



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

AUTORES:

MOYOLEMA CHAGLLA, DIEGO PAÚL

PEREIRA SALAZAR, ROBERTO PATRICIO

TEMA:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA EL RECORRIDO DE
TRAYECTORIAS DEFINIDAS POR COMPUTADOR PARA EL
LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL DEL DECEM”**

DIRECTOR: ING. ACOSTA, MILTON

CODIRECTOR: ING. OROZCO, LUIS

SANGOLQUÍ, MAYO 2014

CERTIFICADO

Ing. Milton Acosta

Ing. Luis Orozco

CERTIFICAN

Que el trabajo **“Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot móvil para el recorrido de trayectorias definidas por computador para el Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM”**, realizado por los Sres. Diego Paúl Moyolema Chaglla y Roberto Patricio Pereira Salazar, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto, el cual contiene los archivos en formato de documento portátil (pdf). Autorizan a los señores Diego Paúl Moyolema Chaglla y Roberto Patricio Pereira Salazar, que lo entreguen al Ingeniero Francisco Terneus, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica.

Ing. Milton Acosta

DIRECTOR

Ing. Luis Orozco

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Moyolema Chaglla Diego Paúl y Pereira Salazar Roberto Patricio

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot móvil para el recorrido de trayectorias definidas por computador para el Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

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

Sangolquí, 14 de Mayo de 2014

Moyolema Chaglla Diego Paúl

Pereira Salazar Roberto Patricio

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Moyolema Chaglla Diego Paúl y Pereira Salazar Roberto Patricio

AUTORIZAMOS:

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la Biblioteca Virtual de la Institución del trabajo **“Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot móvil para el recorrido de trayectorias definidas por computador para el Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM”**, cuyo contenido, idea y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 14 de Mayo de 2014.

Moyolema Chaglla Diego Paúl

Pereira Salazar Roberto Patricio

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por guiarme y acompañarme siempre en mi camino, por darme fuerzas para no desmayar ante las adversidades que se presentaban y por brindarme su sabiduría para poder culminarlo con éxito.

A mis padres Luis y Myrian, quienes me brindaron su apoyo incondicional, su confianza, su amor y me enseñaron a luchar y sobresalir ante cualquier dificultad para cumplir las metas y sueños propuestos.

A mi hermana Jéssica, quien me ha acompañado en todo momento cuidándome y apoyándome cuando lo necesitaba.

A mis abuelitos, tíos y primos por protegerme y darme su cariño en esta etapa de mi vida.

Y en especial quiero dedicar este proyecto a mi abuelito Papá Gilo y a mi tío Fabián, por amarme, cuidarme y enseñarme hacer un luchador, por motivarme y apoyarme desde muy niño en mi formación académica. Son y siempre seguirán siendo mi ejemplo y mi inspiración.

Diego Paúl Moyolema Chaglla

“Toda persona debe decidir una vez en su vida si se lanza a triunfar, arriesgándolo todo, o si se sienta a ver el paso de los triunfadores”

Thomas Alva Edison

DEDICATORIA

*A mi padre, pilar fundamental en cada uno de los pasos que he dado.
Quién con su sabiduría y conocimiento, ha hecho que en mi crezca el amor por las cosas imposibles, y las ganas de superar cada día lo ya logrado.
Quién siempre ha estado presente en cada triunfo y derrota apoyándome y aconsejándome.*

*A mi madre, por ser mi mejor amiga y al mismo tiempo a través de sus consejos, enseñanzas y amor me ha demostrado que la vida hay que disfrutarla, de forma sensible e inteligente.
Quién con palabras de aliento y cariño ha inspirado en mí, ser una mejor persona y jamás dejarme caer ante nada.*

*A mi hermano, compañero de vida, amigo único.
Quién con su forma de ser distinta y descomplicada, me ha enseñado que siempre hay que sonreír ante cada circunstancia y ser fuerte en el momento más inesperado.*

*A ustedes les dedico el producto de mi esfuerzo.
Porque soy una viva imagen de las grandes personas que son.*

ROBERTO PATRICIO PEREIRA SALAZAR

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad".

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por guiarme y protegerme siempre.

A mis padres Luis y Myrian por el apoyo incondicional que me brindan cada día de mi vida, gracias por confiar en mí y por acompañarme siempre aconsejándome, cuidándome, y siendo un ejemplo y una inspiración como personas luchadoras para mí. Gracias por todo el amor y la paciencia que me han dado durante esta etapa de mi vida.

A mi hermana Jéssica, por ser una amiga con quien puedo contar cada día se mi vida, gracias por ser mi apoyo y mi inspiración.

A mi familia por brindarme su cariño, su compañía y su apoyo para alcanzar mis metas, en especial a mi tío Fabián, quien me apoyo incondicionalmente con este proyecto.

A mi amigo, hermano y compañero de tesis Patricio, gracias por tu apoyo y por la confianza que has tenido conmigo para realizar este proyecto.

A mis amigos y compañeros de aula Harold, Rubén, Alejo, Jorgito, Lucho, Miguel, Milton, Diego, Patricio A., Félix y Christian gracias por su apoyo, por estar presente en las buenas y en las malas, y por compartir conmigo todas esas experiencias de mi vida universitaria.

A mi Director Ing. Milton Acosta y mi Co-Director Ing. Luis Orozco por guiarnos durante todo este proyecto.

Diego Paúl Moyolema Chaglla

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Patricio y Margarita, por quienes siempre sentiré gratitud infinita, por confiar en mí y apoyarme en cada decisión que he tomado. Y al mismo tiempo, demostrarme que no existen metas imposibles de alcanzar, cuando uno disfruta el camino para conseguirlas. Gracias por el amor que me han demostrado, la paciencia que han tenido conmigo y sobre todo, por ser mi más grande inspiración.

A mi hermano, David, por ser la persona con quién puedo contar en cada momento de mi vida, sin importar la hora o el lugar. Gracias por ser mi respaldo y apoyo cada día, pero más que nada, gracias por empujarme a llegar lejos.

A mi enamorada, Karen, que con amor y paciencia me alentó para continuar, gracias por estar a mi lado en este camino, de manera incondicional, demostrándome que vale la pena sacrificar tiempo para conseguir los objetivos planteados.

A mi compañero, Diego, gracias amigo por confiar en mí para juntos llegar a este punto en nuestras vidas.

A mis amigos, Félix y Christian, quienes de manera oportuna han sabido colaborar con su amistad y han dado soporte profesional en la consecución de este proyecto, aún tenemos muchas metas por cumplir amigos.

A mi maestro, Pablo, gracias por cultivar en mí ese amor por la ciencia y el conocimiento.

A mis amigos y compañeros de aula, Rubén, Alejandro y Jorge, gracias por ser amigos incondicionales y compartir conmigo las vivencias universitarias que serán inolvidables.

A todos mis familiares y amigos, que han estado pendientes de la consecución de esta meta y me han apoyado para seguir adelante en cada paso que me propongo a dar.

ROBERTO PATRICIO PEREIRA SALAZAR

Tabla de contenido

Capítulo 1.- Introducción a la Robótica.....	1
1.1. Antecedentes de la Robótica Móvil	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Alcance del Proyecto.....	4
1.4. Objetivos	6
1.4.1 Objetivos Generales.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5. Metodología de Trabajo.....	7
Capítulo 2.- Marco Teórico	9
2.1 Robótica	9
2.2 Esquema General del Sistema de un Robot.....	12
2.3 Robótica Móvil	14
2.4 Configuraciones de los robots móviles	15
2.4.1 Sistemas de Locomoción más comunes.....	15
2.4.1.1 Ackerman	15
2.4.1.2 Triciclo Clásico.....	17
2.4.1.3 Dirección Diferencial.....	17
2.4.1.4 Skid Steer	18
2.4.1.5 Pista de Deslizamiento	19
2.4.1.6 Locomoción mediante Patas.....	19
2.4.2 Tipo de ruedas.....	20
2.6 Control de los robots móviles	21
Capítulo 3.- Diseño del Prototipo.....	23
3.1 Definición de los parámetros y características técnicas y generales del prototipo. 23	
3.1.1 Diseño Concurrente del Prototipo	24
3.1.2 Sistema Mecánico	32
3.1.2.1 Subsistema Motriz	32
3.1.2.2 Subsistema Estructural	34
3.1.2.3 Subsistema de Dirección.....	37
3.1.3 Sistema Electrónico.....	39

3.1.4	Sistema de Control.....	40
3.2	Modelado del Prototipo.....	41
3.2.1	Modelado cinemático	41
3.2.2	Modelado dinámico del prototipo.....	45
3.2.2.1	Análisis de Momento en el eje Z.....	47
3.2.2.2	Análisis del desplazamiento de llantas frontales y posteriores.....	48
3.3	Diseño Mecánico.....	51
3.3.1	Cálculo de la Potencia del Motor DC	51
3.3.2	Dimensionamiento del Sistema de Dirección	54
3.3.2.1	Análisis Mecanismo de Dirección	55
3.3.2.2	Cálculo del diámetro de la Barra de Dirección.....	57
3.3.3	Dimensionamiento de Plataforma.....	63
3.3.4	Diseño del Eje de Tracción	65
3.3.5	Diseño de la Transmisión de Potencia	73
3.3.5.1	Cálculos de la longitud de la cadena.....	76
3.3.6	Selección de Ruedas.....	79
3.4	Simulación.....	80
3.4.1	Simulación del movimiento de la dirección	80
3.4.2	Simulación de la Carga Aplicada	82
3.5	Diseño Electrónico y de Control Básico	82
3.5.1	Sistema de Control.....	82
3.5.1.1	Descripción.....	82
3.5.1.2	Variables del Sistema	85
3.5.1.3	Objetivo de Control.....	85
3.5.1.4	Instrumentación.....	86
3.5.1.5	Controlador	95
3.5.1.6	Lógica de Control	97
3.5.2	Sistema de Alimentación	98
3.5.3	Interfaz HMI (Human Machine Interface).....	99
3.6	Diseño Electrónico y Detalle del Control	102
3.6.1	Selección del Hardware.....	102
3.6.1.1	Selección del Controlador	102
3.6.1.2	Selección de Instrumentación.....	103

3.6.1.3	Selección de los Circuitos de Control para los Actuadores.....	109
3.6.2	Diseño de Alimentación	112
3.6.3	Diseño del Sistema de Comunicación	118
3.6.4	Diseño de las Placas Electrónica (PCB).....	121
3.6.5	Esquemas Eléctricos.....	123
3.6.5.1	Diagrama de Control y Potencia	124
3.6.5.2	Esquema de Interconexión	124
3.6.5.3	Esquema de Alambrado	124
3.6.6	Software de Control y Monitoreo	128
3.6.7	Diseño del controlador para el trazado de trayectorias en odometría	129
3.6.8	Programación del Sistema de Adquisición de Datos (Arduino)	133
3.6.9	Diseño de la Interfaz HMI.....	135
Capítulo 4.- Construcción, Montaje y Validación del Prototipo		140
4.1	Proceso de Construcción de Elementos Mecánicos	140
4.2	Proceso de Montaje	141
4.2.1	Soportes de Elementos	141
4.2.2	Ensamble Final Mecánico.....	142
4.2.3	Especificaciones Mecánicas finales del prototipo	143
4.2.4	Despiece.....	143
4.2.5	Construcción de Placas	145
4.2.6	Integración de Sistemas.....	146
4.2.6.1	Conectores y Protección del Cableado	150
4.2.7	Características Finales del Prototipo.....	152
4.2.8	Identificación del Sistema	155
4.2.8.1	Diseño del control de velocidad para la tracción del robot móvil.....	169
4.2.9	Diseño del controlador para el sistema de dirección del robot móvil.....	180
4.2.10	Análisis del modelo cinemático	181
4.3	Validación de Prototipo	188
4.3.1	Verificación del Sistema	188
4.3.1.1	Funcionamiento del Controlador en Modo Manual del HMI	188
4.3.1.2	Pruebas en Modo Automático	190
4.3.2	Protocolo de Pruebas.....	193
4.3.2.1	Depuración del sistema en base a errores.....	205

4.3.2.2	Cumplimiento de trayectorias programadas en tiempo real.....	206
Capítulo 5.- Análisis Económico y Financiero.....		211
5.1	Inversión Inicial del Prototipo – Caso A	211
5.1.1	Costos Directos	211
5.1.1.1	Diseño e Ingeniería	211
5.1.1.2	Materiales	212
5.1.1.3	Maquinaria y Equipos Utilizados.....	214
5.1.1.4	Costos de Mano de Obra	214
5.1.2	Costos Indirectos.....	215
5.1.3	Presupuesto Total	215
5.2	Inversión de la Plataforma Comercial – Caso B	216
5.3	Análisis Económico.....	216
5.1.1	Ingresos económicos.....	216
5.1.2	Egresos	217
5.1.2.1	Depreciación	217
5.1.2.2	Costos de Mantenimiento.....	218
5.1.3	Beneficio	219
5.1	Evaluación del proyecto.....	220
5.1.1	VAN (Valor Actual Neto)	220
5.1.2	TIR (Tasa Interna de Retorno)	222
5.1.3	Beneficio Costo y Rentabilidad	222
Capítulo 6.- Conclusiones y Recomendaciones.....		224
6.1	Conclusiones	224
6.2	Recomendaciones.....	227
Referencias Bibliográficas		229
Anexos.....		230

Índice de figuras

Figura 1 Robot Aurora.....	2
Figura 2 Esquema de la Metodología de Trabajo	8
Figura 3 Robot Experimental Wabot-1 (AMAYA, 2010).....	10
Figura 4 Robot Móvil "Sojourner"	10
Figura 5 Robot "Asimo".....	11
Figura 6 Robot y su Iteración en el Entorno (OLLERO, 2001)	12
Figura 7 Robot Curiosity.....	13
Figura 8 Robot tipo "Micro-Mouse"	14
Figura 9 Locomoción Ackerman.....	16
Figura 10 NavLab 1 (OLLERO, 2001).....	16
Figura 11 Triciclo Clásico	17
Figura 12 Locomoción con Direccionamiento Diferencial en Dos Ruedas Laterales	18
Figura 13 Robot "Terregator"	18
Figura 14 Robot "Auriga" (OLLERO, 2001)	19
Figura 15 Robot con Locomoción mediante Patas (OLLERO, 2001)	20
Figura 16 Tipos de Ruedas	20
Figura 17 Matriz QFD del prototipo de robot móvil	29
Figura 18 Servomotor Torxis I00600.....	39
Figura 19 Configuración Ackerman (OLLERO, 2001).....	42
Figura 20 Ángulos de giro en el Modelo Ackerman.....	43
Figura 21 Modelo Bicicleta.....	43
Figura 22 Esquema de dinámica lateral de vehículos (Dinámica Lateral de Vehículos)	46
Figura 23 Ángulo de desplazamiento de la llanta frontal	48
Figura 24 Diagrama de fuerzas del sistema	51
Figura 25 Dirección Ackerman del Robot Móvil – Vista Superior	55
Figura 26 Dirección Ackerman del Robot Móvil – Vista Isométrica.....	55
Figura 27 Trapecio de la dirección Ackerman.....	56
Figura 28 Segmentación de la barra principal	57
Figura 29 Movimiento de los ejes de pivoteo.....	57
Figura 30 Torque que genera el servomotor	58
Figura 31 Especificaciones de los Servomotores Torxis.....	58
Figura 32 Distancia del servomotor a la barra principal	59
Figura 33 DCL para el análisis de Fuerzas en la barra principal	60
Figura 34 Propiedades Mecánicas de Varillas Redondas Lisas	61
Figura 35 Tabla de las dimensiones nominales de varillas redondas lisas	63
Figura 36 Modelo de la Plataforma (Chasis).....	64
Figura 37 Dimensiones del eje de tracción	65
Figura 38 Cargas sobre el eje	67
Figura 39 Diagrama de Momentos	68
Figura 40 Diagrama de Cortante.....	68
Figura 41 Propiedades mecánicas de aceros al carbono (NORTON, 2011)	71

Figura 42 Diámetros de ejes estándar	72
Figura 43 Especificaciones Cadena de Rodillos.....	75
Figura 44 Descripción gráfica de los parámetros de la cadena de rodillos.....	76
Figura 45 Conjunto Piñones – Cadena	77
Figura 46 Modelo de la Rueda del Robot Móvil	79
Figura 47 Análisis del Mecanismo de la Dirección	80
Figura 48 Simulación movimiento a la derecha.....	81
Figura 49 Simulación movimiento a la izquierda	81
Figura 50 Simulación de la Plataforma	82
Figura 51 Esquema de Bloques del Sistema.....	84
Figura 52 Diagrama de Lazo Cerrado del Sistema	86
Figura 53 Estructura del Controlador	96
Figura 54 Diagrama de Flujo de la Lógica de Control.....	97
Figura 55 Diagrama de flujo del funcionamiento de Interfaz Gráfica	99
Figura 56 Arduino Mega 2560.....	102
Figura 57 Sensor Ultrasónico HC-SR04	104
Figura 58 Funcionamiento Sensor Ultrasónico HC-SR04	104
Figura 59 Acelerómetro MMA7361L	106
Figura 60 Wheel Encoder DFRobot 3PA.....	107
Figura 61 Funcionamiento de un Encoder	107
Figura 62 Potenciómetro Rotatorio	108
Figura 63 Motor Driver Pololu	110
Figura 64 Conexión del Motor Driver con un Microcontrolador	111
Figura 65 Batería de LiPo	112
Figura 66 Conversor DC – DC	116
Figura 67 Placa de Relés.....	118
Figura 68 Módulos de RF Xbee	119
Figura 69 Software X-CTU	120
Figura 70 Módulo Xbee montado en el Arduino	120
Figura 71 Módulo Xbee (computador).....	121
Figura 72 Diseño de regulador de 5VDC	122
Figura 73 Diseño en 3D del Regulador de 5VDC.....	122
Figura 74 Diseño del Acondicionamiento del Acelerómetro MMA7361L	123
Figura 75 Diseño en 3D del Acondicionamiento del Acelerómetro.....	123
Figura 76 Software Matlab	128
Figura 77 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo circunferencia	130
Figura 78 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo parábola.....	131
Figura 79 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo Hélice	132
Figura 80 Diagrama de Flujo programa Arduino.....	133
Figura 81 Interfaz Gráfica de Pantalla principal.....	135
Figura 82 Interfaz Gráfica de Modo Manual.....	137
Figura 83 Interfaz Gráfica de Modo Automático	138
Figura 84 Soporte para el Motor DC.....	141

Figura 85 Soportes para el Servomotor	141
Figura 86 Soportes para las baterías.....	142
Figura 87 Ensamble Mecánico Final del Robot Móvil.....	142
Figura 88 Placa Electrónica perforada	145
Figura 89 Placa de Acondicionamiento soldada	145
Figura 90 Placa del regulador de 5V soldada.....	146
Figura 91 Diagrama de adaptación de componentes.....	146
Figura 92 Encoder y Disco acoplados al Motor DC.....	148
Figura 93 Potenciómetro acoplado al Servomotor.....	149
Figura 94 Conexión de Sensores Ultrasónicos en el prototipo.....	150
Figura 95 Conectores para Desmontaje de la Carcasa	150
Figura 96 Borneras para unión y puntos de prueba	151
Figura 97 Organización del cableado mediante canaletas	151
Figura 98 Organización del cableado mediante espiral 1	152
Figura 99 Organización del cableado mediante espiral 2	152
Figura 100 Prototipo Final.....	154
Figura 101 Interfaz Gráfica De Adquisición De Datos.....	156
Figura 102 Respuesta de la planta.....	160
Figura 103 Comandos para exportar de matrices.....	161
Figura 104 Matrices de datos exportadas a Workspace.....	161
Figura 105 Comando Ident en Matlab®	162
Figura 106 Ventada de la Herramienta de Identificación de Sistemas.....	162
Figura 107 Selección del tipo de datos a importar	163
Figura 108 Ingreso de datos para modelado	164
Figura 109 Selección de Time Plot para visualizar datos	164
Figura 110 Verificación de datos.....	165
Figura 111 Selección del tipo de Estimación.....	165
Figura 112 Selección de parámetros para la planta.....	166
Figura 113 Selección de característica para visualizar salida'	167
Figura 114 Salida del Modelo.....	167
Figura 115 Pasar la función de transferencia al Workspace.....	168
Figura 116 Función de Transferencia del Sistema	168
Figura 117 Comando para hallar la respuesta al escalón en lazo abierto	169
Figura 118 Respuesta en lazo abierto.....	169
Figura 119 Comando para hallar la respuesta al escalón en lazo cerrado	170
Figura 120 Respuesta al escalón en lazo cerrado	170
Figura 121 Comando para herramienta de controladores	171
Figura 122 Selección del icono de importación	172
Figura 123 Selección de la planta para importar	172
Figura 124 Selección del tipo de controlador	173
Figura 125 Verificación de máximo pico y tiempo de estabilización.....	174
Figura 126 Respuesta de la planta controlada.....	175
Figura 127 Interfaz gráfica para control manual.....	176

Figura 128 Verificación de constantes obtenidas en PIDtool	177
Figura 129 Función de Transferencia del Controlador	178
Figura 130 Seguimiento de set point	178
Figura 131 Seguimiento de setpoint con constantes afinadas	179
Figura 132 Botones para control de servo.....	181
Figura 133 Prototipo con dirección a la derecha	182
Figura 134 Geometría del prototipo con dirección a la derecha.....	182
Figura 135 Distancia entre ejes del prototipo	182
Figura 136 Prototipo con dirección a la izquierda	185
Figura 137 Geometría del prototipo con dirección a la izquierda	185
Figura 138 Seguimiento de Controlador.....	189
Figura 139 Cambio de Giro del Motor DC.....	189
Figura 140 Modo Automático, prototipo no llega al punto final (Parábola)	191
Figura 141 Modo Automático, prototipo no llega al punto final (Circunferencia)	191
Figura 142 Modo Automático, error por picos en lecturas de velocidad	192
Figura 143 Modo Automático, gráfica de error por picos en lecturas de velocidad	193
Figura 144 Valor Pendiente 1.....	195
Figura 145 Valor Pendiente 2.....	195
Figura 146 Trazado de Circunferencia en tiempo real.....	207
Figura 147 Trazado de Parábola en tiempo real.....	208
Figura 148 Trazado de Hélice en tiempo real	209
Figura 149 Detección de obstáculos en tiempo real.....	210

