesar completamente la platina.
4. Pocket (Standard)**	End mill flat 1/4"	0.4	2500	400	27	10.5	5 cadenas 5 puntos	42.27	5 cadenas – geometría ventanas grandes 5 puntos - agujeros de entrada de la hta.
5. Pocket (Standard)	End mill flat 1/4"	1	2500	400	11	10.5	1 cadena 1 punto	1.08	1 cadena – agujero central. 1 punto – centro del agujero
6. Pocket (Standard)	End mill flat 1/4"	0.4 0.2	2500	400	6 1	5	1 cadena 1 punto	4.58	Vaciado en la parte central para facilitar el torneado de la superficie cónica frontal.
7. Contour(2D)	End mill flat 1/8"	0.75	3500	200	14	10.5	5 cadenas	32.95	Afinado de las paredes de las ventanas abiertas en la operación 4. Radios pequeños
8. Pocket (Standard)	End mill flat 1/8"	0.25	3500	200	42	10.5	5 cadenas 5 puntos	83.58	5 cadenas – geometría ventanas pequeñas 5 puntos - agujeros de entrada de la hta.

P: profundidad de cada pasada [mm], **N:** número de pasadas, **S:** velocidad de giro del husillo [rpm], **F:** velocidad de avance [mm/min],
P total: profundidad de corte total de la operación [mm]

Tabla 62. Resultados de los cálculos realizados para el diseño del resorte de torsión.

Na	Cal	D [in]	D [mm]	R [in]	L	R [mm]	2R [mm]	Dint [mm]	C	Kf	Sy [Psi]	σ [Psi]	N
1,5	15	0,072	1,8288	0,2866	3,6576	7,2802	14,5605	12,7317	7,9618	1,0517	230000	254007,2287	0,91
2,5	15	0,072	1,8288	0,1720	5,4864	4,3681	8,7363	6,9075	4,7771	1,1950	230000	288619,3548	0,80
3,5	15	0,072	1,8288	0,1228	7,3152	3,1201	6,2402	4,4114	3,4122	1,2565	230000	303453,1232	0,76
1,5	14	0,083	2,1082	0,5062	4,2164	12,8567	25,7133	23,6051	12,1968	0,8611	225000	135763,9257	1,66
2,5	14	0,083	2,1082	0,3037	6,3246	7,7140	15,4280	13,3198	7,3181	1,0807	225000	170376,0519	1,32
3,5	14	0,083	2,1082	0,2169	8,4328	5,5100	11,0200	8,9118	5,2272	1,1748	225000	185209,8202	1,21
1,5	13	0,095	2,413	0,8687	4,826	22,0653	44,1307	41,7177	18,2887	0,5870	220000	61718,65058	3,56
2,5	13	0,095	2,413	0,5212	7,239	13,2392	26,4784	24,0654	10,9732	0,9162	220000	96330,77677	2,28
3,5	13	0,095	2,413	0,3723	9,652	9,4566	18,9131	16,5001	7,8380	1,0573	220000	111164,5451	1,98
1,5	12	0,109	2,7686	1,5055	5,5372	38,2404	76,4807	73,7121	27,6243	0,1669	218000	11618,03276	18,76
2,5	12	0,109	2,7686	0,9033	8,3058	22,9442	45,8884	43,1198	16,5746	0,6641	218000	46230,15895	4,72
3,5	12	0,109	2,7686	0,6452	11,0744	16,3887	32,7775	30,0089	11,8390	0,8772	218000	61063,92732	3,57
1,5	11	0,12	3,048	2,2116	6,096	56,1747	112,3495	109,3015	36,8601	-0,2487	210000	-12974,20594	-16,19
2,5	11	0,12	3,048	1,3270	9,144	33,7048	67,4097	64,3617	22,1160	0,4148	210000	21637,92025	9,71
3,5	11	0,12	3,048	0,9478	12,192	24,0749	48,1498	45,1018	15,7972	0,6991	210000	36471,68861	5,76

En amarillo aparece el resorte que se adapta a los requerimientos de diseño.

ANEXO H. Planos del sistema de locomoción.