Índice de tablas

Tabla 1 Requerimientos del prototipo	25
Tabla 2 Requerimiento - Solución	26
Tabla 3 Sistemas del prototipo	31
Tabla 4 Subsistemas del prototipo.....	31
Tabla 5 Alternativas para el motor de tracción del robot.....	32
Tabla 6 Criterios de selección del motor	33
Tabla 7 Valoración para los criterios de selección	33
Tabla 8 Ponderación para la selección del motor.....	33
Tabla 9 Alternativas para el material de la estructura.....	35
Tabla 10 Criterios de selección del material de la estructura.....	36
Tabla 11 Ponderación para la selección del material de la estructura	36
Tabla 12 Alternativas para la selección del motor de dirección	37
Tabla 13 Criterio de selección para el motor de la dirección	38
Tabla 14 Ponderación para la selección del motor de la dirección	38
Tabla 15 Características del Motor DC.....	54
Tabla 16 Datos de los elementos.....	66
Tabla 17 Valores de Cortante y Momento en secciones críticas	69
Tabla 18 Alternativas para la transición de potencia.....	73
Tabla 19 Criterios de Selección para la Transmisión de Potencia.....	74
Tabla 20 Ponderación para la selección de la transición de potencia	74
Tabla 21 Datos iniciales para el cálculo de la longitud de la cadena	77
Tabla 22 Variables del Robot Móvil	85
Tabla 23 Alternativas para el sensor de distancia	87
Tabla 24 Criterio de selección para el sensor de distancia	88
Tabla 25 Valoración para los criterios de selección.....	88
Tabla 26 Ponderación para la selección del sensor de distancia	88
Tabla 27 Alternativas de selección del sensor para la percepción de inclinación	90
Tabla 28 Criterio de selección del sensor de inclinación	90
Tabla 29 Ponderación para la selección del sensor de Inclinación	91
Tabla 30 Alternativas para el sensor de velocidad	92
Tabla 31 Criterio para la selección del sensor de velocidad	92
Tabla 32 Ponderación para la selección del sensor para el análisis de odometría.....	93
Tabla 33 Alternativas para el sensor de posición angular	94
Tabla 34 Criterio para la selección del sensor de posición angular	94
Tabla 35 Ponderación para la selección del sensor de posición angular.....	95
Tabla 36 Características de la tarjeta electrónica de Adquisición de Datos	96
Tabla 37 Baterías de Alimentación del prototipo	98
Tabla 38 Características de la Interfaz gráfica de la Pantalla Principal.....	100
Tabla 39 Características de la Interfaz gráfica del Modo Manual.....	100
Tabla 40 Características de la Interfaz gráfica del Modo Automático	101
Tabla 41 Características sobre salientes Arduino Mega 2560	103

Tabla 42 Características de Motor Driver Pololu	110
Tabla 43 Consumo de energía para batería de control	113
Tabla 44 Características Conversor DC – DC.....	117
Tabla 45 Distribución de pines del Arduino.....	134
Tabla 46 Elementos de la Pantalla Principal de la Interfaz Gráfica.....	136
Tabla 47 Elementos del Modo Manual de la Interfaz Gráfica	137
Tabla 48 Elementos del Modo Automático de la Interfaz Gráfica.....	139
Tabla 49. Especificaciones Mecánicas del Prototipo	143
Tabla 50 Características ROMOV	153
Tabla 51 Modos de operación del cristal oscilador	157
Tabla 52 Selección del reloj del Prescaler.....	158
Tabla 53 Constantes del controlador estimado.....	175
Tabla 54 Constantes sintonizadas por afinamiento.....	178
Tabla 55 Dimensiones al girar a la derecha	183
Tabla 56 Dimensiones al girar a la izquierda	186
Tabla 57 Errores Ultrasónicos Prueba 1.....	194
Tabla 58 Errores Ultrasónico Prueba 2	194
Tabla 59 Errores superficie de 15°	196
Tabla 60 Errores superficie de 30°	196
Tabla 61 Errores para Velocidad	197
Tabla 62 Controlador Motor DC - 25%.....	199
Tabla 63 Controlador Motor DC - 32%.....	199
Tabla 64 Controlador Motor DC - 55%.....	200
Tabla 65 Controlador Motor DC - 80%.....	200
Tabla 66 Controlador Servomotor - Límite Derecha.....	201
Tabla 67 Controlador Servomotor - Límite Izquierda	202
Tabla 68 Pruebas en Circunferencia	203
Tabla 69 Pruebas en Parábola.....	203
Tabla 70 Pruebas en Hélice	204
Tabla 71 Detalle de gatos de Diseño e Ingeniería.....	211
Tabla 72 Descripción de Gastos de Elementos Mecánicos.....	212
Tabla 73 Descripción de Gastos de Elementos Electrónicos.....	213
Tabla 74 Costo total de los materiales.....	213
Tabla 75 Descripción de los Costos de Maquinaria y Equipos.....	214
Tabla 76 Descripción Mano de Obra.....	214
Tabla 77 Descripción de los Gastos Generales	215
Tabla 78 Descripción del Presupuesto Total.....	215
Tabla 79 Costo Plataforma Comercial.....	216
Tabla 80 Ingresos Económico Primer Periodo	217
Tabla 81 Tabla de Depreciación ROMOV.....	218
Tabla 82 Tabla de Depreciación Robot Pioneer.....	218
Tabla 83 Costo de Mantenimiento	219
Tabla 84 Beneficio General ROMOV	219

Tabla 85 Beneficio General PIONEER.....	220
Tabla 86 Cálculo del VAN prototipo ROMOV.....	221
Tabla 87 Cálculo de VAN plataforma PIONEER.....	221
Tabla 88 VAN, TIR, Beneficio Costo y Rentabilidad prototipo ROMOV	222
Tabla 89 VAN, TIR, Beneficio Costo y Rentabilidad plataforma PIONEER	223

Resumen

El presente proyecto muestra el diseño, construcción y validación del prototipo de robótica móvil denominado "ROMOV", el mismo que tiene como objetivo trazar trayectorias planificadas por computador a través de un HMI (Human Machine Interface) diseñado en el modo grafico de Matlab; dicho robot móvil consta de tracción posterior, dirección delantera mediante un mecanismo de Ackerman, una tarjeta electrónica Arduino Mega 2560 para la adquisición de datos y control de los actuadores de tracción y dirección del prototipo, también ostenta una velocidad variable (desde cero hasta 12 metros por minuto), detección de obstáculos mediante sensores ultrasónicos, percepción de inclinación del terreno hasta 30 grados mediante un acelerómetro y la capacidad para transportar una carga extra de 10 kilogramos. La comunicación del prototipo con el computador es inalámbrica mediante módulos de radio frecuencia Xbee para una distancia mínima de 10 metros. El prototipo presenta dos tipos de trabajo, un Modo Manual donde se controla al robot a través de botones de movimiento y dirección y un Modo Automático para realizar las trayectorias de circunferencia, parábola y hélice previamente programadas en el computador, mediante estimación odométrica, con una velocidad variable definida por el usuario. Estas trayectorias serán graficadas en tiempo real en la interfaz gráfica de Matlab para poder conocer la forma de la trayectoria que está recorriendo y la posición del robot móvil en cualquier instante de tiempo.

Palabras Claves

ROBOT MÓVIL, ODOMETRÍA, MECANISMO ACKERMAN, ARDUINO, MATLAB, INTERFAZ GRÁFICA.

Abstract

This work shows the design, construction and validation of a mobile robot prototype named "ROMOV", it aims to draw trajectories planned by computer via an HMI (Human Machine Interface) designed in Matlab (GUI Mode); this mobile robot has a rear-wheel drive, a front Ackerman steering, an Arduino Mega 2560 circuit board for data acquisition and control of drive and steering prototype actuators, it also boasts a variable speed (from zero to 12 meters per minute), obstacle detection through ultrasonic sensors, perception terrain slope up to 30 degrees by an accelerometer and the ability to carry an extra load of 10 kilograms . The communication between prototype and the computer is by wireless using Xbee RF modules for a minimum distance of 10 meters. The prototype has two working modes, a Manual Mode which controls the robot through movement and direction buttons and an Automatic mode for paths circle, parabola and propeller previously programmed into the computer, using odometry estimate, with a variable speed defined by the user. These trajectories will be plotted in real time in Matlab GUI in order to know the shape of the path the prototype is traveling and the position of the mobile robot at any given time.

Keywords

MOBILE ROBOT, ODOMETRY, ACKERMAN STEERING, ARDUINO, MATLAB, GRAPHIC INTERFACE.

Capítulo 1.- Introducción a la Robótica

El propósito de este capítulo es suministrar una visión general de la tesis, presentando los antecedentes generales del tema, la justificación que inspiraron el desarrollo del trabajo, así como también sus alcances, los objetivos asociados y la metodología empleada.

1.1. Antecedentes de la Robótica Móvil

Un robot es un artefacto mecánico capaz de actuar de forma autónoma a la hora de resolver un problema. La Robótica ha evolucionado hacia los sistemas móviles autónomos, que son aquellos que son capaces de desenvolverse por sí mismos en entornos desconocidos y parcialmente cambiantes sin necesidad de supervisión. (CABRERA, 2011)

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la Robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en uno de sus extremos.

Los antecedentes de los robots móviles se remontan a los años treinta con la creación de los llamados micro-mouse desarrollados para encontrar caminos en laberintos. En la década de los sesenta también surgieron vehículos mecánicos guiados por cables bajo el suelo con sensores ópticos

para seguir líneas trazadas en los suelos de las fábricas. Estos desarrollos aun no eran suficientes para la autonomía absoluta del robot. En los años ochenta con el incremento de la computación y el desarrollo de nuevos sensores, mecanismo y sistemas de control se aumentó la autonomía. (MONTAÑO, 2008).

Hoy en día, nos encontraremos con autómatas en todos los lugares en nuestro alrededor, ya que los robots empiezan a ser parte de la vida de las personas para hacerles la vida más fácil, cómoda e independiente, un ejemplo es el robot Aurora (Figura 1) desarrollado para la fumigación independiente en invernaderos de plantas mediante la programación de trayectorias definidas.



Figura 1 Robot Aurora

1.2. Justificación

Las aplicaciones que existen hasta ahora dentro de la robótica móvil se encuentran en crecimiento de una manera acelerada, por lo que resulta sencillo imaginar que este tipo de tecnología cada día sea más común; no solo en los diferentes tipos de industrias como metalmecánica, química, transporte o militar sino también en diferentes tareas específicas como el reconocimiento de terreno, inspección y vigilancia, misiones de búsqueda y rescate de personas.

Visto de este modo y dada la necesidad de equipar con diferentes dispositivos que abarquen el estudio y la investigación dentro del mundo de la robótica en el Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM (Departamento de Ciencias de la Energía y la Mecánica) de la Universidad de las Fuerzas Armadas – “ESPE” se incursiona dentro de la Robótica Móvil con la construcción del prototipo propuesto.

Dicho prototipo, sirve como herramienta para complementar el estudio del área de robótica, permitiendo la realización de prácticas acerca de la navegación o el trazado de trayectorias definidas que ejerce el prototipo; y de esta manera, con la gran cantidad de información que se presenta en este proyecto de tesis, se marca un punto de partida para poder realizar investigaciones futuras que involucren nuevas características dentro del área de robótica móvil.

1.3. Alcance del Proyecto

El proyecto del robot móvil abarca el diseño y construcción del mismo con locomoción mediante 4 ruedas utilizando la configuración Ackerman (*Requerimiento obligatorio del Consejo de Carrera y del Laboratorio de Robótica*), para transportar una carga de 10 kilogramos, el cual es capaz de recorrer trayectorias, previamente definidas en el computador, sobre superficies duras y libres de deslizamiento, ya sean estas planas o inclinadas hasta un ángulo de pendiente máximo de 30 grados.

Este prototipo de robot móvil está controlado por un computador portátil, mediante el cual comunica las instrucciones de movimiento al robot, también donde se encuentran las trayectorias programadas. El robot móvil presenta una tarjeta Arduino que recoge la información de todos los sensores presentes, procesa dicha información y la envía al computador en tiempo real; al igual que recepta las órdenes enviadas por el computador para el movimiento del robot. La comunicación entre el robot y el computador portátil es inalámbrica a través de módulos Wireless de radio frecuencia con un alcance de 10 metros como mínimo.

La acción de control desarrollada en Matlab es realizada mediante programación por puntos y con ello formar cada trayectoria que el robot realizará. La trayectoria real del robot es estimada mediante un encoder incremental que mide el desplazamiento longitudinal (odometría), mientras

que el movimiento angular de las llantas es calculada mediante un potenciómetro rotatorio.

La estructura móvil del vehículo está compuesto por elementos mecánicos como su chasis, mecanismo de dirección, eje de transmisión de velocidad para el movimiento del robot, ruedas; y cuenta con etapas electrónicas clasificadas por: alimentación de energía, adquisición de datos, acondicionamiento de señal, etapas de potencia, instrumentación y comunicación.

Se utiliza sensores ultrasónicos para detectar los obstáculos que obstruyan el camino y con ello provocar el paro del robot. Al igual que giroscopios para determinar la inclinación del terreno y con ello variar la potencia con que trabaja el motor de tracción.

El prototipo va a servir como herramienta de estudio en el campo de Robótica Móvil, por lo que será implementado en el Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM de la Universidad de las Fuerzas Armadas – “ESPE”.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

- Diseñar, construir y validar un prototipo de robot móvil para el recorrido de trayectorias definidas en un computador, las mismas que se comunican vía inalámbrica al robot para aplicaciones en el Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas – “ESPE”.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar matemáticamente y analizar el comportamiento cinemático y dinámico del robot móvil en configuración Ackerman.
- Estructurar el diseño mecánico para la transmisión de potencia, de los ejes, plataforma y soportes que conforman la estructura del robot móvil para una carga de 10 kilogramos.
- Seleccionar los sensores necesarios para realizar estimaciones por odometría, detección de obstáculos e inclinación de superficie de trabajo hasta 30 grados de pendiente.
- Elaborar el diseño de las etapas de alimentación de energía, adquisición de datos, acondicionamiento de señales, potencia y circuitos de control para los elementos electrónicos asociados al prototipo.

- Implementar un sistema de comunicación inalámbrica para un alcance máximo de 10 metros entre el computador y el robot móvil.
- Programar algoritmos de control para la velocidad y dirección del robot móvil, que le permitan seguir trayectorias determinadas (circunferencia, parábola, hélice) en un plano XY mediante estimación odométrica.
- Crear una interfaz gráfica para el monitoreo y control del prototipo de robot móvil.
- Validar el prototipo de robot móvil para el laboratorio de Robótica Industrial del DECEM.

1.5. Metodología de Trabajo

Se utiliza la metodología para el desarrollo de máquinas del tipo mecatrónico, es decir máquinas en donde los sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales convergen de forma significativa en el diseño del mismo (VARGAS, 2007). Esta metodología consta de los siguientes puntos:

- 1) Partir de los modelos cinemáticos y dinámicos asociados a los mecanismos que se desean crear.
- 2) Diseñar completamente el prototipo mecánico del proyecto.
- 3) Verificar por técnicas computacionales los resultados del diseño.

- 4) Construir el prototipo con los mecanismos que han sido probados en simulación.
- 5) Diseñar el sistema de control que se utilizará.
- 6) Integración de prototipo con los componentes electrónicos necesarios para inteligenciar el mismo.
- 7) Realizar las pruebas del funcionamiento del prototipo equipado con sus sensores y actuadores, mediante el monitoreo del mismo utilizando medios computacionales para generar pruebas en tiempo real (Figura 2).

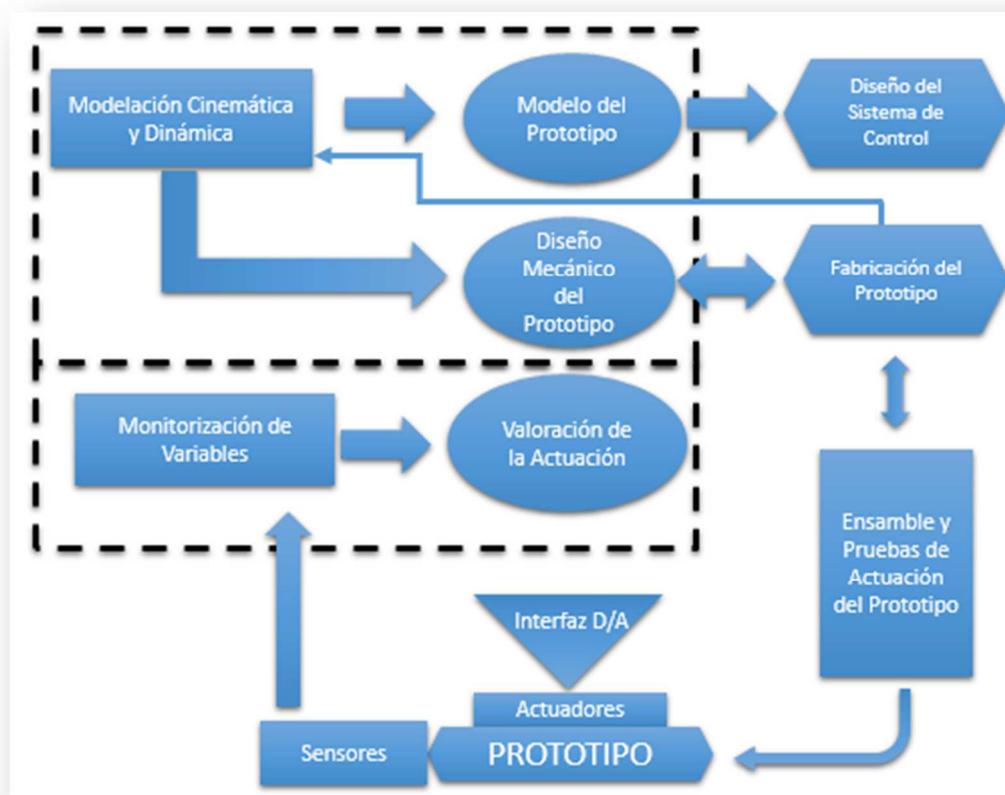


Figura 2 Esquema de la Metodología de Trabajo

Capítulo 2.- Marco Teórico

El propósito de este capítulo, es dar a conocer información teórica con el que se fundamenta el proyecto de tesis, es decir, definir y conceptualizar la temática con la cual se desarrollará el presente proyecto, al igual que determinar concretamente cuáles serán los límites y las estrategias para solventar cada una de las etapas del proyecto.

2.1 Robótica

Se define el término robot a un manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas (ISO).

La mayoría de robots que se construyen actualmente se encuentran en las fábricas, donde se utilizan para realizar algunas de las tareas más pesadas o repetitivas para los seres humanos, tales como soldar, ensamblar, transportar objetos, mover cargas pesadas y rociar pintura. Generalmente tienen uno o varios brazos y su estructura mecánica está orientada a ser más funcional que estética.

Un ejemplo de androide, es el robot experimental japonés Wabot-1 mostrado en la Figura 3, utilizado por más de una década en la

experimentación de movilidad y reacción ante objetos que lo rodean. (AMAYA, 2010).

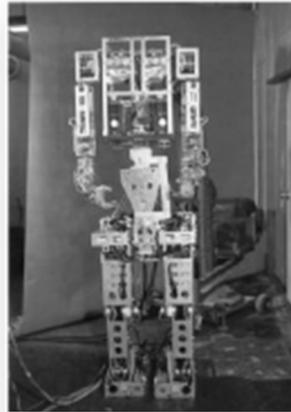


Figura 3 Robot Experimental Wobot-1 (AMAYA, 2010)

Actualmente existen máquinas a control remoto que pueden considerarse robots por su estructura y complejidad de los programas de control. Estos robots se utilizan para trabajar en lugares y situaciones peligrosas para los seres humanos.



Figura 4 Robot Móvil "Sojourner"

Se puede citar como ejemplo al “Sojourner” de la misión espacial “PathFinder”, que es un pequeño vehículo explorador enviado al planeta Marte para recoger muestras de la superficie. El robot cuenta con cámaras electrónicas para la transmisión de imágenes a la tierra a través de una antena de alto alcance que portaba la sonda que lo acompañaba (Figura 4).

El robot androide “Asimo”, desarrollado por Honda Motor Co. es pequeño, liviano, y es capaz de caminar de una manera parecida a un humano. Un área básica de investigación de esta empresa en el campo de la robótica, pretende desarrollar robots que caminen autónomamente y que puedan ser útiles a los seres humanos y de uso práctico para la sociedad (Figura 5).



Figura 5 Robot "Asimo"

2.2 Esquema General del Sistema de un Robot

El esquema básico de un robot (Figura 6) consta de un sistema mecánico, actuadores, sensores y el sistema de control como elementos básicos necesarios para cerrar la cadena actuación-medidas-actuación. En el sistema mecánico pueden distinguirse entre el órgano terminal, el brazo articulado, y un vehículo. (OLLERO, 2001)

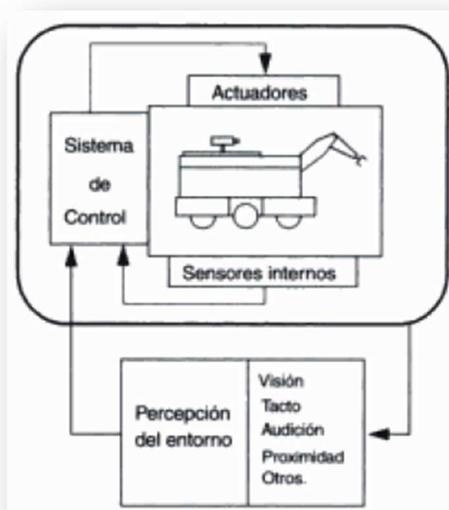


Figura 6 Robot y su Iteración en el Entorno (OLLERO, 2001)

Desde el punto de vista del procesamiento de la información, en robótica se involucran funciones de control de movimientos, percepción y planificación.

El sistema de control involucra tanto bucles de realimentación de la información suministrada por los sensores internos, como del entorno.

Los sensores internos, miden el estado de la estructura mecánica y en particular giros, o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares. Los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot. La información que suministra es utilizada por el sistema de percepción para aprender la realidad del entorno.

Los sistemas de percepción sensorial, hacen posible que un robot pueda adaptar automáticamente su comportamiento, en función de las variaciones que se producen en su entorno, generando automáticamente acciones en función de la comparación de dicha información sensorial con patrones de referencia, funciones presentes en el robot Curiosity (Figura 7).



Figura 7 Robot Curiosity

La “percepción” involucra no solo la captación de la información sensorial, sino también su tratamiento e interpretación. La planificación, tiene como objetivo encontrar una trayectoria desde una posición inicial a una posición objetivo, sin colisiones, y minimizando un determinado índice.

2.3 Robótica Móvil

Desde el punto de vista de la autonomía, los robots móviles tienen como precedentes los dispositivos electromecánicos, tales como los denominados "micro-mouse" (Figura 8), creados en los años treinta para desarrollar funciones inteligentes, como descubrir caminos en laberintos.

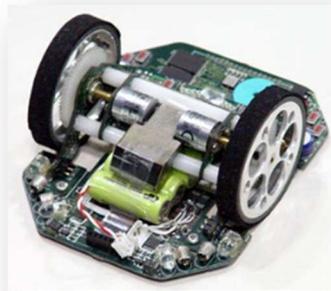


Figura 8 Robot tipo "Micro-Mouse"

La autonomía de un robot móvil se basa en el sistema de navegación automática, en estos sistemas se incluye tareas de planificación, percepción y control. En los robots móviles, el problema de la planificación puede descomponerse en planificación global de la misión, de la ruta, de la trayectoria y, finalmente, evitar obstáculos no esperados.

Existen numerosos métodos de planificación de caminos para robots móviles que se basan en hipótesis simplificadoras como: entorno conocido y estático, robots omnidireccionales, con movimiento lento y ejecución perfecta de la trayectoria.

Los primeros robots y algunos dedicados a tareas específicas, contienen procesos que nunca cambian ante el entorno, con lo cual sólo responden ante una misma situación, a diferencia de los robots autónomos, que realizan tareas bajo entornos dinámicos.

2.4 Configuraciones de los robots móviles

Los robots móviles emplean diferentes tipos de locomoción mediante ruedas que les confieren características y propiedades diferentes respecto a la eficiencia energética, dimensiones, cargas útiles y maniobrabilidad. La mayor maniobrabilidad se consigue en vehículos omnidireccionales, que es capaz en el plano de trasladarse simultánea e independientemente en cada eje del sistema de coordenadas y rotar según el eje perpendicular.

2.4.1 Sistemas de Locomoción más comunes

2.4.1.1 Ackerman

El sistema Ackerman es utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales. En este sistema de locomoción la rueda delantera interior gira un ángulo ligeramente superior a la rueda exterior (θ_1 y θ_2) para eliminar el desplazamiento (Figura 9).

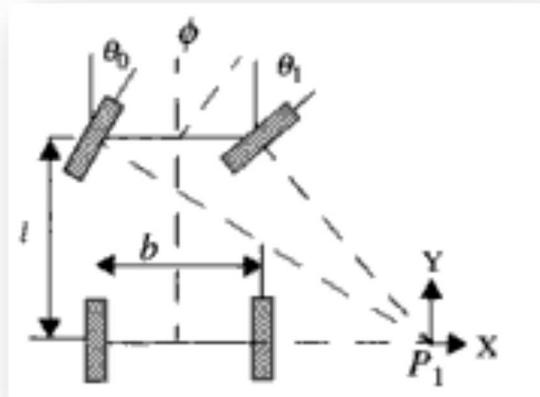


Figura 9 Locomoción Ackerman



Figura 10 NavLab 1 (OLLERO, 2001)

Un ejemplo con este tipo de sistema de locomoción es el NavLab 1 y el 2 (Figura 10), un vehículo autónomo para experimentos de navegación en exteriores (OLLERO, 2001). También podemos citar al prototipo NavLab 5 que procesa la información bajo el principio de Redes Neuronales manejando automáticamente gran porcentaje de su recorrido. Pero el mayor problema de la locomoción Ackerman es la limitación en la maniobrabilidad.

2.4.1.2 Triciclo Clásico

En este sistema de locomoción la rueda delantera sirve tanto para la tracción como para el direccionamiento. El eje trasero con dos ruedas laterales, es pasivo y sus ruedas se mueven libremente (Figura 11). La maniobrabilidad es mayor que el de la configuración Ackerman.

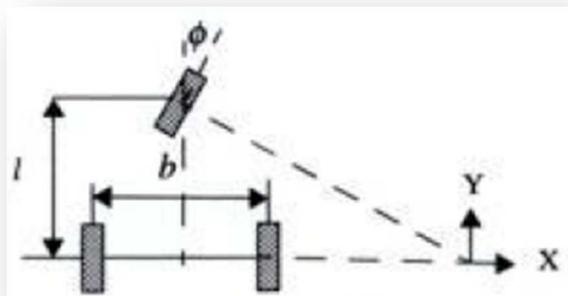


Figura 11 Triciclo Clásico

Se puede encontrar este sistema de dirección en el vehículo robótico Romeo 3R, desarrollados en los laboratorios de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. (Ollero, 2001)

2.4.1.3 Dirección Diferencial

El direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales. La tracción se consigue también con estas mismas ruedas. Adicionalmente existen una o más ruedas para soporte (Figura 12).

Esta configuración es la más frecuente en robot para interiores. (OLLERO, 2001)

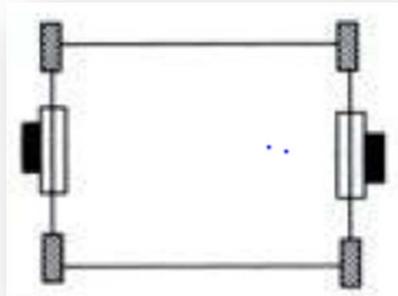


Figura 12 Locomoción con Direccionamiento Diferencial en Dos Ruedas Laterales

2.4.1.4 Skid Steer

Se disponen varias ruedas en cada lado del vehículo que actúan de forma simultánea. El movimiento es el resultado de combinar las velocidades de las ruedas de la izquierda con las de la derecha como se puede observar en la Figura 13, el robot "Terregator". (OLLERO, 2001)



Figura 13 Robot "Terregator"

2.4.1.5 Pista de Deslizamiento

Son vehículos tipo oruga en los que tanto la impulsión como el direccionamiento se consiguen mediante pistas de deslizamiento. Pueden considerarse funcionalmente análogas al skid steer. La locomoción mediante pista de deslizamiento es útil en navegación “campo a través” o en terrenos irregulares, en los cuales presenta un buen rendimiento (Figura 14). (OLLERO, 2001)



Figura 14 Robot "Auriga" (OLLERO, 2001)

2.4.1.6 Locomoción mediante Patas

Permiten aislar el cuerpo del terreno empleando únicamente puntos discretos de soporte. Tiene mejores propiedades que las ruedas para atravesar terrenos difíciles lleno de obstáculos. También es posible conseguir la omnidireccionalidad y el deslizamiento en la locomoción es mucho menor (Figura 15). (OLLERO, 2001)

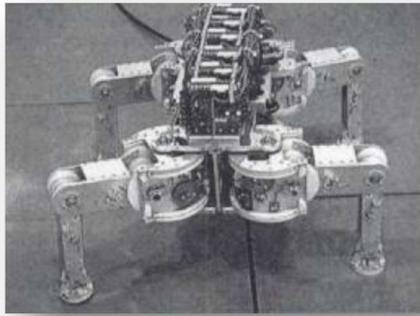


Figura 15 Robot con Locomoción mediante Patas (OLLERO, 2001)

2.4.2 Tipo de ruedas

Existen algunas alternativas para el tipo de ruedas que se pueden utilizar en el robot móvil (Figura 16), las cuales pueden ser:

- Convencionales
- Tipo castor
- De bola
- Omnidireccionales



Figura 16 Tipos de Ruedas

2.5 Sensores y Actuadores en robots móviles

Dentro de los robots móviles, la técnica más simple consiste en la utilización de la odometría a partir de medidas suministradas por los sensores situados en los ejes de movimiento, típicamente codificadores ópticos.

Se emplean también sistemas de navegación inercial incluyendo giroscopios y acelerómetros, aunque estos sistemas acumulan errores especialmente en la determinación de la posición.

Para la detección de obstáculos, se emplean sensores de posición, ya sean estos ultrasónicos, ópticos, infrarrojos, e incluso cámaras de video.

Para el movimiento y dirección de los vehículos lo más común es la utilización de motores, como servomotores, motores a paso o motores de corriente continua.

2.6 Control de los robots móviles

En cualquier caso, el problema del control automático preciso de un vehículo con ruedas puede resultar más complejo que el de los

manipuladores debido a la presencia de restricciones holónomas. Los bucles de control se plantean tanto en el espacio de las variables articulares como en coordenadas del mundo, y las ecuaciones de movimiento son complejas, si se considera la interacción con el terreno.

Nótese también que el control del vehículo requiere disponer de medidas de su posición y orientación a intervalos suficientemente cortos.

(OLLERO, 2001)

Capítulo 3.- Diseño del Prototipo

En este capítulo se describen los pasos a seguir para realizar un correcto diseño mecánico, electrónico y de control del prototipo, haciendo uso de herramienta de diseño concurrente para conocer los sistemas y subsistemas que componen el prototipo, y en función de los mismos diseñarlos en conjunto de la manera más apropiada; tomando en cuenta los requerimientos y soluciones del prototipo en cada una de sus etapas.

3.1 Definición de los parámetros y características técnicas y generales del prototipo

Dado que se conoce parámetros iniciales para el diseño del prototipo del robot móvil, tales como el sistema de dirección Ackerman, tracción posterior y locomoción mediante cuatro ruedas, se establece los requerimientos y parámetros adicionales que debe tener el robot para el cumplimiento de los objetivos. Para ello, mediante un diseño concurrente del prototipo (Diseño Mecatrónico) se obtiene el esquema general del mismo.

3.1.1 Diseño Concurrente del Prototipo

A partir de un enfoque completamente organizativo, tanto para el desarrollo del prototipo como para la manufactura del mismo, se establecen las condiciones de funcionalidad, estructura y fabricación.

La etapa de planificación dentro del diseño mecatrónico requiere la descripción y análisis del problema de diseño, en este caso el prototipo de robot móvil.

El prototipo debe estar dotado de un sistema mecánico capaz de permitir la locomoción del mismo a una velocidad determinada que puede ser monitoreada, así como también un sistema de dirección Ackerman (*Condición de diseño solicitada por el Consejo de Carrera y requerimiento del Laboratorio de Robótica Industrial*). Además, su estructura debe ser capaz de soportar 10 kg de peso extra a su peso propio.

Dentro del sistema electrónico, el prototipo es capaz de percibir condiciones del entorno, así como medir variables internas, transmitir y recibir datos de manera inalámbrica, controlar los actuadores afines con ayuda del procesamiento de los datos través de un computador portátil el cual interactúa en tiempo real con el prototipo.

Los principales requerimientos del prototipo se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1 Requerimientos del prototipo

Requerimiento	Definición
Modular	Los elementos que conforman el prototipo son desmontables
Robustez Mecánica	Su construcción garantiza durabilidad y resistencia frente al uso
Personalizable	Es compatible con diversos elementos existentes en el mercado y es posible integrarlos
Capacidad de carga	Funcionamiento del prototipo en condiciones normales y con una carga máxima de 10 kg.
Dirección Ackerman	Configuración de dirección utilizada en los automóviles
Tracción Posterior	Eje trasero encargado de transmitir el movimiento
Percepción de entorno	El prototipo puede enviar información acerca de su entorno, obstáculos presentes o si el terreno posee una inclinación hasta de 30°.
Medición de variables internas	Posee instrumentación asociada para conocer el estado de los mecanismos del prototipo (dirección y tracción).
Comunicación inalámbrica	Transmisión y recepción de información entre el prototipo y el computador portátil sin cables, hasta una distancia máxima de 10 metros.
Autonomía	El prototipo puede funcionar durante 1 hora hasta una nueva recarga
Velocidad Variable	El usuario puede manipular la velocidad del prototipo desde 0 [m/min] hasta 12 [m/min]
Trazado de trayectorias	El prototipo puede trazar tres tipos de trayectorias definidas: circunferencia, parábola y hélice
Interfaz amigable	Permite al usuario manejar el prototipo de forma intuitiva sin dificultades.

A partir de los requerimientos, se puede definir la solución o soluciones que corresponde a cada de los requerimientos (Tabla 2).

Tabla 2 Requerimiento - Solución

Requerimiento	Solución
Modular	Dispositivos Desmontables
Confiable	Uso de materiales livianos y resistentes
Personalizable	Uso de Microcontrolador
Capacidad de soportar peso extra	Estructura resistente y carcasa desmontable
Dirección Ackerman	Diseño de Mecanismo de 4 barras
Tracción Posterior	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión de Potencia de actuador a eje • Uso de Motorreductor
Percepción de entorno	Uso de sensores externos
Medición de variables internas	Uso de sensores internos
Comunicación inalámbrica	<ul style="list-style-type: none"> • Protocolos de comunicación serial
Autonomía	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de las baterías • Uso de Baterías recargables
Velocidad Variable	Controlador implementado en software
Trazado de trayectorias	Algoritmos de control para trayectorias
Interfaz amigable	Implementación de GUI en Matlab

En función de los requerimientos del prototipo y las soluciones que se pueden brindar, es posible realizar un cuadro QFD (Quality Function Deployment), con el cual se verifican el grado de relación que existen entre los requerimientos y las soluciones; y de esta manera conocer cuáles son

las características de ingeniería más sobresalientes con las cuales contará el prototipo (Figura 17).

La tabulación requiere que se cuantifique el grado de relación entre todos los requerimientos y las soluciones, para esto, dependiendo del nivel de relación se da un valor de cero cuando no hay relación y un valor de nueve cuando la relación es directa. Los valores entre 0 y 9, se dan cuando la relación es intermedia.

Es importante, hablar de cómo se debe dar la ponderación adecuada. Primeramente, las soluciones presentadas a cada requerimiento, tiene una relación directa, por lo que el grado de relación alcanza el valor más alto, 9.

Por ejemplo las relaciones entre la autonomía del prototipo con la capacidad de las baterías, o la relación entre el uso de sensores externos e internos para medir variables del entorno así como magnitudes propias del prototipo.

De la misma manera, existen requerimientos que no tienen relación alguna con las soluciones que se han generado, como es el caso del requerimiento de que el prototipo sea Modular con respecto a los algoritmos

de control para trayectorias, o que la comunicación inalámbrica tenga relación con el diseño del mecanismo de 4 barras para la dirección. En esos casos, los casillos tienen una ponderación de 0, y es suficiente con dejar vacío ese espacio.

Sin embargo, al tener todos los requerimientos y las soluciones de ingeniería pertinentes, existe la posibilidad de que alguno de los requerimientos pueda ser solventado por 2, 3 o más soluciones, pero de forma parcial. Tal es el caso por ejemplo de la confiabilidad, que tiene como solución principal el uso de materiales livianos y resistentes, y su ponderación es de 9. Pero la confiabilidad también se ve solventada por el diseño de una estructura resistente, el diseño del mecanismo de 4 barras o la transmisión de potencia del actuador al eje de tracción, estas soluciones tienen incidencia parcial con el requerimiento, por lo que una ponderación de 7 es suficiente para cuantificar la relación.

Finalmente, también existen requerimientos que son solventados parcialmente, por lo que la relación decae un poco con respecto a la ponderación de 7, como por ejemplo que para la medición de variables internas se deba usar dispositivos desmontables, un microcontrolador, o el tipo de actuadores. La relación existe, pero la incidencia disminuye, por lo que una ponderación de 5 es más que suficiente.

ANÁLISIS QFD		REQUERIMIENTOS DE INGENIERIA													1	2	3	4	5	6	7			
DESEMPEÑO FUNCIONAL	ROBOT MOVIL DE TRAYECTORIAS PLANIFICADAS (ROMOV V1.0)	Dispositivos Desmontables	Uso de materiales livianos y resistentes	Uso de Microcontrolador	Estructura resistente y carcasa desmontable	Diseño de Mecanismo de 4 barras	Transmisión de Potencia de actuador a eje	Uso de Sensores externos e internos	Protocolos de comunicación serial	Motorreductor para tracción	Precisión de actuador asociado a la dirección	Controlador implementado en software	Algoritmos de control para trayectorias	Implementación de GUI en Matlab	Capacidad de las baterías	Baterías recargables	Importancia para el usuario (1 a 5)	ROMOV (1 a 5)	objetivo (1 a 5) mucho = es importante	ratio de mejora = (3)/(2)	argumento de uso (1, 1'2, 1'5)	ponderación absoluta = (1)^(4)*β	pond relativa (%)	orden de importancia
	Modular	5			7	5											4	2	4	2	1	32	7,84314	2
	Confiable		5		7	7	7										5	2	4	2	1,5	40	9,80392	1
	Personalizable			5				7		5	5				7	5	4	2	4	2	1	32	7,84314	2
	Capacidad de soportar peso extra		7														4	2	4	2	1,2	32	7,84314	2
	Dirección Ackerman	5	5			5					5	7			7	7	3	2	4	2	1,5	16	3,92157	3
	Tracción Trasera	5	5				5			5		7			7	7	2	2	4	2	1,5	16	3,92157	3
	Percepción de entorno			5				5						5	7	7	4	2	4	2	1,5	32	7,84314	2
	Medición de variables internas	5		5					5	5					7	7	4	2	4	2	1,5	32	7,84314	2
	Comunicación inalámbrica				7										7	7	5	2	4	2	1,5	40	9,80392	1
	Autonomía				7			7	7	7	7				5	5	5	2	4	2	1,2	40	9,80392	1
	Velocidad Variable				7			7	7	7			5		7	7	4	2	4	2	1,2	32	7,84314	2
	Trazado de trayectorias				7			7	7	7	7		5		7	7	4	2	4	2	1,2	32	7,84314	2
	Interfaz amigable				7			7	7	7	7	7	7	5	7	7	4	2	4	2	1,2	32	7,84314	2
	x																4	2	4	2	1,2	408		
Orientación deseada	188,2	162,7	451	194,1	143,1	213,7	303,9	321,6	402	292,2	235,3	125,5	164,7	525,5	127,5	3850,9804								
Ponderación abs	4,888	4,226	11,71	5,041	3,717	5,55	7,892	8,35	10,44	7,587	6,11	3,259	4,277	13,65	3,31									
Orden de importancia	10	12	2	9	13	8	5	4	3	6	7	15	11	1	14									

Figura 17 Matriz QFD del prototipo de robot móvil

Como análisis del QFD, se tiene que:

- Los principales aspectos que requieren los usuarios son: Confiabilidad en el prototipo, la autonomía de las baterías y la estabilidad en la comunicación inalámbrica; sin embargo es necesario que no se descuide los requerimientos de Capacidad de carga, medición de variables externas e internas, y los aspectos relacionados al control de velocidad, trazado de trayectorias y la Interfaz de usuario.
- Los principales aspectos de ingeniería que requiere el prototipo son: capacidad de la batería, uso de un microcontrolador, motoreductor para la tracción, protocolos de comunicación serial, instrumentación para sensado de variables externas e internas, y la precisión del actuador de la dirección; para de esta manera poder generar correctamente la programación de los algoritmos de control de velocidad y para el trazado de trayectorias.

A partir de la información que entrega el QFD, se evidencia que el prototipo tiene tres sistemas independientes, los cuales se encuentran divididos para poder analizarlos por partes (Tabla 3).

Tabla 3 Sistemas del prototipo

SISTEMA	CONDICIONES DEL SISTEMA
Sistema Mecánico	Capacidad de Carga Tracción Posterior Dirección Ackerman
Sistema Electrónico	Uso de actuadores electrónicos Percepción de entorno Sensores internos Comunicación inalámbrica
Sistema De Control	Robusto Rápida respuesta Interfaz con usuario amigable

En función de los sistemas y sus respectivas condiciones se puede reconocer los distintos sub-sistemas de los que deberá contar cada uno de los sistemas que posee el prototipo (Tabla 4).

Tabla 4 Subsistemas del prototipo

SISTEMA	SUBSISTEMA
Mecánico	Motriz (Tracción) Estructural Dirección
Electrónico	Alimentación Control y Potencia Comunicación
Control	Control de Velocidad Control de Dirección Trazado de Trayectorias

3.1.2 Sistema Mecánico

3.1.2.1 Subsistema Motriz

El sistema de tracción del robot móvil está diseñado para una velocidad lineal máxima de 12 metros por minuto, al mismo tiempo se debe tener en cuenta las consideraciones con que se va a trabajar, como la alimentación de energía, fuerza necesaria para desplazar el robot con carga máxima, entre otros.

Mediante cuadros de selección de motores, y a través de una ponderación se determinará el motor óptimo para el sistema motriz del robot, en la Tabla 5 se presenta las alternativas para la selección del motor de tracción del robot.

Tabla 5 Alternativas para el motor de tracción del robot

Alternativas	
Código	Tipo
A	Motoreductor DC
B	Motor a Pasos
C	Motor AC

Para estas tres alternativas se establece los criterios más óptimos del motor, cada uno de ellos con su respectiva ponderación (Tabla 6).

Tabla 6 Criterios de selección del motor

Código	Criterio	Ponderación
I	Facilidad de mantenimiento	15%
II	Potencia	15%
III	Facilidad de montaje	15%
IV	Alimentación Simple	30%
V	Bajo Costo	10%
VI	Disponibilidad	15%
TOTAL		100%

Una vez establecidos los criterios de selección, se realiza una asignación de valores (Tabla 7) dependiendo las ventajas y desventajas de cada alternativa de material con su respectiva ponderación (Tabla 8).

Tabla 7 Valoración para los criterios de selección

Valoración Cualitativa	Valoración Cuantitativa
No cumple	1
Cumple Parcialmente	3
Si cumple	5

Tabla 8 Ponderación para la selección del motor

Ponderación para la Selección del Motor de Tracción										
		I	II	III	IV	V	VI	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativa	A	5	3	5	5	5	5	28	4,7	OK
	B	3	3	3	1	3	5	18	2,5	X
	C	5	5	5	1	3	1	20	3,0	X

La mejor opción para el sistema motriz del robot móvil es la alternativa A, que corresponde al uso de un Motor DC con reducción como actuador para la tracción del mismo.

3.1.2.2 Subsistema Estructural

Para el diseño de la estructura del vehículo se han evaluado los siguientes criterios:

- Una plataforma móvil básica, con una tracción posterior que le brinda estabilidad en su desplazamiento, con una disposición de cuatro ruedas para su movimiento.
- Un chasis que contenga un sistema de dirección tipo Ackerman en las ruedas delanteras.
- Una estructura tanto interior como exterior que soporte una carga específica, y compuesta por un revestimiento tanto superior como lateral, el mismo que es desarmable y esta acoplada al chasis.

- **Selección del Material**

El material del chasis del robot y de los componentes de cada sistema como la carcasa y los soportes de las placas electrónicas van a variar dependiendo de las propiedades que se requieren; es decir, se debe diseñar robots mecánicamente con la mejor relación posible entre tamaño- peso-prestaciones. Este robot móvil está formado por varios elementos rígidos y pesados como el servomotor, el motor DC y las baterías para los cuales se debe seleccionar un material que facilite el acople de estos para que tenga estabilidad en los movimientos.

Se presenta las alternativas más idóneas para la selección del material de la estructura del robot móvil (Tabla 9).

Tabla 9 Alternativas para el material de la estructura

Alternativas	
Código	Tipo de Material
A	Hierro
B	Aluminio
C	Fibra
D	Acrílico

Con las alternativas se establece los criterios más óptimos que la estructura del robot móvil debe tener (Tabla 10).

Tabla 10 Criterios de selección del material de la estructura

Código	Criterio	Ponderación
I	Bajo Peso	20%
II	Resistencia Mecánica	30%
III	Maquinabilidad	30%
IV	Bajo Costo	10%
V	Disponibilidad	10%
TOTAL		100%

Una vez establecidos los criterios de selección, se realiza una asignación de valores dependiendo las ventajas y desventajas de cada alternativa del material con su respectiva ponderación (Tabla 11).

Tabla 11 Ponderación para la selección del material de la estructura

Ponderación para la Selección del Material									
		I	II	III	IV	V	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativa	A	1	5	5	5	5	21	4,2	OK
	B	5	5	3	1	5	19	4	X
	C	5	1	5	1	5	17	3,4	X
	D	5	1	1	3	5	15	2,4	X

La mejor opción para el material de la estructura del robot móvil es la alternativa A, que corresponde al hierro como material para la construcción del mismo.

3.1.2.3 Subsistema de Dirección

La dirección del robot móvil está condicionada por ser de tipo Ackerman, para lo cual se debe tener en cuenta las consideraciones con que se va a trabajar, como la precisión en su movimiento, la fuerza necesaria para girar las llantas del robot, entre otros para la selección del motor de dirección.

Mediante cuadros de selección de motores, y a través de una ponderación se determinará el motor idóneo para la dirección, en la Tabla 12 se presenta las alternativas para dicho motor de la dirección del robot.

Tabla 12 Alternativas para la selección del motor de dirección

Alternativas	
Código	Actuador
A	Motor DC
B	Servomotor
C	Motor a Pasos

Se establece los criterios para este actuador, cada uno de ellos con su respectiva ponderación (Tabla 13).

Realizando una asignación de valores a cada criterio para la selección del motor se tiene la Tabla 14.

Tabla 13 Criterio de selección para el motor de la dirección

Código	Criterio	Ponderación
I	Cumple especificaciones eléctricas del sistema	10%
II	Facilidad para controlar	30%
III	Facilidad de montaje	25%
IV	Compatibilidad con Arduino	10%
V	Bajo Costo	15%
VI	Disponibilidad	10%
TOTAL		100%

Tabla 14 Ponderación para la selección del motor de la dirección

Ponderación para la Selección del Motor de la Dirección										
		I	II	III	IV	V	VI	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativa	A	5	1	1	5	3	3	18	2,3	X
	B	5	5	5	5	1	1	22	4,0	OK
	C	5	1	5	5	3	3	22	3,3	X

Como resultado se obtiene que la opción más óptima es un servomotor, ya que este actuador presenta ventajas favorables en lo que respecta al torque y el control.

Debido al alto torque que deberá tener el servomotor para poder mover las llantas del robot a través del mecanismo de dirección, se ha considerado seleccionar un servomotor industrial de la marca Invenscience® modelo Torxis i00600 (Figura 18), el mismo que cuenta con un torque máximo de 22,6 [N].



Figura 18 Servomotor Torxis I00600

3.1.3 Sistema Electrónico

El sistema electrónico que posee el prototipo, consta de diferentes elementos que le permite al mismo tener la habilidad de percibir su entorno y estimar su ubicación a partir de técnicas de odometría (sensores), también presenta dispositivos que le dan al robot móvil la capacidad de moverse (actuadores). Estos elementos deberán enlazarse mediante diferentes etapas hasta llegar al punto del procesamiento de las señales que generen, y a partir de las mismas poder controlar el prototipo. El

sistema electrónico consta de las siguientes etapas: alimentación, comunicación e instrumentación mecatrónica (sensores y actuadores).

3.1.4 Sistema de Control

Los algoritmos de control para el prototipo se desarrollan en un computador mediante el software de ingeniería Matlab, siendo este un tipo de control distribuido. Al contar con varios sensores se utilizará algoritmos de multiplexión para las señales de los mismos.

Dado que el robot móvil cuenta con un motoreductor DC y un servomotor, los cuales permitirán el movimiento y dirección del vehículo respectivamente, se implementa algoritmos de control para cada uno de ellos, en el caso del motor DC se programa un controlador de velocidad.

A partir de ello y mediante la información recibida de los sensores para la percepción del entorno, se programa un algoritmo de control que permita realizar el trazado de trayectorias planeadas en un plano XY relativo.

Finalmente se diseña una interfaz de usuario para el monitoreo y control del robot en el computador, donde se puede seleccionar el tipo de

trayectoria que el prototipo realice y donde se presenta las variables en tiempo real del robot tales como velocidad, revoluciones por segundo, ángulo de inclinación y posición del mismo en el eje X e Y.

3.2 Modelado del Prototipo

El robot móvil está constituido por: elementos electrónicos para su locomoción, un sistema de cuatro llantas con tracción posterior y un sistema de dirección tipo Ackerman en la parte frontal.

Para los modelados que se generan, se considera que las ruedas son completamente indeformables, por lo que será posible aproximar a un sistema sin deslizamiento (de rotación pura).

3.2.1 Modelado cinemático

Consideraciones iniciales para el modelado cinemático:

- Se presenta un robot móvil con ruedas.
- Las ruedas tienen un movimiento de rodadura pura, se desprecia el deslizamiento en el periodo de control.

- El prototipo no tiene partes flexibles y se comporta como un sólido rígido en el que las únicas partes móviles serán las ruedas con una dirección de tipo Ackerman (Figura 19).
- Se presenta un prototipo de dos grados de libertad.
- Para evitar el derrape, la rueda interior posee un ángulo θ_i ligeramente mayor al ángulo que posee la rueda exterior θ_o cuando el sistema se encuentra girando (Figura 19).

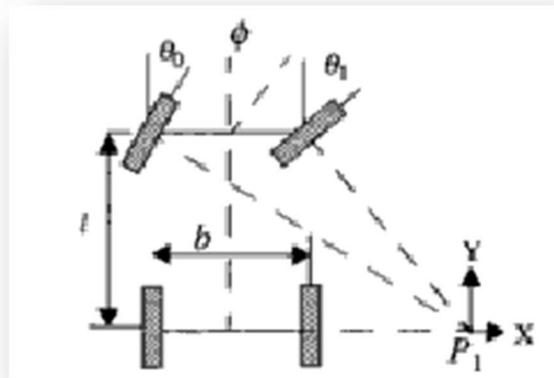


Figura 19 Configuración Ackerman (OLLERO, 2001)

Para el modelado cinemático del prototipo se parte de las consideraciones de un sistema Ackerman de un automóvil (Figura 20).

En donde:

r : Distancia entre el CCI y el eje odométrico.

l_w : Longitud de los ejes

L : Longitud entre ejes

P : Centro de Curvatura Instantáneo (CCI)

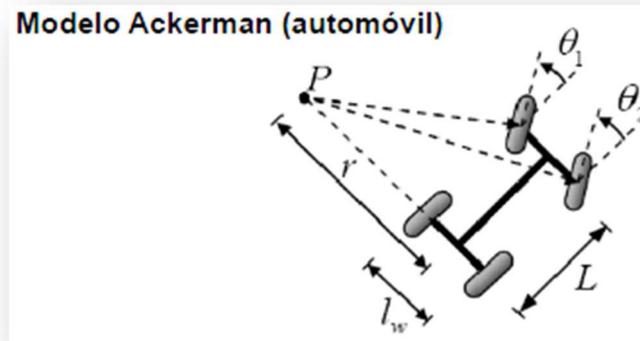


Figura 20 Ángulos de giro en el Modelo Ackerman

Relaciones geométricas:

- Para ángulo interno

$$\tan(\theta_1) = \frac{L}{r - \frac{lw}{2}} \quad (\text{Ec. 1})$$

- Para ángulo exterior

$$\tan(\theta_2) = \frac{L}{r + \frac{lw}{2}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para el modelo aproximado del centro del eje trasero (Figura 21):

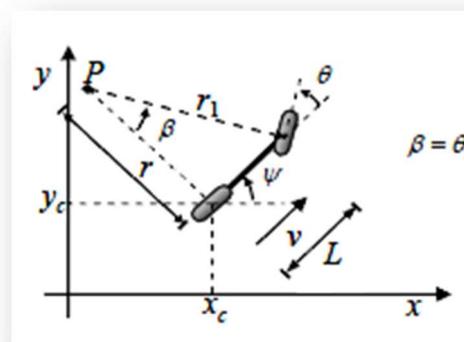


Figura 21 Modelo Bicicleta

Esta aproximación permite ubicar el punto (X_c, Y_c) , necesario para su modelamiento y se puede apreciar con facilidad el ángulo Ψ (ángulo de orientación del robot con respecto al eje X).

La cinemática simplificada del robot está dado por las siguientes ecuaciones:

$$(Ec. 3) \quad \dot{x}_c = v * \cos(\psi) \quad -\pi < \psi < \pi$$

$$(Ec. 4) \quad \dot{y}_c = v * \sin(\psi) \quad |v| \leq v_m$$

$$(Ec. 5) \quad \dot{\psi} = \frac{v}{L} \tan(\theta) \quad -\theta_m \leq \theta \leq \theta_m, \theta_m = \frac{\pi}{4}$$

Se tiene que los estados del modelo cinemático son:

$$[x_c \quad y_c \quad \psi]^T$$

Y las variables de entrada son: $[v \quad \theta]^T$

Pero conociendo que:

$$\tan(\theta) = \frac{L}{r}$$

Reemplazando en la ecuación (5) se obtendría que:

$$(Ec. 6) \quad \dot{\psi} = \frac{v}{r}$$

A partir de las ecuaciones (3) y (4) se puede obtener la restricción de independencia de la velocidad:

$$v = v$$

$$\frac{\dot{x}_c}{\cos(\psi)} = \frac{\dot{y}_c}{\sin(\psi)}$$

$$(Ec. 7) \quad \dot{x}_c * \sin(\psi) - \dot{y}_c * \cos(\psi) = 0$$

Lo que se conoce como restricción no Holonómica (Ecuación 7).

Las ecuaciones de estado que representan el sistema en forma matricial serán:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 1/r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \theta \end{bmatrix}$$

Y su jacobiano:

$$J = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 1/r & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.2 Modelado dinámico del prototipo

De igual manera que con el modelamiento cinemático, existen ciertas consideraciones iniciales para el análisis del mismo, tales como:

- El centro de masa del robot se encuentra a nivel del suelo.
- Toda la aerodinámica del robot se concentra en un mismo punto.
- La suspensión del robot posee un movimiento despreciable.
- El peso del robot, está distribuido sobre toda la estructura del mismo, es decir el chasis.
- Al igual que en el modelo cinemático, se puede aproximar la configuración Ackerman como la configuración bicicleta
- La rotación alrededor del eje X e Y puede ser despreciado.

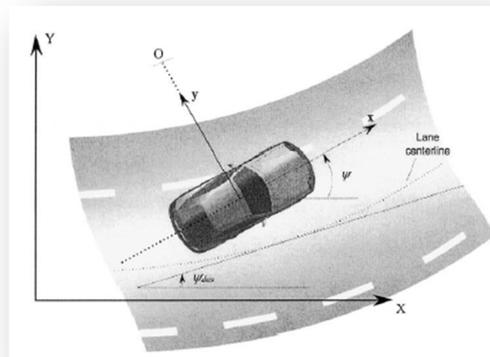


Figura 22 Esquema de dinámica lateral de vehículos (Dinámica Lateral de Vehículos)

Se considera, que el robot puede estar sujeto a la dinámica lateral de vehículos (Figura 22) y analizando como una configuración reducida a bicicleta se tiene que:

$$\sum F_y = m * a_y$$

Se conoce que la aceleración del eje puede estar compuesta por la aceleración lineal como por la aceleración centrípeta, así:

$$a_y = \ddot{y} + v_x * \dot{\psi}$$

En donde v_x es la velocidad del robot en el eje x y $\dot{\psi}$ es la velocidad angular que alcanza el robot.

Se debe considerar la fuerza en el eje de las ordenadas de cada una de las ruedas del modelo simplificado, es decir una fuerza sobre el eje y en la rueda delantera y en la rueda posterior:

$$(Ec. 8) \quad m(\ddot{y} + v_x * \dot{\psi}) = F_{yd} + F_{yt}$$

En donde F_{yd} es la fuerza en el eje y sobre la llanta delantera y F_{yt} es la fuerza en el eje y de la llanta posterior.

3.2.2.1 Análisis de Momento en el eje Z

Para el análisis del momento en el eje Z, se tiene que:

$$\sum M_z = I_z * \ddot{\psi}$$

$$(Ec. 9) \quad I_z * \ddot{\psi} = l_d * F_{yd} - l_t * F_{yt}$$

En donde l_d y l_t son las distancias desde el centro de masa del robot hasta las llantas delanteras y posteriores respectivamente.

3.2.2.2 Análisis del desplazamiento de llantas frontales y posteriores

Para el análisis del desplazamiento de las llantas frontales y posteriores del robot móvil, es necesario considerar el deslizamiento de las llantas delanteras y posteriores, y al mismo tiempo los coeficientes de los neumáticos.

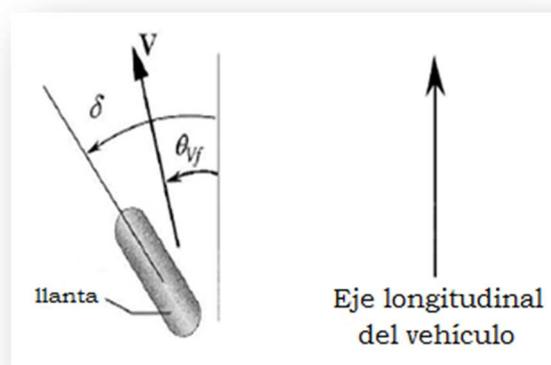


Figura 23 Ángulo de desplazamiento de la llanta frontal

El ángulo de deslizamiento de la llanta delantera (Figura 23) es:

$$(Ec. 10) \quad \alpha_d = \delta - \theta_{vd}$$

Y el ángulo de deslizamiento de la llanta posterior es:

$$(Ec. 11) \quad \alpha_r = -\theta_{vt}$$

Y el valor de las fuerzas será:

$$F_{yd} = 2C_{\alpha d}(\delta - \theta_{vd})$$

$$F_{yt} = 2C_{\alpha t}(-\theta_{vt})$$

Se debe multiplicar por dos cada expresión, debido a que el robot en realidad tiene dos ruedas delanteras y dos ruedas posteriores.

Además $C_{\alpha d}$ y $C_{\alpha t}$ corresponde al valor del coeficiente de los neumáticos, delanteros y traseros.

El valor de los ángulos θ_{vd} y θ_{vt} se pueden encontrar con las siguientes expresiones:

$$\tan(\theta_{vd}) = \frac{v_y + l_d * \dot{\psi}}{v_x}$$

$$\tan(\theta_{vt}) = \frac{v_y - l_t * \dot{\psi}}{v_x}$$

Estas expresiones se pueden simplificar aún más, si se analizan intervalos pequeños de control, y variaciones pequeñas de desplazamiento en donde:

$$(Ec. 12) \quad \theta_{vd} = \frac{\dot{y} + l_d * \dot{\psi}}{v_x}$$

$$(Ec. 13) \quad \theta_{vt} = \frac{\dot{y} - l_t * \dot{\psi}}{v_x}$$

Remplazando las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) en (8) y (9) se puede expresar en función de matrices las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha d} + 2C_{\alpha t}}{m * v_x} & 0 & -v_x - \frac{2C_{\alpha d} * l_d - 2C_{\alpha t} * l_t}{m * v_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2l_d * C_{\alpha d} - 2l_t * C_{\alpha t}}{I_z v_x} & 0 & -\frac{2l_d^2 C_{\alpha d} + 2l_t^2 C_{\alpha t}}{I_z v_x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha d}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_d C_{\alpha d}}{I_z} \end{bmatrix} \delta$$

3.3 Diseño Mecánico

3.3.1 Cálculo de la Potencia del Motor DC

La potencia requerida por el motoreductor DC esta determinado por la carga que debe soportar asi como tambien el máximo valor del ángulo donde se desplazara dicho robot. Para ello se tiene el siguiente diagrama de fuerza (Figura 24):

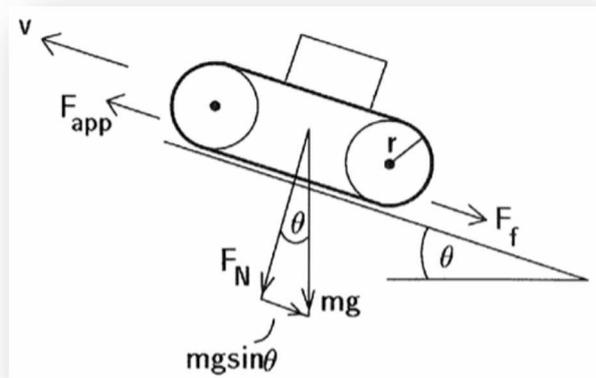


Figura 24 Diagrama de fuerzas del sistema

Con el DCL (Diagrama de Cuerpo Libre) del robot en las condiciones mas críticas se realiza una sumatoria de fuerzas, para ello se establece los datos iniciales del sistema:

$$m_{ROBOT} = 15.8 [kg]$$

$$m_{EXTRA} = 10 [kg]$$

$$m_{TOTAL} = m_{ROBOT} + m_{EXTRA} = 25.8 [kg]$$

$$\theta_{MAX} = 30^\circ \quad v_{ROBOT} = 12 \left[\frac{m}{mint} \right]$$

Haciendo una sumatoria de fuerzas en el eje donde se desplaza el robot en el DCL de la Figura 24 se tiene que:

$$F_{app} = F_f + m * g * \sin \theta$$

$$F_{app} = F_N * \mu + m * g * \sin \theta$$

$$F_{app} = m * g * \cos \theta * \mu + m * g * \sin \theta$$

Se considera un coeficiente de fricción entre el caucho que es el material de las llantas y el concreto igual a $\mu = 0.9$, ya que es la superficie donde se desplazara el robot móvil, además que estas dos superficies generan una condición de mayor resistencia para el movimiento del robot.

$$F_{app} = m_{TOTAL} * g * (\cos \theta * \mu + \sin \theta)$$

$$F_{app} = 25.8 [kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * (\cos 30^\circ * 0.9 + \sin 30^\circ)$$

$$F_{app} = 323.49 [N]$$

Para una velocidad constante, la potencia del motor DC se lo calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = F_{app} * v$$

$$P = 323.49 [N] * 12 \left[\frac{m}{mint} \right]$$

$$P = 3881.87 \left[\frac{N * m}{mint} \right] = 64.19 [W]$$

Se requiere un motoreductor DC con una potencia igual o mayor a 64.19 [W], para ello se calcula la potencia del motor DC considerando su voltaje y corriente con la que trabaja, de la siguiente manera:

$$V_{MOTOR} = 24 [V] \quad I_{MOTOR} = 3 [A]$$

$$P_{MOTOR} = V_{MOTOR} * I_{MOTOR}$$

$$P_{MOTOR} = 72 [W]$$

El motor seleccionado es un motoreductor utilizado en el campo automotriz para accionar el mecanismo de las plumas de los camiones Hino, las características de dicho motor se presenta en la Tabla 15.

La potencia del motor DC con el que se trabaja es 72 [W], la misma que satisface la potencia requerida de 64.19 [W].

Tabla 15 Características del Motor DC

Modelo	Características	Gráfico
	Tensión: 24 VCC	
M&C Electric	Corriente: 3A	
Power Wiper	Caja de cambios de aluminio	
Motor –	fundición a presión	
WD21100/211	Acero laminado	
00-B	Diseño de doble velocidad Rotor equilibrado dinámicamente	

3.3.2 Dimensionamiento del Sistema de Dirección

Debido a que se ha seleccionado la configuración cinemática Ackerman, es necesario tomar en cuenta como se efectuara el movimiento de las ruedas delanteras del Robot Móvil.

Para ello, se utiliza el mecanismo elemental con el que trabajan los sistemas de dirección mecánica de los automóviles, en donde, se convertirá el giro que se genere a través de un servomotor, en movimiento para la orientación de las ruedas como se muestra en la Figura 25 y Figura 26.

Existen varias exigencias para adaptaciones de este tipo en vehículos de pruebas, pero basta únicamente con tomar en cuenta lo siguiente: “La dirección debe garantizar con facilidad y seguridad la orientación del vehículo, Normativa europea 70/311/CEE”. (BOSH, 1999)

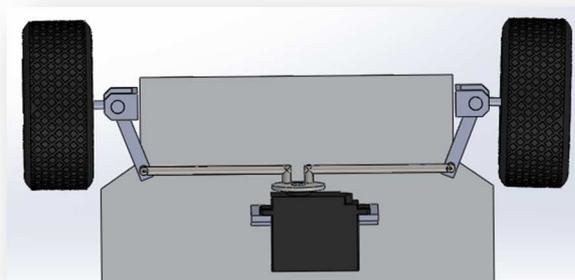


Figura 25 Dirección Ackerman del Robot Móvil – Vista Superior

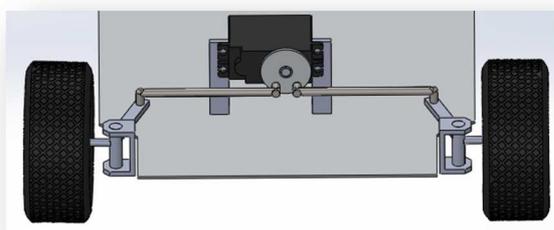


Figura 26 Dirección Ackerman del Robot Móvil – Vista Isométrica

3.3.2.1 Análisis Mecanismo de Dirección

Para poder obtener el movimiento deseado de las llantas se parte del mecanismo con el cual se transmite el movimiento, en este caso se tiene un mecanismo de Ackerman de cuatro barras, formado por una barra principal que es la barra estabilizadora (1-Figura 27), dos barras laterales que son los brazos de dirección (2-Figura 27) y una barra imaginaria; para así formar el mecanismo de cuatro barras en forma de trapecio como se muestra en la Figura 27. Un trapecio de dirección bien ajustado, impide el deslizamiento de las ruedas.

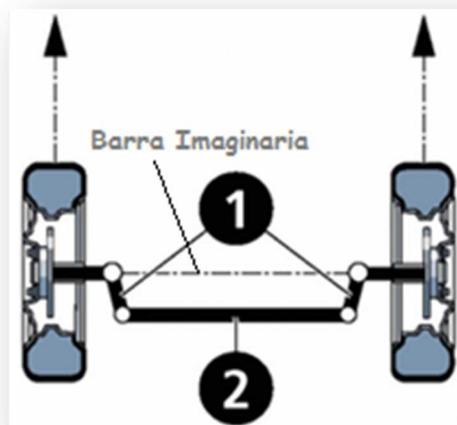


Figura 27 Trapecio de la dirección Ackerman

Dado este tipo de mecanismo se tiene una entrada del movimiento desde la barra estabilizadora, por lo que es necesario dividirla en tres secciones: barra izquierda, acople para el servomotor y una barra derecha (Figura 28); donde el ingreso del movimiento (torque del servomotor) se lo hace a través del acople del servomotor a las barras.

El movimiento rotacional generado por el servomotor se traspasa a la barra principal y esta a su vez genera un movimiento de los ejes de pivoteo (3-Figura 29) generando el giro de las llantas del robot móvil. Dado al mecanismo de Ackerman de tiene diferente ángulos de giro en las dos llantas acopladas a los ejes de pivoteo.

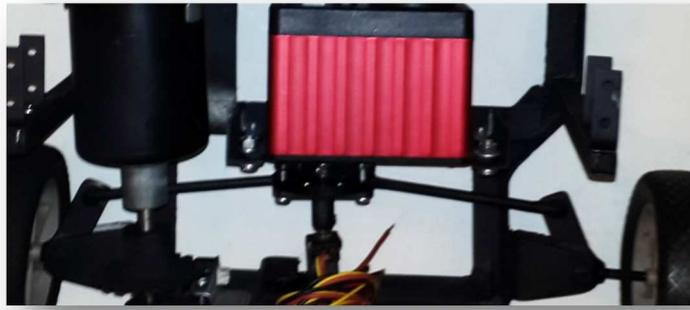


Figura 28 Segmentación de la barra principal

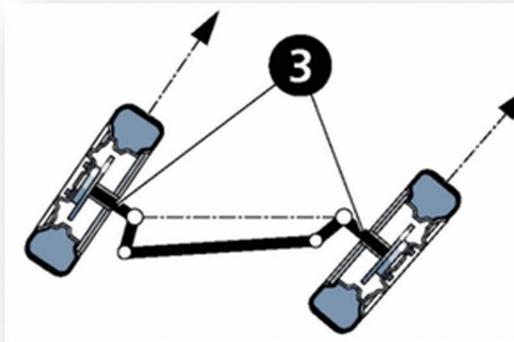


Figura 29 Movimiento de los ejes de pivoteo

3.3.2.2 Cálculo del diámetro de la Barra de Dirección

Para el cálculo del diámetro de las barras de dirección, en especial de la barra principal se va a realizar un estudio de las fuerzas que actúan en dicha barra, analizando desde la entrada de la fuerza, en este caso desde el torque de entrada del servomotor al mecanismo (Figura 30).

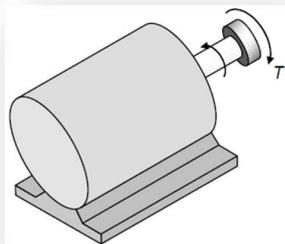


Figura 30 Torque que genera el servomotor

De las especificaciones de los servomotores Torxis marca Invenscience® (Anexo G), se busca el torque pico del servomotor correspondiente al modelo i00600 (Figura 31), teniendo un torque máximo de:

$$T = 3200 \text{ [oz} \cdot \text{in]} = 22597 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Part Number	Torque (Cont)	Torque (Peak)	Control	Time for 90 deg	Gear Reduction
i00600	1600	3200	Position	1500	1044:1
i00800	800	1600	Position	750	536:1
i01853	1600	3200	Velocity	1500	1044:1
i01854	800	1600	Velocity	750	536:1

Torque shown in oz*in units

Figura 31 Especificaciones de los Servomotores Torxis

Una vez encontrado el torque de entrada se lo calcula la fuerza, la misma que será la que experimente la barra de dirección al momento del giro de las llantas, dicho cálculo se lo realiza utilizando el concepto de torque es igual a fuerza por distancia, de la siguiente forma:

$$T = F * d$$

$$F = \frac{T}{d}$$

Donde la distancia d es medida desde el centro del acople del servomotor a las barras de dirección (Figura 32). Por lo que se tiene que la fuerza equivale a:

$$F = \frac{22597 [N * mm]}{50 [mm]}$$

$$F = 451.94 [N]$$

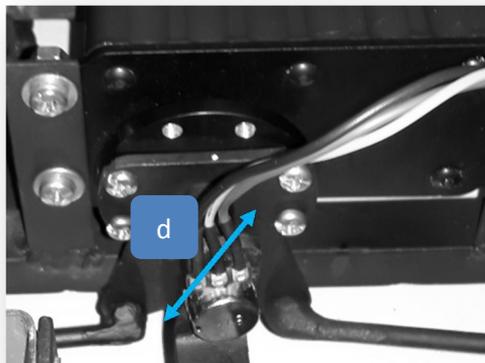


Figura 32 Distancia del servomotor a la barra principal

Se tiene una fuerza generada por el servomotor a las barras igual a 451.94 [N], con ello se realiza un diagrama de cuerpo libre (DCL) en la barra para el análisis de las fuerzas que actúan en ella (Figura 33).

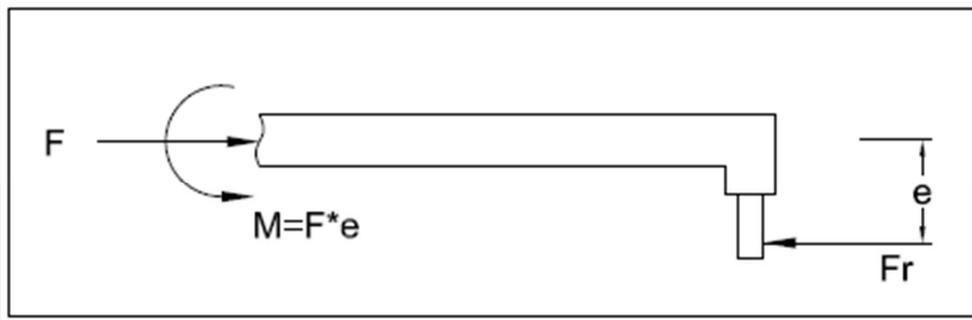


Figura 33 DCL para el análisis de Fuerzas en la barra principal

Donde F es la fuerza generada por el servomotor, Fr la fuerza resistiva debido al contacto con los ejes de pivoteo del mecanismo, desplazada una distancia e de la línea de referencia de la barra en estudio, generando un momento en la barra. Se debe considerar que Fr tiene sentido diferente pero de igual magnitud que F .

Mediante un análisis de las fuerzas que actúan en la barra (Figura 33) se realiza un estudio de los esfuerzos por flexión en la zona crítica de la barra, ya que se genera un momento al tener fuerzas en diferentes líneas de acción; por lo que se tiene que:

$$M = F * e$$

$$M = 451.94 [N] * 15[mm]$$

$$M = 6779.1 [N * mm]$$

En el estudio de flexión el esfuerzo está dado por la ecuación 14, tomada del capítulo 3 del libro Conceptos Básicos sobre Diseño de Máquinas (Universidad Tecnológica de Pereira, 2011) :

$$(Ec. 14) \quad \frac{S}{F_s} = \frac{M * c}{I}$$

Donde S es el esfuerzo de fluencia máximo del material de las barras (Figura 34), F_s es el factor de seguridad, M el momento generado, c la distancia desde el centro de la barra a su periferia en la sección transversal e I es la inercia de la barra.

La inercia de una barra circular está dado por:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$



Figura 34 Propiedades Mecánicas de Varillas Redondas Lisas

Reemplazando en la Ecuación 14 se tiene:

$$\frac{S}{Fs} = \frac{M * r}{\frac{\pi * r^4}{4}}$$

Despejando r tenemos:

$$r^3 = \frac{4 * M * Fs}{\pi * S}$$

$$r^3 = \frac{4 * 6779.1 [N * mm] * 1.5}{\pi * 538 [MPa]}$$

$$r^3 = \frac{4 * 6779.1 [N * mm] * 1.5}{\pi * 538 [MPa]}$$

$$r = 2.88 [mm]$$

Se tiene que el radio óptimo de la barra para la dirección es de 2.88 [mm], por ende dicha barra debe tener un diámetro de $\varnothing=5.76$ [mm]

De un catálogo comercial (Figura 35) observamos las dimensiones nominales para varillas redondas lisas y seleccionamos la varilla de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro (6.35 [mm]) para la construcción de las barras de la dirección, ya que esta es la que más próxima a la calculada.

Las longitudes de las barras de dirección se las calcula considerando el ancho del chasis, considerando que no exista ningún tipo de atasco

cuando se efectuó su movimiento. Dichas dimensiones se las puede encontrar en los planos mecánicos del robot móvil (Anexo A)

Dimensiones Nominales

PULGADAS No.		mm.	AREA SECCION mm. 2	PERIMETRO mm.	MASA Kg/m.	FORMA SUMINISTRO
2	1/4	6.35	32.00	19.90	0.25	Rollos
3	3/8	9.52	71.20	29.90	0.56	Rollos
		10.50	86.60	33.00	0.68	Barras
		12.00	113.10	37.00	0.89	Barras
4	1/2	12.70	126.70	39.90	1.00	Barras
		15.00	176.80	47.20	1.39	Barras
5	5/8	15.89	197.80	49.80	1.55	Barras
6	3/4	19.05	285.00	59.80	2.24	Barras
7	7/8	22.22	387.80	69.80	3.05	Barras
8	1"	25.40	506.70	79.70	3.99	Barras

Figura 35 Tabla de las dimensiones nominales de varillas redondas lisas

3.3.3 Dimensionamiento de Plataforma

La plataforma o chasis de un robot móvil (tipo vehículo) constituye su masa suspendida, es decir, la que no tiene contacto directo con la superficie de rodaje; en él se instalan los mecanismos (motores, ruedas, sensores, placas electrónicas, circuitos, baterías, sistemas de visión). Es fundamental tener en cuenta que la forma más directa de reducir el consumo de energía de un vehículo eléctrico, actuando sobre su estructura física, es reduciendo su peso.

Debido a la carga que va a soportar el robot móvil igual a 10 [kg], se ha seleccionado construir la plataforma con hierro (Véase Subcapítulo 3.1.2.2), material resistente que soportará dicha carga extra; también se ha considerado conformar la plataforma por el menor número de piezas posibles ya que si éste requiere mucho ensamblaje, reducirá la firmeza y estabilidad del mismo.

Al tener como material para la construcción del chasis al hierro se puede soldar las diferentes piezas obteniendo así una sola estructura resistente a nuestra aplicación (Figura 36).

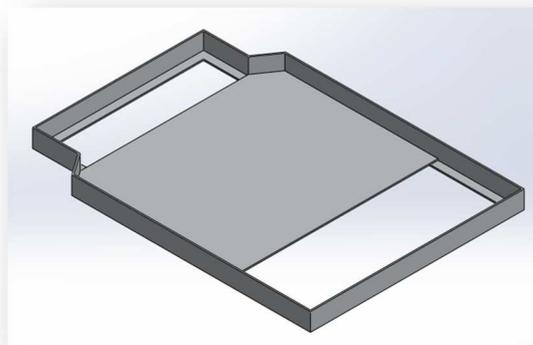


Figura 36 Modelo de la Plataforma (Chasis)

La Figura 36 muestra el modelo final de la plataforma del robot móvil, sus dimensiones se puede observar en los planos mecánicos del Robot Móvil en el Anexo A.

3.3.4 Diseño del Eje de Tracción

Se debe diseñar el eje con un solo cambio de sección, para que los elementos sean desmontables de la manera más simple, el eje debe operar a una velocidad mínima de 24 [rpm] y máxima de 30 [rpm]. Sobre el eje se tienen diversos elementos mecánicos, tales como un piñón para la transmisión de potencia del motor al eje, una pieza de duralón para la posible sujeción de un disco perforado adicional y bocines para utilizar como espaciadores entre los elementos. El eje debe tener en sus extremos las llantas que deberán impulsar el movimiento del robot. Se conoce que de manera adicional, el eje debe soportar la estructura del robot, es decir el peso propio y además la carga extra que se va a colocar sobre el mismo.

Según la geometría de la estructura, las dimensiones del eje se presentan en la Figura 37.

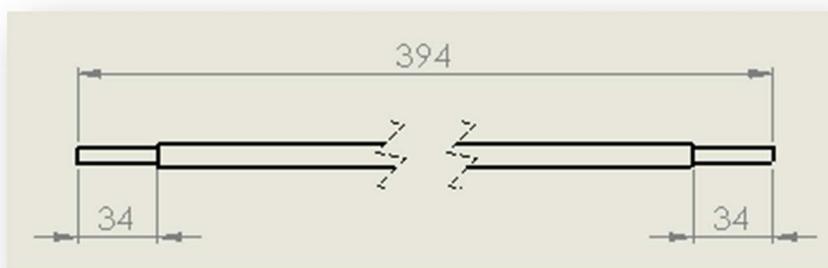


Figura 37 Dimensiones del eje de tracción

Se considera los datos iniciales para comenzar con el diseño del eje, tales como las masas de los elementos que deberá soportar el eje de tracción (Tabla 16).

Tabla 16 Datos de los elementos

Elemento	Dato
Masa del robot	15 [kg]
Masa extra	10 [kg]
Masa del piñón	150 [g]
Masa de duralón	50 [g]
Masa del bocín 1	80 [g]
Masa del bocín 2	120 [g]
Diámetro rueda	127 [mm]
Potencia del motor	0.1 [HP]

Se diseña el eje de tracción, a partir de las condiciones máximas dadas, es decir la máxima velocidad de rotación igual a 30 [rpm], y suponiendo que el robot tiene la carga extra sobre él.

Para ello, se considera el caso más crítico, en el cual los 25,8 [kg] se recargan sobre el eje, para así asegurar que el resultado que se obtenga del diámetro óptimo, sea más que suficiente para soportar las condiciones de trabajo.

Se sigue una serie de pasos para el diseño del eje de tracción, los mismos que se detallan a continuación:

- a. A partir de la potencia del motor, es posible conocer cuál es el torque al cual está sometido el eje.

$$\text{Potencia del Motor} \rightarrow P = 0.1 \text{ [HP]}$$

$$\text{velocidad de trabajo} \rightarrow n = 30 \text{ [rps]}$$

$$\text{Torque} \rightarrow T = \frac{63000 * P}{n}$$

$$T = \frac{63000 * 0.1}{30} = 210 \text{ [lb * plg]}$$

- b. Al saber las cargas a las cuales se encuentra sometido el eje es posible obtener los diagramas de cortante y momento, a través del uso de un paquete informático conocido como MDSolid, cuyos resultados fueron los siguientes (Figura 38):

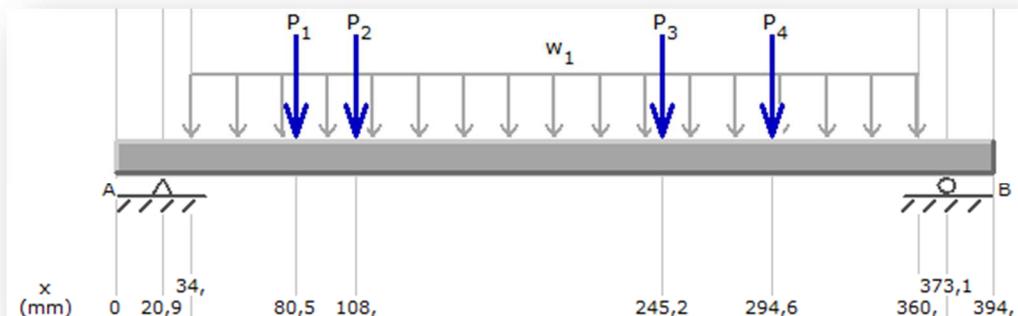


Figura 38 Cargas sobre el eje

En la gráfica se aprecia cada una de las cargas a las cuales está sometido el eje, los dos puntos de apoyos en este caso son las llantas, que están en contacto con el piso. Los vectores de fuerza P1 (peso del bocín 1), P2 (peso del duralón), P3 (peso del piñón) y P4 (peso del bocín 2) están ubicados en la posición en la que deberán estar cuando el eje este montado para el funcionamiento; y finalmente la carga distribuida que se presenta, es debido al peso propio del robot así como el peso extra que deberá cargar.

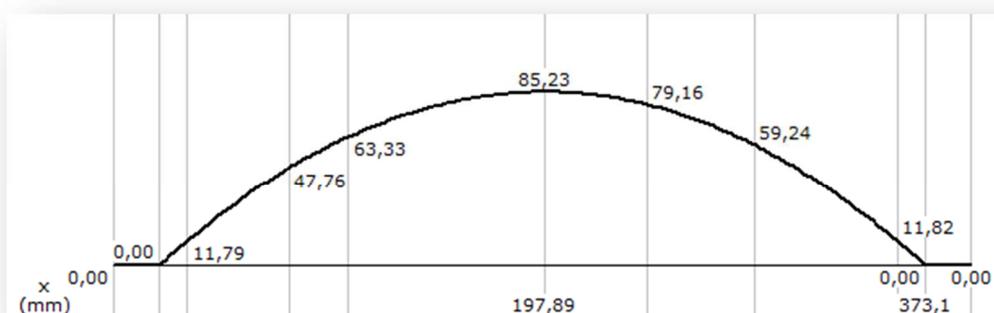


Figura 39 Diagrama de Momentos



Figura 40 Diagrama de Cortante

A partir de esta configuración de las cargas, el software es capaz de desarrollar el diagrama de Momentos (Figura 39) y el diagrama de Cortante (Figura 40).

- c. A partir de los diagramas de Momento y Cortante, se puede obtener los valores a los cuales va a estar expuesto el eje, se ocupan los datos de las secciones más críticas, que para este caso son los cambios de sección, ubicados a 34 [mm] del origen y a 360 [mm]. Cuyos valores se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17 Valores de Cortante y Momento en secciones críticas

Sección	Cortante	Momento
1. A 34 mm	Vy1 = 22.85 lb	Mz1 = 11.76 lb*in
2. A 360 mm	Vy2 = 22.92 lb	Mz2 = 11.79 lb*in

- d. Al verificar los valores de los cambios de sección, se observa que la sección con valores relativamente mayor es la sección 2, por lo tanto, a partir de esta sección se diseña el diámetro del eje.
- e. Para la sección seleccionada se debe calcular los esfuerzos, cortante, cortante por torsión y normal por flexión, todos en función del diámetro a buscar.

$$\text{Esfuerzos cortantes} \rightarrow T_v = \frac{Vy^2}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

$$\text{Esfuerzos cortantes por torsión} \rightarrow Tt = \frac{T * \frac{D}{2}}{\frac{\pi}{32} * D^4}$$

$$\text{Esfuerzo normal por flexión} \rightarrow \sigma b = \frac{Mz2 * \frac{D}{2}}{\frac{\pi}{64} * D^4}$$

- f. De las expresiones anteriores, se analiza que el esfuerzo menos significativo es el esfuerzo cortante, y además, no existen esfuerzos alternantes. Por lo tanto, se podría decir lo siguiente:

$$\text{Esfuerzo por flexión equivalente medio} \rightarrow \sigma_{eqm} = \sigma b$$

$$\text{Esfuerzo por torsión equivalente medio} \rightarrow T_{eqm} = Tt$$

Entonces:

$$\sigma_{eqm} = \frac{32 * Mz2}{\pi * D^3}$$

$$T_{eqm} = \frac{16 * T}{\pi * D^3}$$

- g. Concentradores de esfuerzos.-** No se considera ningún concentrador, debido a que el eje de tracción no posee cambios de sección.

$$\text{Esfuerzo de flexión} \rightarrow \sigma_{eqm}' = \sigma_{eqm}$$

$$\sigma_{eqm'} = \frac{32 * Mz2}{\pi * D^3}$$

Esfuerzo de Torsión → $Teqm' = Teqm$

$$Teqm' = \frac{16 * T}{\pi * D^3}$$

- h. Al conocer el material a utilizar, Acero AISI 1040, cuyo esfuerzo último es de 76000 PSI (Figura 41).

TABLA C-9 Propiedades mecánicas de algunos aceros al carbono
 Datos de varias fuentes. * Valores aproximados. Consulte a los fabricantes de los materiales para información más precisa.

Número SAE/AISI	Estado	Limite elástico a la tensión (convencional al 2%)		Resistencia máxima a la tensión		Elongación en 2 in %	Dureza Brinell -HB
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1010	laminado en caliente	26	179	47	324	28	95
	laminado en frío	44	303	53	365	20	105
1020	laminado en caliente	30	207	55	379	25	111
	laminado en frío	57	393	68	469	15	131
1030	laminado en caliente	38	259	68	469	20	137
	normalizado @ 1 650°F	50	345	75	517	32	149
	laminado en caliente	64	441	76	524	12	149
	templado y revenido @ 1 000°F	75	517	97	669	28	255
	templado y revenido @ 800°F	84	579	106	731	23	302
1035	templado y revenido @ 400°F	94	648	123	848	17	495
	laminado en caliente	40	276	72	496	18	143
	laminado en frío	67	462	80	552	12	163
1040	laminado en caliente	42	290	76	524	18	149
	normalizado @ 1 650°F	54	372	86	593	28	170
	laminado en frío	71	490	85	586	12	170
	templado y revenido @ 1 200°F	63	434	92	634	29	192
	templado y revenido @ 800°F	80	552	110	758	21	241
	templado y revenido @ 400°F	86	593	113	779	19	262

Figura 41 Propiedades mecánicas de aceros al carbono (NORTON, 2011)

Aplicando teoría de fallas por fatiga, siguiendo la metodología utilizada en el libro “Diseño de Maquinas” de Robert Norton, es posible ya determinar el diámetro del eje.

$$\text{factor de seguridad} \rightarrow Fs = 1.5$$

$$\text{Teoria de fallas por fatiga} \rightarrow \frac{Su}{Fs} = \sigma_{eqm''}$$

$$\frac{Su}{Fs} = \sqrt{\sigma_{eqm'}^2 + 3\tau_{eqm'}^2}$$

$$\frac{Su}{Fs} = \sqrt{\left(\frac{32 * Mz2}{\pi * D^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16 * T}{\pi * D^3}\right)^2}$$

$$\text{Despejando} \rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{Fs}{Su} \sqrt{\left(\frac{32 * Mz2}{\pi}\right)^2 + 3\left(\frac{16 * T}{\pi}\right)^2}}$$

$$\text{Resolviendo} \rightarrow D = 0.332 [plg] = 8.43 [mm]$$

Con el valor de diámetro calculado, es posible decidir el diámetro estándar de una varilla, verificando las disponibles en un catálogo comercial (Figura 42).

Diámetro del eje	
d _{LW}	
pulgada	mm
1/4	6,35
3/8	9,525
1/2	12,7
5/8	15,875
3/4	19,05
7/8	22,22
1	25,4
1 1/8	28,575
1 1/4	31,75
1 3/8	34,95
1 1/2	38,1

Figura 42 Diámetros de ejes estándar

Verificando los diámetros estándar para ejes de acero, mediante un catálogo, se tiene que el diámetro superior aproximado para el prototipo es el de 3/8" (9.525 [mm]).

3.3.5 Diseño de la Transmisión de Potencia

Dado que el motor DC encargado de dar la tracción al robot presenta una caja reductora, con un salida baja de velocidad angular (revoluciones por minuto), la transmisión de potencia al eje de tracción será con una relación 1:1, y para ello se analizará mediante un cuadro de selección las alternativas más óptimas para la transición de potencia (Tabla 18).

Tabla 18 Alternativas para la transición de potencia

Alternativas	
Código	Tipo
A	Por bandas
B	Por cadena
C	Directa con dos motores
D	Caja de engranes

Con las alternativas se establece los criterios más óptimos para que la transición de potencia sea funcional con respecto a los requerimientos establecidos (Tabla 19).

Tabla 19 Criterios de Selección para la Transmisión de Potencia

Criterio de Selección		
Código	Criterio	Ponderación
I	Facilidad de mantenimiento	15%
II	Resistencia mecánica	30%
III	Facilidad de montaje	30%
IV	Bajo Costo	10%
V	Disponibilidad	15%
TOTAL		100%

Una vez establecidos los criterios de selección, se realiza una asignación de valores dependiendo las ventajas y desventajas de cada alternativa para la transición de potencia con su respectiva ponderación (Tabla 20), como se lo realizo en las tablas anteriores.

Tabla 20 Ponderación para la selección de la transición de potencia

Ponderación para la Selección de la Transmisión de Potencia									
		I	II	III	IV	V	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativa	A	5	1	5	5	5	21	3,8	X
	B	3	5	5	5	5	23	4,7	OK
	C	3	5	5	1	3	17	4	X
	D	1	5	1	1	3	11	2,5	X

Se determina que la mejor opción para la transición de potencia del motor de tracción es mediante cadenas para lo cual se deberá seleccionar el paso y su longitud dependiendo de los parámetros físicos del robot.

Se trabaja con una cadena de rodillos, ya que esta es la más utilizada dentro del mercado, y al trabajar con una relación en la transmisión 1:1, se utiliza piñones de igual número de dientes tanto en el piñón del motor como en el piñón del eje de tracción.

Entre las ventajas que tiene la utilización de cadenas para la transmisión de potencia tenemos que no presenta deslizamiento, es compacta y no requiere tensión inicial como en el caso de las correas, permite trabajar con menores distancias entre centros de poleas, con la consiguiente ventaja económica.

Dado al tamaño del robot móvil se ha optado por seleccionar una cadena con un paso pequeño, ya que esto ayudará a reducir el peso. Por ello se ha escogido trabajar con una cadena de paso igual a $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 [mm]), que corresponde a uno de los pasos más pequeños para cadenas según DIN 8188 de las Series Americanas (Figura 43 y Figura 44).

SERIE AMERICANA Según DIN 8188										
Referencia ASA	Paso P	Ancho interior B	Ø rodillo C	Eje		Ancho mallas G	Luz lateral mínima F	Superficie trabajo	Carga rotura	Peso aprox.
				Ø D	Longitud E					
25-1	mm 6,35	mm 3,20	mm 3,30	mm 2,30	mm 8,2	mm 6,02	mm 13	mm ² 11	daN 450	Kg/m 0,13

Figura 43 Especificaciones Cadena de Rodillos

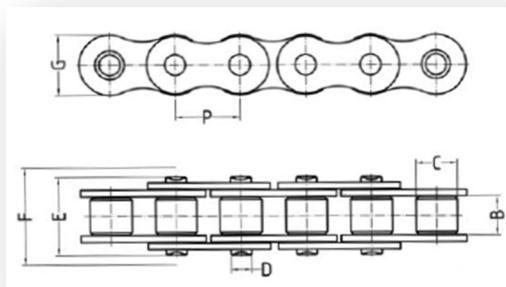


Figura 44 Descripción gráfica de los parámetros de la cadena de rodillos

3.3.5.1 Cálculos de la longitud de la cadena

Para el cálculo de la longitud de la cadena se tiene que especificar la relación entre el número de dientes de la rueda y el piñón, así como también la distancia entre centros de los mismos (Figura 45).

Del catálogo técnico de cadenas se tiene la ecuación para el cálculo de la longitud de cadena:

$$L = 2C + \frac{N + n}{2} + \frac{\left(\frac{N - n}{2 * \pi}\right)^2}{C}$$

Donde L es longitud de la cadena expresada en pasos, C la distancia entre ejes donde se encuentran los piñones también expresado en pasos, N es el número de dientes del piñón conductor y n es el número de dientes del piñón conducido.



Figura 45 Conjunto Piñones – Cadena

De la tabla de especificaciones de la cadena de rodillos para un paso de 6.35 [mm] (Figura 43) y la medida de la distancia entre ejes de la estructura del robot se tiene los siguientes datos iniciales que servirán para el cálculo de la longitud entre piñones (Tabla 21):

Tabla 21 Datos iniciales para el cálculo de la longitud de la cadena

Datos	
C	120 [mm]
N	20 dientes
n	20 dientes
P	¼" (6.35 [mm])

Se expresa la distancia entre centros (C) en pasos de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{C}{P}$$

$$C_p = \frac{120 \text{ [mm]}}{6.35 \text{ [mm]}} = 18.9$$

Con este dato se calcula la longitud con la fórmula expresada anteriormente, así:

$$L = 2Cp + \frac{N + n}{2} + \frac{\left(\frac{N - n}{2 * \pi}\right)^2}{Cp}$$

$$L = 2 * 18.9 + \frac{20 + 20}{2} + \frac{\left(\frac{20 - 20}{2 * \pi}\right)^2}{18.9}$$

$$L = 57.8$$

De la formula anterior se obtiene una longitud de cadena expresada en pasos, por lo que se expresa en milímetros, multiplicando por el paso.

$$L [mm] = L * P$$

$$L [mm] = 57.8 * 6.35 [mm]$$

$$L [mm] = 367.03 [mm]$$

La longitud de la cadena para la transición de potencia del robot móvil debe ser de 36.70 [cm], pero para evitar que dicha cadena este tensada se ha considerado un porcentaje de holgura, teniendo así una longitud de cadena de 38 [cm].

El catálogo de la cadena del prototipo se muestra en el Anexo J

3.3.6 Selección de Ruedas

El robot móvil utiliza un sistema de locomoción por ruedas, ya que presentan ventajas comparándolos con otros sistemas, entre ellas tenemos que son más simples, eficientes, estables y fáciles de implementar como de controlar. Como el ambiente en el que se desarrolla el sistema es variable pero a su vez es liso, uno de los elementos a tener en cuenta es la tracción que presente en terrenos con más fricción. Otro factor importante para ser analizado es el considerar un material que presente mayor adherencia a la superficie de movimiento, es por ello que se ha seleccionado utilizar llantas del tipo de caucho, que por lo general son las más comunes dentro del mercado.



Figura 46 Modelo de la Rueda del Robot Móvil

Se escogió trabajar con cuatro llantas que le den al vehículo la altura suficiente, para sortear los obstáculos pequeños. Para la selección del rin de las ruedas se analiza el tamaño y peso del robot, al igual que la

disponibilidad en el mercado; por ello se propone utilizar rines de plástico con llantas de caucho, como se aprecia en la Figura 47. Las dimensiones de las ruedas se presentan en los planos mecánicos (Anexo A).

3.4 Simulación

3.4.1 Simulación del movimiento de la dirección

En la Figura 47 se tiene un análisis del movimiento del mecanismo realizado en Sam 6.1, donde se observa la disposición de los diferentes elementos que compondrán la dirección, tomando en cuenta que por efectos de simulación fue necesario insertar una barra adicional para la generación del torque de entrada, se tiene como resultado el giro correcto de los ejes de pivoteo en forma circular generando diferentes ángulos en cada lado, característica del mecanismo Ackerman.

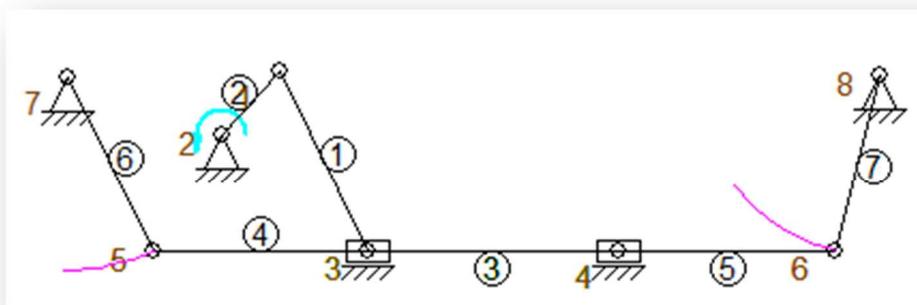


Figura 47 Análisis del Mecanismo de la Dirección

Al tener el servomotor con las características del movimiento, se simula su desplazamiento tanto a la derecha como a la izquierda, en la Figura 48 y Figura 49 se observa como el mecanismo es funcional en la disposición que se encuentra, ya que se confirma también las restricción de un mecanismo Ackerman, observándose que el ángulo de giro interno tiene un mayor porcentaje de inclinación con respecto al externo a la curva.

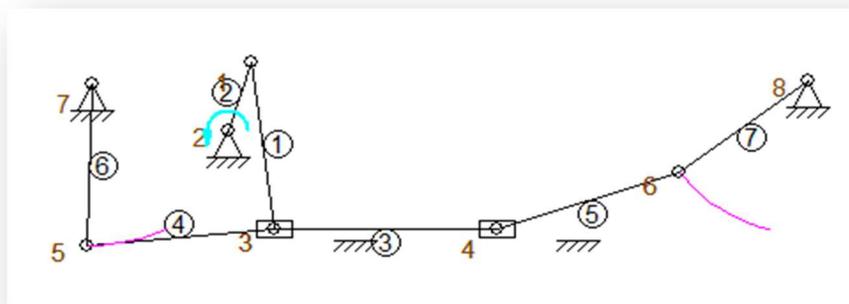


Figura 48 Simulación movimiento a la derecha

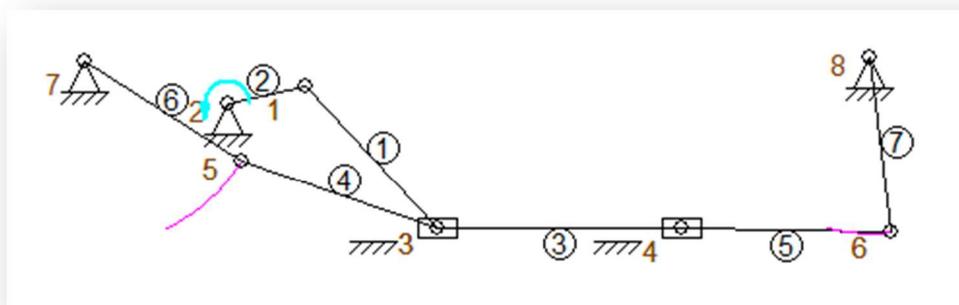


Figura 49 Simulación movimiento a la izquierda

3.4.2 Simulación de la Carga Aplicada

Para verificar que la plataforma (chasis) soporte la carga aplicada tanto de los componentes que conforman el robot móvil, así como de la carga extra aplicada se ha escogido realizarla a través de SolidWorks, observando que la carga aplicada no genera ningún tipo de deformación crítica a la estructura (Figura 50).

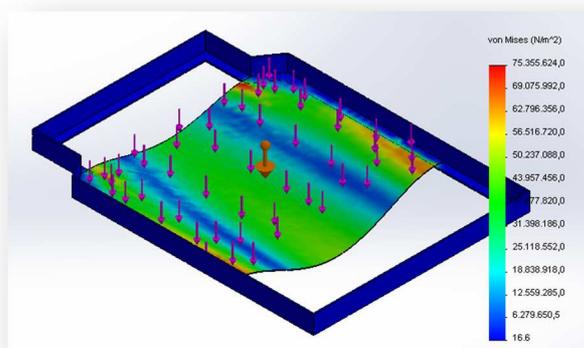


Figura 50 Simulación de la Plataforma

3.5 Diseño Electrónico y de Control Básico

3.5.1 Sistema de Control

3.5.1.1 Descripción

El sistema de control del prototipo de Robot Móvil debe presentar funciones para la detección de obstáculos mediante la medición de la distancia próxima a objetos, control de velocidad lineal, y trazado de

trayectorias tales como circunferencia, parábola o hélice mediante una selección de las mismas a través de una interfaz gráfica en el computador.

El prototipo debe contar con dos modos de trabajo: un Modo Manual en el cual se puede maniobrar mediante órdenes sobre los motores para que se desplace a conveniencia del usuario, y el segundo mediante un Modo Automático donde se selecciona la velocidad y la trayectoria a trazar para que el prototipo las realice de manera autónoma. Los modos de funcionamiento deberán ser programados y visualizados mediante un HMI (Human Machine Interface) en un computador portátil.

Para dotar al computador de la capacidad de obtener las variables inmersas en el prototipo, se trabaja con una tarjeta electrónica que sea capaz de adquirir y enviar los datos provenientes del robot al computador para que estos sean procesados y devueltos, y a su vez comunicados a los actuadores seleccionados en el subcapítulo 3.1.2 del presente capítulo.

Para el control de los actuadores, tanto el servomotor como el motor DC, se requiere la implementación de tarjetas electrónicas que cumplan la función de controladores y puedan a su vez convertir las órdenes enviadas al prototipo en acciones de movimiento para sus motores.

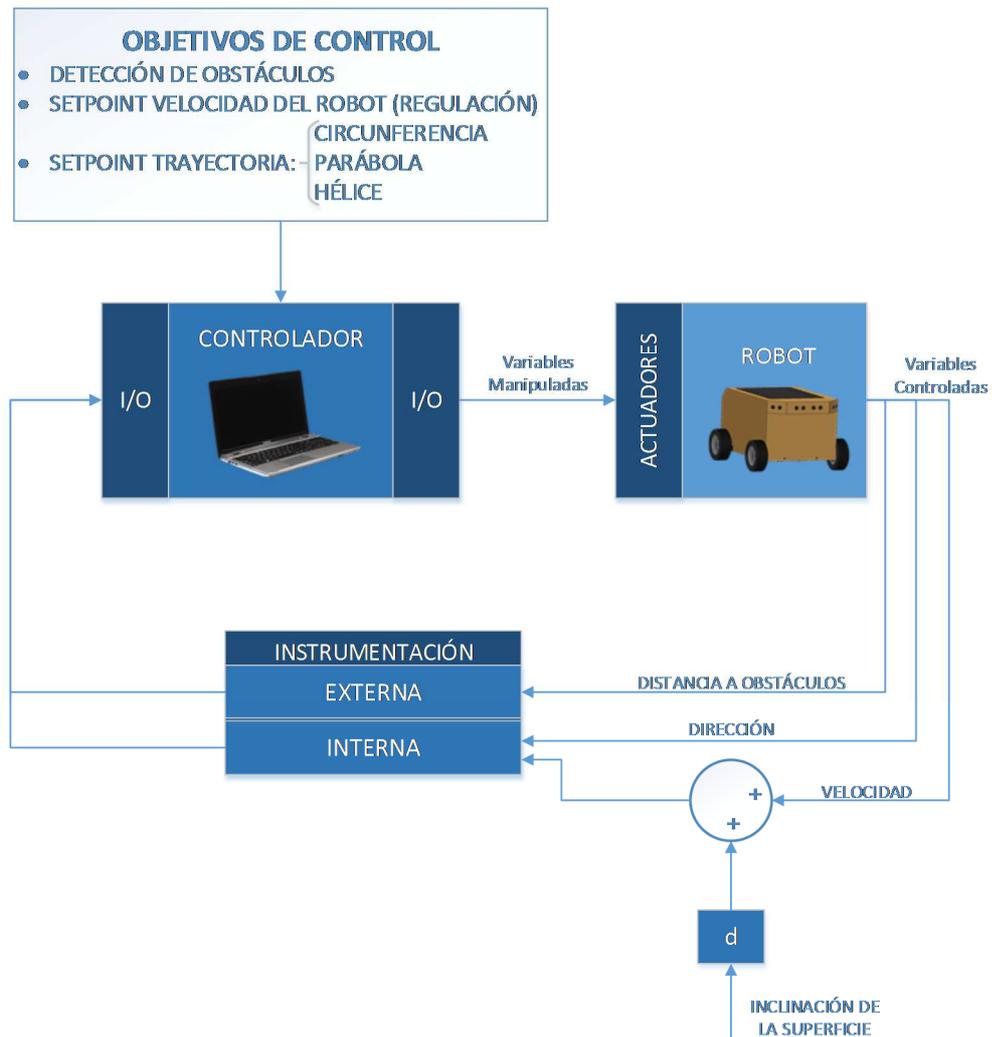


Figura 51 Esquema de Bloques del Sistema

Se necesita tener información acerca del estado del prototipo así como el estado de su entorno, para ello se emplea instrumentación mediante sensores internos y externos.

Mediante un diagrama de bloques del sistema se detalla el funcionamiento del prototipo, dando a conocer las variables inmersas dentro del mismo (Figura 51).

3.5.1.2 Variables del Sistema

Para el prototipo de este proyecto se necesita información de proximidad de obstáculos y ángulo de inclinación de la superficie como variables para la percepción del entorno (Variables Controladas), al igual que información de la velocidad lineal del prototipo y el ángulo de giro de las llantas como variables manipuladas del sistema (Acción de Control). Las variables del robot móvil se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22 Variables del Robot Móvil

	Variables Controladas	Variables Manipuladas (Acción de Control)
Magnitud	Distancia (Obstáculos)	Velocidad Lineal (Robot)
	Inclinación (Superficie)	Posición Angular (Dirección)

3.5.1.3 Objetivo de Control

La finalidad del sistema de control es mantener constante la variable de velocidad de desplazamiento en el prototipo (Regulación) y el trazado de la trayectoria seleccionada en el HMI del computador a través de un controlador, y mediante la retroalimentación de las variables controladas (Figura 52).

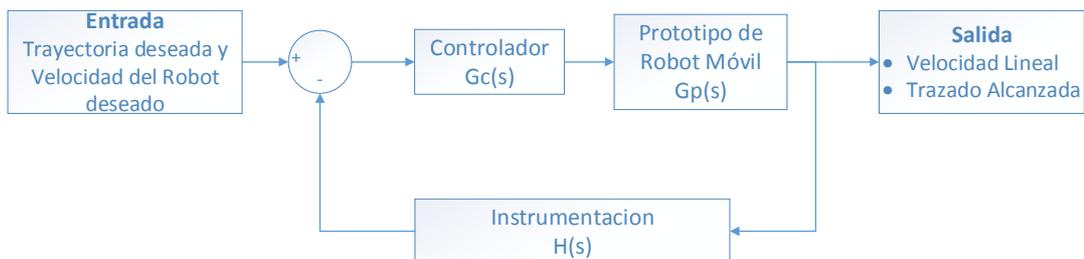


Figura 52 Diagrama de Lazo Cerrado del Sistema

3.5.1.4 Instrumentación

Para lograr que el prototipo realice de forma adecuada cada uno de los trazados de las trayectorias, se necesita tener la información acerca del estado del prototipo, así como el estado de su entorno; para ello existen dos tipos de sensores.

- **Sensores externos:** son aquellos capaces de emitir señales de información sobre el entorno en el cual se encuentran, las principales señales que estos sensores pueden medir son: alcance, proximidad, contacto, fuerza, etc.
- **Sensores internos:** son aquellos que se encuentran integrados en la estructura del prototipo, y son capaces de emitir la información acerca de la posición, velocidad y aceleración del mismo.

El prototipo de robot móvil presenta cuatro variables, dos de control y dos manipuladas (Tabla 22) para lo cual se necesita los siguientes sensores para su medición:

- **Distancia a obstáculos**

La presencia de obstáculos en el recorrido del robot móvil resulta un problema para el cumplimiento de las trayectorias definidas, por tal motivo es necesario emplear un sensor para la percepción del entorno donde se esté desplazando el robot, el mismo que deberá detectar la presencia de un objeto, midiendo la distancia a la que se encuentra del robot.

Tabla 23 Alternativas para el sensor de distancia

Alternativas	
Código	Sensor
A	Ultrasónico
B	Infrarrojo
C	Capacitivo
D	Cámara

En la Tabla 23 se presenta las alternativas más óptimas para la selección del sensor de distancia.

Una vez establecidos las posibles alternativas se establece los criterios más óptimos del sensor, cada uno de ellos con su respectiva ponderación (Tabla 24).

Tabla 24 Criterio de selección para el sensor de distancia

Código	Criterio	Ponderación
I	Cumple especificaciones eléctricas del sistema	15%
II	Alcance de medición (0-3 metros)	30%
III	Facilidad de montaje	10%
IV	Compatibilidad con Arduino	15%
V	Bajo costo	20%
VI	Disponibilidad	10%
TOTAL		100%

Establecidos los criterios de selección, se realiza una asignación de valores (Tabla 25) dependiendo su cumplimiento sobre cada alternativa

Tabla 25 Valoración para los criterios de selección

Valoración Cualitativa	Valoración Cuantitativa
No cumple	1
Cumple Parcialmente	3
Si cumple	5

Tabla 26 Ponderación para la selección del sensor de distancia

Ponderación para la Selección del Sensor de Distancia										
		I	II	III	IV	V	VI	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativas	A	5	5	3	5	3	5	26	4,4	OK
	B	5	1	3	5	5	5	24	3.6	X
	C	3	5	3	3	1	1	16	3	X
	D	3	3	3	1	1	5	16	2,5	X

Se asigna uno de los tres valores de la Tabla 25 a cada criterio de selección, dependiendo las ventajas y desventajas que presenta cada alternativa de sensor (Tabla 26).

La mejor opción para el sensor de distancia es la alternativa A, que corresponde al uso de sensores ultrasónicos.

El sensor ultrasónico estará colocado en la parte frontal del robot, en una distribución de 4 sensores en fila para la percepción completa de los obstáculos presentes en el recorrido del robot.

- **Inclinación de Superficie**

La inclinación de la superficie donde se esté desplazando el robot móvil se convierte en una perturbación externa del sistema que afectará directamente a la velocidad del prototipo, para poder monitorear el ángulo de dicha superficie será necesario emplear un sensor que permita cuantificar el ángulo de inclinación del piso. Para ello se tiene las posibles alternativas de solución (Tabla 27).

Tabla 27 Alternativas de selección del sensor para la percepción de inclinación

Alternativas	
Código	Sensor
A	Giroscopio mecánico
B	Acelerómetro
C	Compás magnético
D	Giroscopio óptico

Establecidos las alternativas para el sensor de inclinación de superficie, se considera los criterios más idóneos para la selección del mismo (Tabla 28).

Tabla 28 Criterio de selección del sensor de inclinación

Código	Criterio	Ponderación
I	Cumple especificaciones eléctricas del sistema	15%
II	Ángulo de medición requerido	30%
III	Facilidad de montaje	10%
IV	Compatibilidad con Arduino	15%
V	Bajo Costo	20%
VI	Disponibilidad	10%
TOTAL		100%

Estableciendo valores a cada criterio de selección (Tabla 29), tenemos:

Tabla 29 Ponderación para la selección del sensor de Inclinación

Ponderación para la Selección del Sensor de Inclinación										
		I	II	III	IV	V	VI	Sumatoria	Sumatoria Ponderada	
Alternativa	A	1	5	1	1	3	1	12	2,6	X
	B	5	5	5	5	3	3	26	4,4	OK
	C	3	5	3	3	5	1	20	3,8	X
	D	3	3	5	5	1	3	22	3,4	X

Como resultado se tiene que la opción más óptima para el sensor de inclinación de la superficie donde se desplace el robot móvil es un acelerómetro, el mismo que se configura como medidor de inclinación en los tres ejes.

- **Velocidad Lineal**

La medición de la velocidad real con que se desplaza el robot móvil servirá para la estimación odométrica de la posición del mismo durante su recorrido, dicha variable debe ser calculada mediante la medición de las revoluciones que esa generando el motor de tracción.

Cabe recalcar que el término odometría hace referencia al estudio de la estimación de la posición del vehículo o robot con ruedas.

Para la selección del sensor adecuado con el que se obtenga estimaciones aceptables, se considera la velocidad aproximada donde se incorporará dicho sensor, ya que al trabajar con velocidades baja ($\text{rpm} < 100$) se necesita un sensor con respuesta rápida y de alta resolución, al contrario que si se trabaja con velocidades altas ($\text{rpm} > 500$) la resolución óptima sería la mínima para la estimación de velocidad del robot. Las alternativas más óptimas para la selección de este sensor se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30 Alternativas para el sensor de velocidad

Alternativas	
Código	Sensor
A	Reed Switch
B	Encoder Rotatorio
C	Encoder Óptico

Tabla 31 Criterio para la selección del sensor de velocidad

Código	Criterio	Ponderación
I	Cumple especificaciones eléctricas del sistema	15%
II	Resolución necesaria para odometría	35%
III	Facilidad de montaje	20%
IV	Bajo Costo	15%
V	Disponibilidad	15%
TOTAL		100%

Una vez señalados las alternativas para el sensor encargado del análisis de odometría (sensor de velocidad) se establece los criterios para su selección, con su respectiva ponderación (Tabla 31).

Asignando valores a cada criterio de selección (Tabla 32), tenemos:

Tabla 32 Ponderación para la selección del sensor para el análisis de odometría

Ponderación para la Selección del sensor									
		I	II	III	IV	V	Sumatoria		
							Sumatoria	Ponderada	
Alternativas	A	5	1	1	1	5	13	2,2	X
	B	3	3	3	5	5	19	3,6	X
	C	5	5	3	3	5	21	4,3	OK

Como resultado se obtiene que la alternativa más óptima para el sensor de velocidad es un encoder óptico.

- **Posición Angular**

La medición de la posición angular de las llantas del robot móvil servirá para una mejor estimación de la posición del prototipo durante el trazado de cualquiera de sus trayectorias, por lo que deberá poseer una buena precisión en su medición.

Para ello se tiene las posibles alternativas de solución de este sensor (Tabla 33).

Tabla 33 Alternativas para el sensor de posición angular

Alternativas	
Código	Sensor
A	Potenciómetro Rotatorio
B	Sensor de Ángulo Magnético
C	Giroscopio

Se considera los criterios más óptimos para la selección del sensor de posición angular (Tabla 34).

Tabla 34 Criterio para la selección del sensor de posición angular

Código	Criterio	Ponderación
I	Cumple especificaciones eléctricas del sistema	15%
II	Precisión del ángulo de medición	30%
III	Facilidad de montaje	25%
IV	Bajo Costo	20%
V	Disponibilidad	10%
TOTAL		100%

Estableciendo valores a cada criterio de selección (Tabla 35), tenemos:

Tabla 35 Ponderación para la selección del sensor de posición angular

Ponderación para la Selección del sensor									
		I	II	III	IV	V	Sumatoria		
							Sumatoria	Ponderada	
Alternativas	A	5	3	5	5	5	23	4,4	OK
	B	5	5	3	3	3	19	3,9	X
	C	3	3	1	3	3	13	2,5	X

Como resultado se obtiene que la alternativa más óptima para el sensor de posición angular es un potenciómetro rotatorio.

Se debe tener en cuenta que la información recibida por cada uno de los sensores es transmitida a la tarjeta de adquisición de datos, en la cual se la transforma y se la envía al computador de forma que la entienda, para ser procesada y devuelta a la tarjeta electrónica.

3.5.1.5 Controlador

- **Estructura del Controlador**

Considerando las características del controlador detalladas en el subcapítulo 3.5.1.1, se conoce que el controlador debe constar de un computador y una tarjeta electrónica dedicada a la adquisición de datos y por la cual pueda el computador tener acceso a las variables manipuladas y

controladas del prototipo, para lo cual debe dotarse al mismo de una interfaz de entradas y salidas (Figura 53).



Figura 53 Estructura del Controlador

- **Características**

Las principales características que debe tener la Interfaz de entradas y salidas (Tarjeta electrónica de Adquisición de datos) se pueden observar en la Tabla 36

Tabla 36 Características de la tarjeta electrónica de Adquisición de Datos

Características de la Tarjeta de Adquisición de Datos
Microcontrolador integrado
Tensión de funcionamiento de 5V a 12V
Pines de Entrada y Salidas digitales
Pines Analógicos
Rápida Velocidad de Procesamiento
Compatibilidad con drivers para actuadores
Comunicación mediante Puerto Serial (UART)

3.5.1.6 Lógica de Control

La lógica de control del sistema se presenta de manera general en diagrama de flujo de la Figura 54.

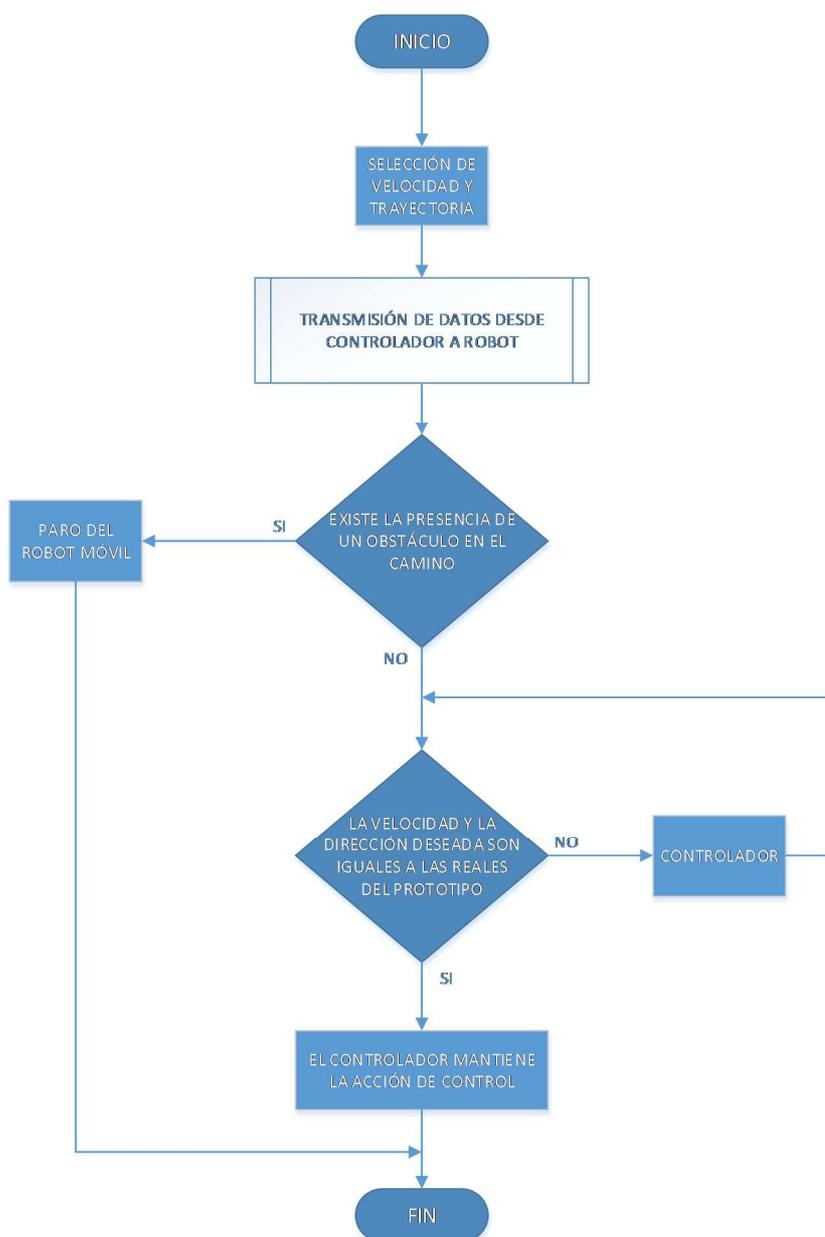


Figura 54 Diagrama de Flujo de la Lógica de Control

3.5.2 Sistema de Alimentación

La electrónica que interviene en el prototipo, se puede dividir en dos bloques. El primer bloque reservado para el control, donde se tomará en cuenta la alimentación tanto de la tarjeta electrónica para la adquisición de datos, la instrumentación del prototipo y las placas electrónicas auxiliares, por ello se utiliza una batería para el bloque de control. Y una segunda etapa, que está conformada solo por los actuadores (Motor de tracción y dirección), debido a que tienen un alto consumo energético se propone trabajar con dos baterías, una para cada motor (Tabla 37). En función del requerimiento energético que genere cada una de las etapas, se podrá decidir cuantas celdas debe tener cada batería y la capacidad de la misma.

Tabla 37 Baterías de Alimentación del prototipo

Sistema de Alimentación	
Batería 1	Bloque de Control
Batería 2	Motor de Tracción
Batería 3	Servomotor de Dirección

Estas baterías deben estar diseñadas especialmente para dispositivos electrónicos que operan bajo radio control, al igual que deben poseer las siguientes características:

- Altas prestaciones de capacidad eléctrica (alta autonomía)
- Voltajes variados
- Volumen pequeño, y bajo peso.

3.5.3 Interfaz HMI (Human Machine Interface)

Para la selección del tipo de funcionamiento del robot móvil se realiza tres interfaces HMI, dando al usuario un ambiente amigable para su operación. Las principales características que deben tener cada una de las interfaces gráficas, dependen del funcionamiento que deben tener dentro de la programación, es por eso que las interfaces gráficas deben estar entrelazadas entre sí tal como se propone en la Figura 55.

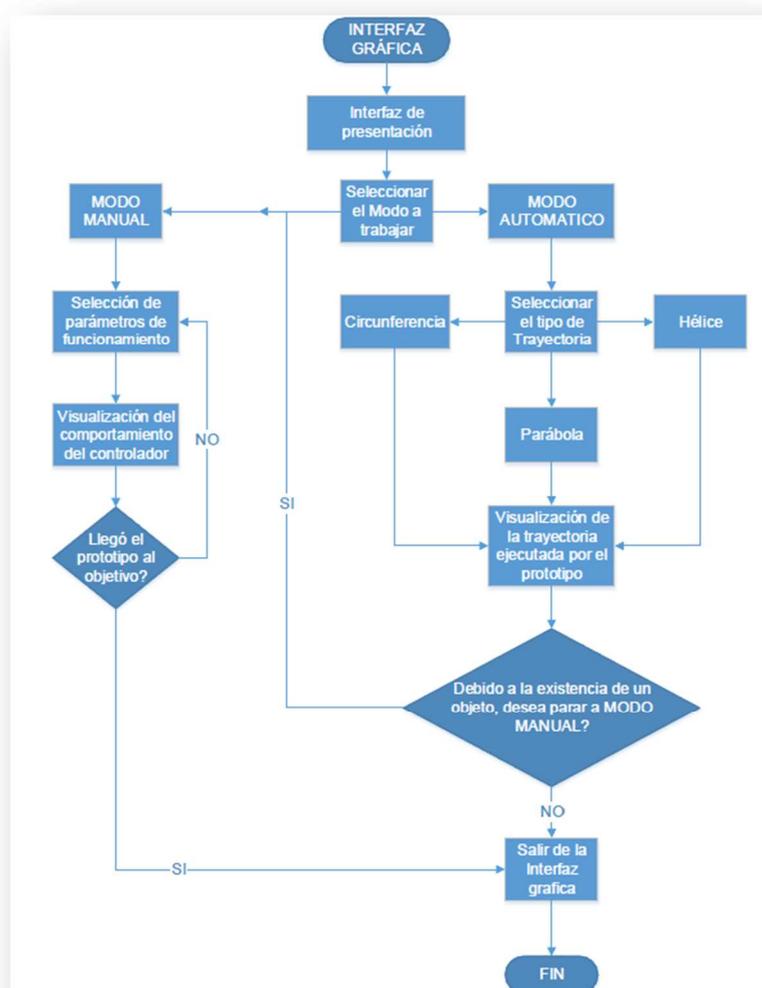


Figura 55 Diagrama de flujo del funcionamiento de Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica de la Pantalla Principal debe presentar las siguientes características (Tabla 38):

Tabla 38 Características de la Interfaz gráfica de la Pantalla Principal

Interfaz	Características
Pantalla principal	Información acerca del proyecto y autores
	Ventana de acceso a las interfaces de Modo Manual y Automático
	Botones de ayuda e Información
	Botón de salida de interfaz gráfica
	Imágenes alusivas al proyecto

La Tabla 39 muestra las características básicas de la interfaz gráfica del Modo Manual.

Tabla 39 Características de la Interfaz gráfica del Modo Manual

Interfaz	Características
Modo Manual	Información acerca del proyecto
	Botón de inicio de la comunicación serial con la tarjeta de Adquisición de Datos
	Panel de botones para el movimiento y dirección del prototipo
	Slider para manipulación de velocidad de prototipo
	Imágenes de funcionamiento del controlador de velocidad
	Visualizadores de magnitudes alusivas al controlador: setpoint, error, respuesta.
	Visualizador del tipo de movimiento que describe el prototipo (adelante, atrás, paro)
	Botón de emergencia para detener el prototipo

La Tabla 40 muestra las características básicas de la interfaz gráfica del Modo Automático.

Tabla 40 Características de la Interfaz gráfica del Modo Automático

Interfaz	Características
Modo Automático	Información acerca del proyecto
	Botón de inicio de la comunicación serial con la tarjeta de Adquisición de Datos
	Ventana para seleccionar el tipo de trayectoria
	Slider para manipulación de velocidad de prototipo
	Visualización en tiempo real del tipo de trayectoria que realiza el prototipo
	Visualización de magnitudes importantes tales como la posición en X e Y, inclinación de la superficie y ángulo de giro.
	Ventana informativas de presencia de obstáculos en la trayectoria

Adicional a las tres interfaces gráficas, se presenta un HMI para la Adquisición de Datos, la misma que deberá adquirir y guardar los datos obtenidos del Robot Móvil. A partir de dichos datos se podrá obtener la planta del sistema.

3.6 Diseño Electrónico y Detalle del Control

3.6.1 Selección del Hardware

3.6.1.1 Selección del Controlador

Establecidas las características que debe tener el controlador del subcapítulo 3.5.1.5 se tiene que es necesario utilizar un placa electrónica con alta prestaciones, por lo cual, la tarjeta electrónica ARDUINO MEGA 2560 (Figura 56) es la más conveniente para ser implementada en el prototipo debido a sus características.

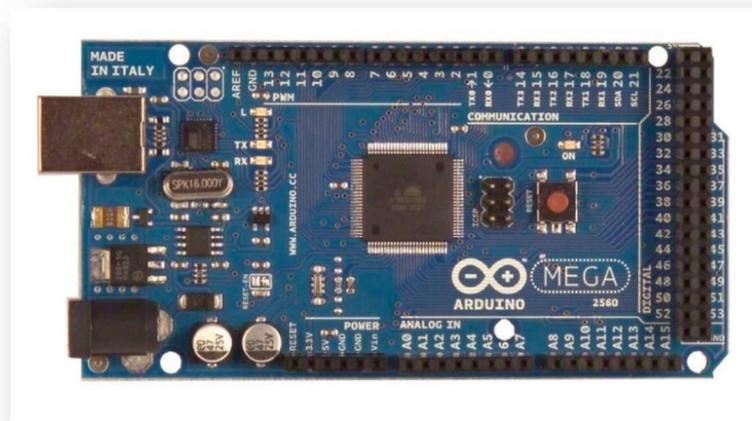


Figura 56 Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560, es una placa electrónica diseñada con un microprocesador Atmega 2560 (Anexo B), cuyas características (Tabla 41) lo convierten en una excelente solución para el prototipo, debido a la

simplicidad con la que se puede trabajar en el momento de la programación, y sobre todo a la compatibilidad de gran parte de los sensores con Arduino.

Tabla 41 Características sobre salientes Arduino Mega 2560

Características	
Microcontrolador	Atmega 2560
Pines digitales I/O	54
Disponibles como PWM	14
Entradas analógicas	16
Puertos de comunicación	4 UARTs (puerto serie)
Cristal de oscilación	16 MHz
Alimentación	USB 5v – entrada adicional soporta entre 7v a 12v

3.6.1.2 Selección de Instrumentación

- **Distancia de Obstáculos**

De la Tabla 26 se establece que los sensores para detectar los obstáculos son ultrasónicos, por lo que se propone utilizar sensores modelo HC-SR04 (Figura 57). Las especificaciones se muestran en el Anexo D - Datasheet del Sensor Ultrasónico HC-SR04.

Funcionamiento: Este sensor de presencia permite conocer si existe un objeto en frente del mismo, en una distancia de 2 [cm] a 400 [cm] aproximadamente. Consiste en un transmisor – receptor con su respectivo circuito de control, el funcionamiento radica en que el transmisor envía una señal, la cual si existe un objeto en el trayecto de esta señal, la misma rebota y el receptor sensor el eco de esta señal, la distancia que existe entre el sensor y el obstáculo se puede calcular a partir del tiempo que transcurre entre el viaje de la señal desde el objeto al receptor como se muestra en la Figura 58.



Figura 57 Sensor Ultrasónico HC-SR04

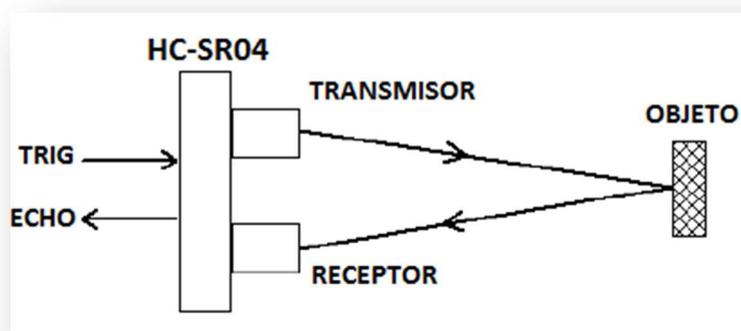


Figura 58 Funcionamiento Sensor Ultrasónico HC-SR04

La utilización de este sensor es necesario que por el pin denominado TRIG ingrese una señal de requerimiento, la cual corresponde a un tren de pulso que se encuentra en un rango de 2.4 [V] para nivel alto y 0.8 [V] para nivel bajo. Finalmente, el sensor responde por el pin ECHO, con un ancho de pulso, el cual se utiliza para calcular la distancia a la cual se encuentra un objeto con la siguiente ecuación (fórmula que corresponde al datasheet del sensor):

$$Distancia = \frac{Ancho\ de\ pulso * Velocidad\ del\ sonido}{2}$$

- **Inclinación de Superficie**

Del Diseño Básico se ha determinado trabajar con un acelerómetro, por lo que se propone utilizar un acelerómetro del tipo MMA7361L como un inclinómetro analógico, el mismo que posee dos modos de funcionamiento dependiendo de la precisión que se desea para su operación (Figura 59).

Funcionamiento: El sensor MMA736L posee tres pines denominados "X", "Y" y "Z". Estos pines mantienen un voltaje relativo a la fuerza de gravedad a la que está sometido el circuito integrado, por lo que permite medir aceleración en los 3 ejes, detectar caída libre y mediante cálculos trigonométricos determinar la inclinación de la placa con respecto al suelo.

Funcionamiento como inclinómetro: A medida que el módulo se inclina cada eje entregará una tensión proporcional a la componente de la gravedad que mide, por lo que se puede emplear perfectamente como inclinómetro aplicando una fórmula trigonométrica a la medición de cada eje, lo que nos permitirá conocer en que ángulo con respecto al suelo se encuentra el módulo en los tres ejes.

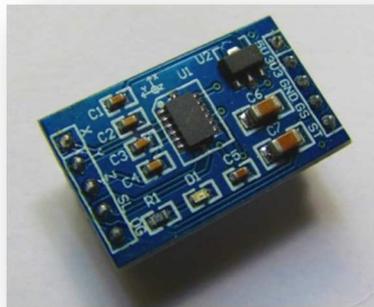


Figura 59 Acelerómetro MMA7361L

Las características técnicas físicas como eléctricas de este sensor se pueden apreciar en datasheet del mismo (Anexo E).

- **Velocidad Lineal**

De la Tabla 32 se establece que el sensor para medir la velocidad del prototipo es un encoder óptico, por lo que se propone utilizar un encoder modelo Wheel Encoder DFRobot 3PA (Figura 60).

Funcionamiento: A más del encoder se necesita un disco con perforaciones equidistantes entre sí para la lectura de la velocidad, donde el número de perforaciones será la resolución con que trabaje el sensor. Para la estimación de la velocidad este sensor utiliza barreras infrarrojas para genera señales digitales cuando se entre corta al pasar por una de las perforaciones (Figura 61).



Figura 60 Wheel Encoder DFRobot 3PA

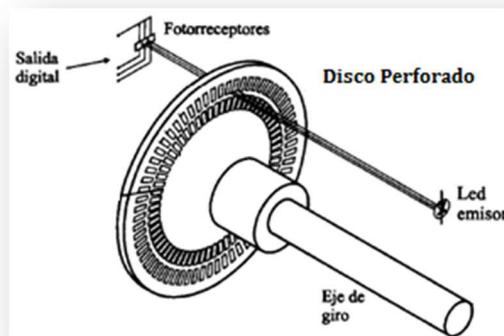


Figura 61 Funcionamiento de un Encoder

Como se puede apreciar en la Figura 61, cada vez que el disco impide el paso de luz entre el led emisor y el fotorreceptor se genera la señal, con

la cual es simple en ese momentos poder conocer cuál ha sido el número de vueltas que ha dado el eje en el cual el disco esta sujetado; y adicionalmente, sabiendo todas las relaciones que están inmersas en el vehículo, sean de transmisión y geométricas, estimar las posiciones se convierte en una tarea matemática.

A más de eso, es necesario tomar en cuenta que en el momento en el que se conoce cuantas vueltas ha girado el disco, y conociendo cuanto tiempo ha transcurrido, también se puede estimar la velocidad a la cual se está moviendo en uno de los ejes el robot.

- **Posición Angular**

Del Diseño Básico se establece que el sensor ideal para medir la posición angular de giro de las ruedas es un potenciómetro rotatorio, por lo que se utiliza un potenciómetro de $5K\Omega$ logarítmico, de los que se encuentra con facilidad en el mercado (Figura 62).



Figura 62 Potenciómetro Rotatorio

Funcionamiento: Para la medición de la posición angular con este potenciómetro rotatorio se debe trabajar mediante una configuración de divisor de voltaje, ya que se necesita conocer la variación de voltaje para predecir la posición del mecanismo de dirección. Para ello la conexión del sensor es directa a 5V y tierra (GND), puenteadas el pin variable para obtener variaciones en el voltaje mientras se gira el mecanismo.

3.6.1.3 Selección de los Circuitos de Control para los Actuadores

El prototipo presenta dos actuadores, el servomotor modelo Torxis para la dirección y el motor DC para la tracción del robot.

- **Servomotor.-** No requiere un controlador que sea necesario implementar, debido a que posee su controlador integrado. A través del Arduino se puede controlar el mismo mediante una salida de PWM incluida en el Arduino.
- **Motor DC.-** Para trabajar con el actuador, se utiliza un Motor Driver de marca Pololu modelo VNH5019 para un solo motor (Figura 63), disponible en el mercado nacional.

El Motor Driver posee un integrado VNH5019 e incorpora un Puente H que puede ser utilizado de forma bidireccional entregando un control de alta velocidad para el manejo del motor DC, con elementos SMD, lo que lo convierte en un componente de tamaño pequeño.



Figura 63 Motor Driver Pololu

Las características del controlador se pueden observar en la Tabla 42.

Tabla 42 Características de Motor Driver Pololu

	Características
Voltaje de Operación	5.5VDC a 24VDC
Corriente de Salida	12 [A] continuos, picos de 30 [A]
Voltaje de operación de las entradas	5[V] (Compatible con 3[V])
Operación del PWM	20 [kHz]
Led Indicadores	Indicadores del estado de las salidas del driver
Protección	Voltajes inversos Soporte de voltaje de entrada hasta 41[V] Apagado para sobre voltaje y bajo voltaje Protección de corto a VCC

- **Condiciones de uso del Motor Driver**

Las conexiones del Motor driver, deben estar diferenciadas entre la conexión de los pines de potencia y los pines lógicos, los pines de potencia soportan una tensión entre 5.5 [V] a 24 [V], mientras que los pines lógicos requieren una tensión de 2.5 [V] a 5 [V].

La facilidad de conexión que posee el dispositivo para trabajar con Arduino (Figura 64), lo convierten en el indicado para trabajar en el prototipo.

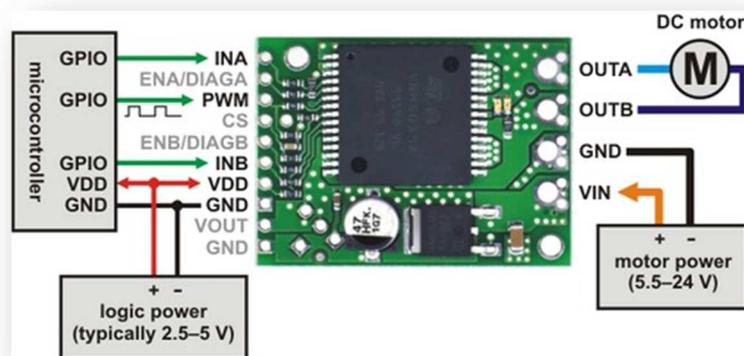


Figura 64 Conexión del Motor Driver con un Microcontrolador

Al trabajar el Motor Driver en esta configuración, depende de la activación de INA o INB para que el motor gire en un sentido o en otro, y requiere únicamente el envío de un valor de PWM desde el Arduino para el control del motor.

3.6.2 Diseño de Alimentación

Dado las características y especificaciones que debe tener el sistema de alimentación (Subcapítulo 3.5.2) se ha establecido utilizar baterías de LiPo (Polímero de Litio) como se muestra en la Figura 65. Estas baterías de última generación, están diseñadas especialmente para dispositivos electrónicos que operan bajo radio control.



Figura 65 Batería de LiPo

Dado que se ha dividido el sistema de alimentación del prototipo en 3 baterías (Tabla 37) se calcula la capacidad de cada una de ellas de la siguiente manera:

- **Cálculo de la batería de control**

La batería que se destina al control, debe cubrir el requerimiento de toda la instrumentación, la tarjeta electrónica Arduino y el driver del motor DC,

por lo que el consumo de energía vendría dado de la siguiente manera (Tabla 43):

Tabla 43 Consumo de energía para batería de control

Descripción	Consumo
I_{arduino}	500 mA
$I_{\text{instrumentación}}$	60 mA
I_{varios}	1000 mA

Dentro de la corriente denominada varios, se toma en cuenta el consumo del encoder, potenciómetro, placa de relés, placa de regulador de voltaje y placa de motor DC.

Se ha establecido una autonomía de una hora, y se sabe que el valor total de la corriente que se consume en esta etapa es de:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{control}} + I_{\text{instrumentación}} + I_{\text{varios}}$$

$$I_{\text{total}} = 1560 \text{ [mA]}$$

Como factor de seguridad, se aumenta un 25% de consumo de corriente, por lo tanto el consumo final es:

$$I_{\text{consumo_control}} = 1.25 * I_{\text{total}} = 1950 \text{ [mA]}$$

La capacidad que debe tener la batería viene dado de la siguiente manera:

$$Ab = \frac{\textit{capacidad de la bateria}}{\textit{consumo esperado}}$$

Despejando, tenemos:

$$\textit{capacidad de la bateria} = \textit{consumo esperado} * Ab$$

$$\textit{capacidad de la bateria} = 1950 [mA] * 1[h] = 1950 [mAh]$$

Para seleccionar el voltaje que debe tener la batería de control, se toma en cuenta que la alimentación del Arduino debe estar entre 7 [V] a 12 [V], por lo que se opta por una batería de LiPo de 3 celdas (3s) con una capacidad de 2500 [mAh], garantizando así la autonomía de 1 hora.

Para la etapa de potencia, se selecciona una batería para cada actuador, es decir, una para el motor DC y una para el Servomotor.

- **Selección Batería del Servomotor**

Para este caso, se consideran dos aspectos, el voltaje que requiere el servomotor, y el consumo del mismo. La alimentación requerida es de 12 [V], por lo que una batería de LiPo de 3 celdas será válida en este caso,

sabiendo que el consumo pico del servo es de 2.5 [A] y una autonomía idéntica a la anterior de 1 hora se calcula el consumo para esta batería.

$$Ab = \frac{\textit{capacidad de la bateria}}{\textit{consumo esperado}}$$

$$\textit{capacidad de la bateria} = 2.5 [A] * 1 [h] = 2.5[Ah]$$

Al igual que en la etapa de control, será válido utilizar una batería de 3 celdas con una capacidad de 2500 [mAh].

- **Selección Batería del Motor DC**

Los aspectos a considerar para el motor DC son los siguientes, el consumo de corriente es de 3 [A], y la tensión de trabajo es de 24 [V]. Con estas características, se incluye una etapa extra en la alimentación del motor, el uso de un Conversor DC–DC elevador regulable (Pág. 116).

Por el uso del conversor, ya es posible utilizar una batería de LiPo de 4 celdas, para alimentar el mismo y a su salida conectar el Motor DC. La capacidad de la batería se calcula a partir de su consumo de 3 [A], considerando la autonomía de 1 hora:

$$Ab = \frac{\text{capacidad de la bateria}}{\text{consumo esperado}}$$

$$\text{capacidad de la bateria} = 3 [A] * 1 [h] = 3[Ah]$$

Debido a que en el mercado no existe una batería de LiPo con esta capacidad, se utilizan dos baterías de 4 celdas, cada una con capacidad de 2500 [mAh], conectadas en paralelo, para mantener el voltaje fijo pero con una capacidad de 5000 [mAh].

- **Etapa de potencia – Motor DC**

Sabiendo, que en el mercado nacional no fue posible encontrar una batería de LiPo de más de 4 celdas, es necesario el uso de un conversor elevador. Por tal razón se trabaja con un conversor DC – DC elevador marca OSKJ (Figura 66).

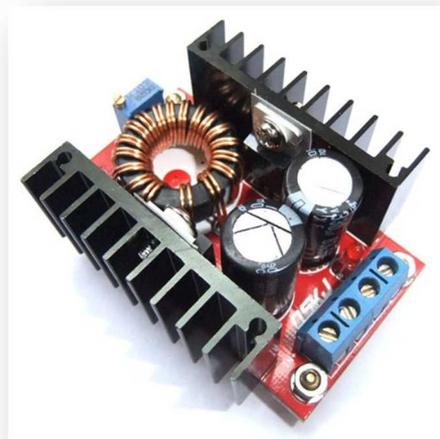


Figura 66 Conversor DC – DC

Las características del convertidor son las siguientes (Tabla 44).

Tabla 44 Características Convertidor DC – DC

Características	
Voltaje de entrada	10 – 32 VDC
Voltaje de Salida	35 – 60 VDC (ajustables)
Corriente de Salida	5A (Máximo)
Corriente de Entrada	16A (Máximo)
Potencia de Salida	80W sin disipación, 120W con disipación
Coefficiente de eficiencia	90%
Rizado a la salida	2% (Máximo)
Temperatura de funcionamiento	Zona industrial: -40°C a +85°C
Aumento de temperatura a carga plena	45°C
Corriente sin carga	25mA típico
Regulación de la carga	±0.5%
Regulación de voltaje	±0.5%
Velocidad de la reacción dinámica	5% a 200uS
Protección a cortocircuitos	Requiere instalación de fusibles

Al verificar las características del convertidor, se puede ver que es factible utilizarlo con el Motor DC, el cual tiene un consumo pico de 3A.

Adicionalmente, para evitar el consumo de las baterías asociadas al Motor DC y al Servomotor mientras el prototipo se encuentra sin utilizarse, se asocia dos pines de activación de la alimentación desde el microcontrolador hacia una placa de relés (Figura 67), y así controlar que

únicamente en el momento en que se inicializa el microcontrolador, se pueda activar los actuadores.

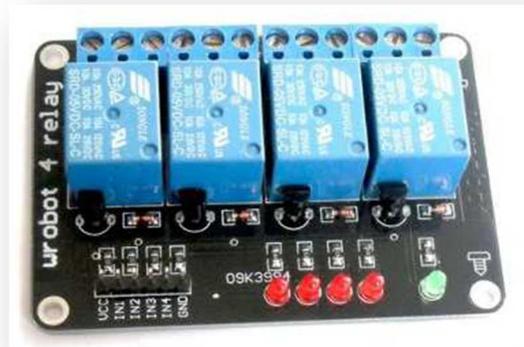


Figura 67 Placa de Relés

3.6.3 Diseño del Sistema de Comunicación

La base de la utilización de un sistema de comunicación inalámbrica, es debido a que se desea que exista una comunicación directa entre el computador portátil asociado al prototipo y toda la electrónica que maneja. Para ello, es necesario crear un “cable virtual”.

Debido, a que se utiliza una gran cantidad de elementos compatibles con Arduino, de igual manera, es posible utilizar módulos XBee, dispositivos que integran un transmisor – receptor de ZigBee y un procesador en su módulo, lo que ayuda a que la implementación sea totalmente rápida y eficiente (Figura 68).

Entre las características principales tenemos:

- Alcance hasta de 100 metros en línea vista para módulos Xbee Serie 1 (utilizados en el prototipo).
- Bajo consumo de corriente (<50mA en funcionamiento, <10uA en modo sleep)
- Interfaz serial
- 65000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponible. Se pueden tener mucho de estos dispositivos en una misma red.
- Económicos y de fácil integración



Figura 68 Módulos de RF Xbee

Las características técnicas del módulo de RF Xbee se presentan en el Anexo L

- **Integración de componentes**

Cada uno de los módulos, tanto el que va integrado al prototipo como el que deberá estar conectado al computador, se deberá configurar a partir

del software X-CTU (propio de DIGI) (Figura 69), para que sea una comunicación full duplex.



Figura 69 Software X-CTU

Al tener correctamente configurados los mismos, basta con integrarlos en el sistema. A partir de uso de la placa XBee Shield se puede conectar sobre el Arduino Mega uno de los módulos XBee (Figura 70).



Figura 70 Módulo Xbee montado en el Arduino

Para crear el cable virtual que se requiere a partir de la utilización de módulos XBee, es necesario conectar la placa XBee Shield sobre el Arduino y sobre el mismo uno de los módulos. Así mismo, para la

comunicación con el computador, se deberá integrar un módulo XBee Explorer USB (Figura 74), sobre el cual se coloca el otro módulo XBee.



Figura 71 Módulo Xbee (computador)

3.6.4 Diseño de las Placas Electrónica (PCB)

Después de haber seleccionado correctamente cuál es la instrumentación que requiere el prototipo y las baterías que requiere cada una de las etapas. Es importante recalcar que no todos los elementos electrónicos inmersos existen en el mercado. Tanto el regulador a 5V ha sido diseñado y manufacturado, para satisfacer las necesidades de tensión de los elementos de instrumentación; así como también el acondicionamiento del acelerómetro.

- **Regulador a 5V**

Debido a que existen elementos que funcionan a 5VDC, es necesario diseñar una etapa electrónica de alimentación intermedia, con un regulador

LM7805, para alimentar los sensores que trabajen a ese nivel de tensión. En la Figura 72 se aprecia el diseño de la placa mediante software, y en la Figura 73 se observa la placa modelada en 3D.

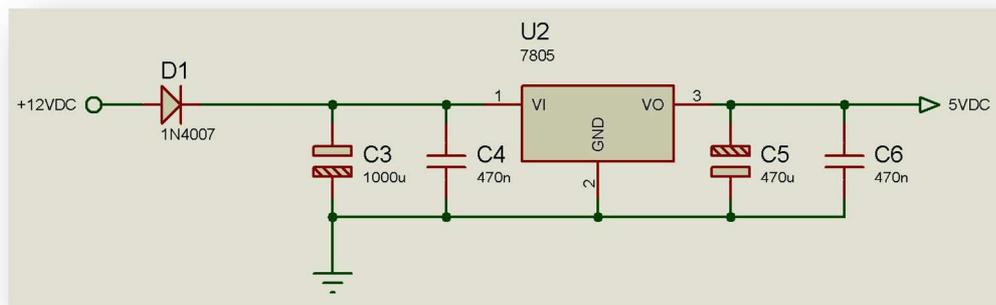


Figura 72 Diseño de regulador de 5VDC

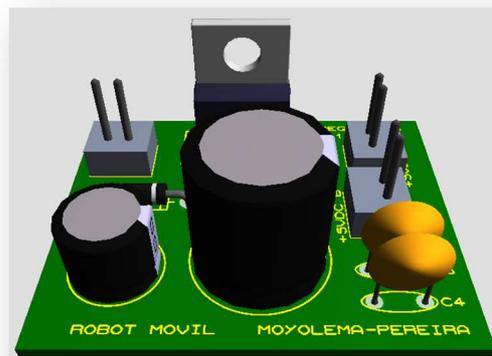


Figura 73 Diseño en 3D del Regulador de 5VDC

- **Acondicionamiento de acelerómetro MMA7361L**

De manera similar al caso del regulador de voltaje, se diseña el acondicionamiento para el acelerómetro MMA7361L, en la Figura 74 y Figura 75 se observa el diseño de la placa de acondicionamiento y su modelado en 3D.

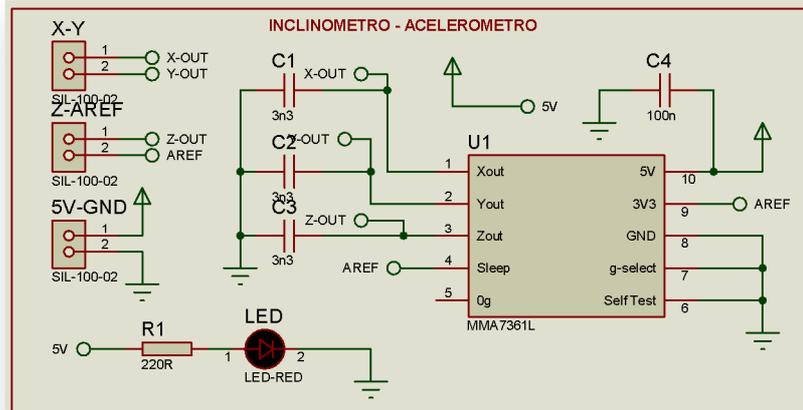


Figura 74 Diseño del Acondicionamiento del Acelerómetro MMA7361L

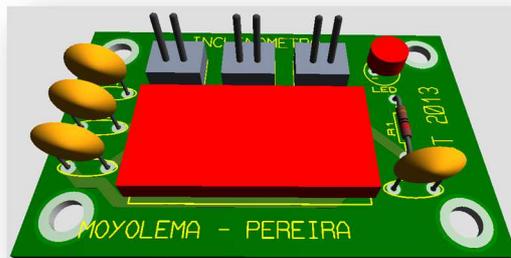


Figura 75 Diseño en 3D del Acondicionamiento del Acelerómetro

3.6.5 Esquemas Eléctricos

Los esquemas eléctricos del prototipo de robot móvil se dividen en dos tipos, esquemas explicativos donde se pueden visualizar la funcionalidad de todo el sistema eléctrico (Diagramas de Control y Potencia); y esquemas de realización donde se observa las conexiones por bloques y el alambrado completo de todo el prototipo (Esquema de Interconexión y Alambrado).

3.6.5.1 Diagrama de Control y Potencia

(Ver Lámina 1 – Diagramas Eléctricos)

3.6.5.2 Esquema de Interconexión

(Ver Lámina 2 – Diagramas Eléctricos)

3.6.5.3 Esquema de Alambrado

(Ver Lámina 3 – Diagramas Eléctricos)

REEMPLAZAR POR PLANO ELÉCTRICO (1)

REEMPLAZAR POR PLANO ELÉCTRICO (2)

REEMPLAZAR POR PLANO ELÉCTRICO (3)

3.6.6 Software de Control y Monitoreo

Para realizar la adquisición de datos del sistema, el control del prototipo y su monitoreo se ha seleccionado la programación en el Software de Matlab® (Figura 76) mediante interfaces gráficas. Las ventajas que se tienen al utilizar este paquete informático en el entorno gráfico son las siguientes:

- Monitoreo en tiempo real del comportamiento de los actuadores (motor de tracción y servomotor).
- Facilidad en la manipulación de los datos tanto de entrada como de salida (ancho de pulso, I/O digitales)
- Generación de históricos de los datos, los mismos que se pueden exportar sea en Excel o directamente al Comand Pront de Matlab®, para poder utilizarlos en la identificación de la planta del sistema.

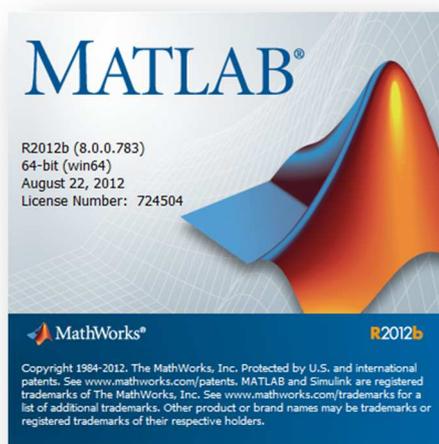


Figura 76 Software Matlab

3.6.7 Diseño del controlador para el trazado de trayectorias en odometría

Están definidas tres trayectorias planificadas: Circunferencia, Parábola y Hélice. La programación en *Matlab*®, para cada una de las trayectorias que debe realizar el prototipo, están basadas en una programación por puntos; cada vez que el robot alcance una posición deseada, el programa envía la siguiente orden para alcanzar el siguiente punto. Hasta finalmente, poder cumplir la trayectoria deseada.

Cada una de las trayectorias está diseñada al seguir los pasos en los siguientes diagramas de flujo.

- Circunferencia (Figura 77)
- Parábola (Figura 78)
- Hélice (Figura 79)

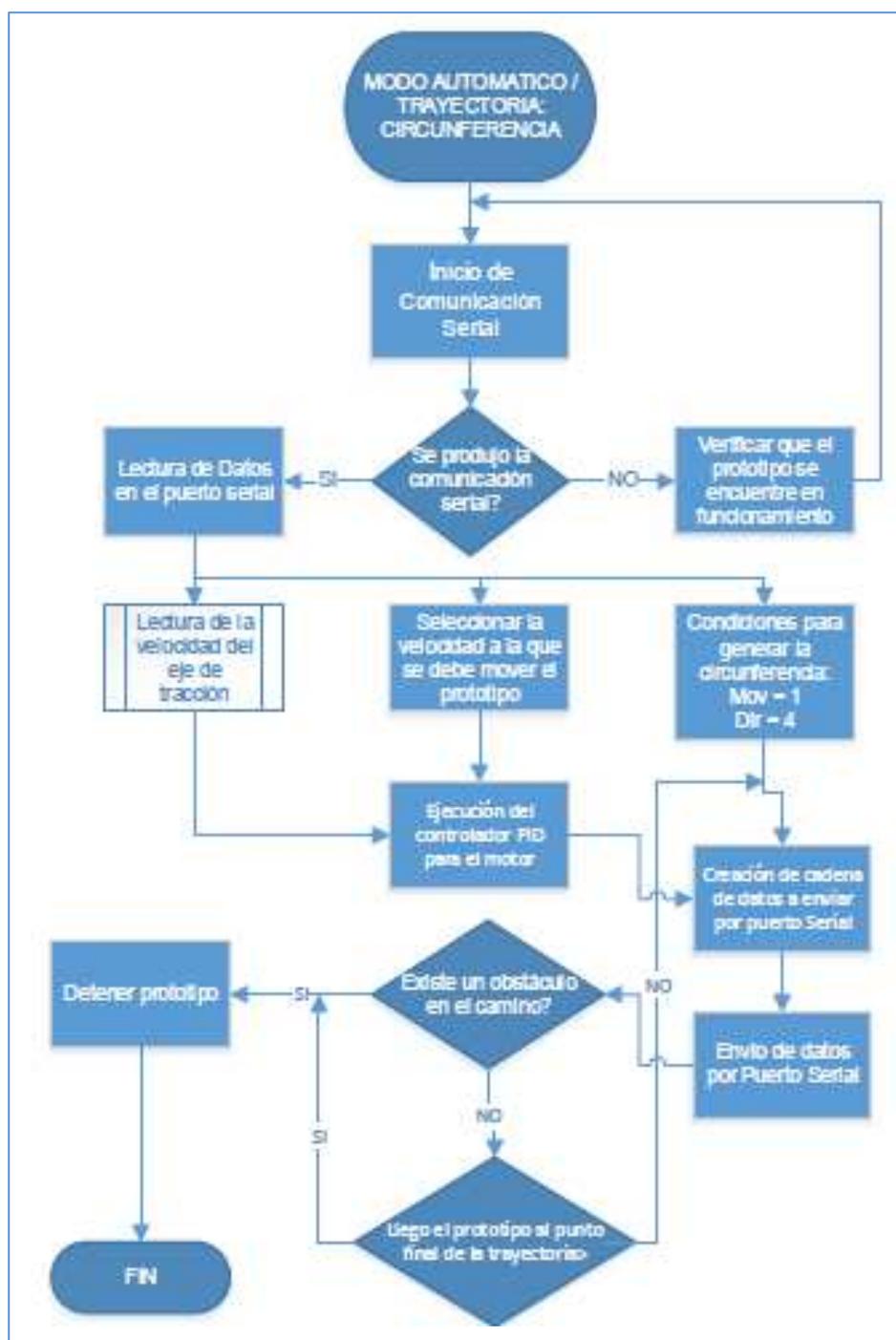


Figura 77 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo circunferencia

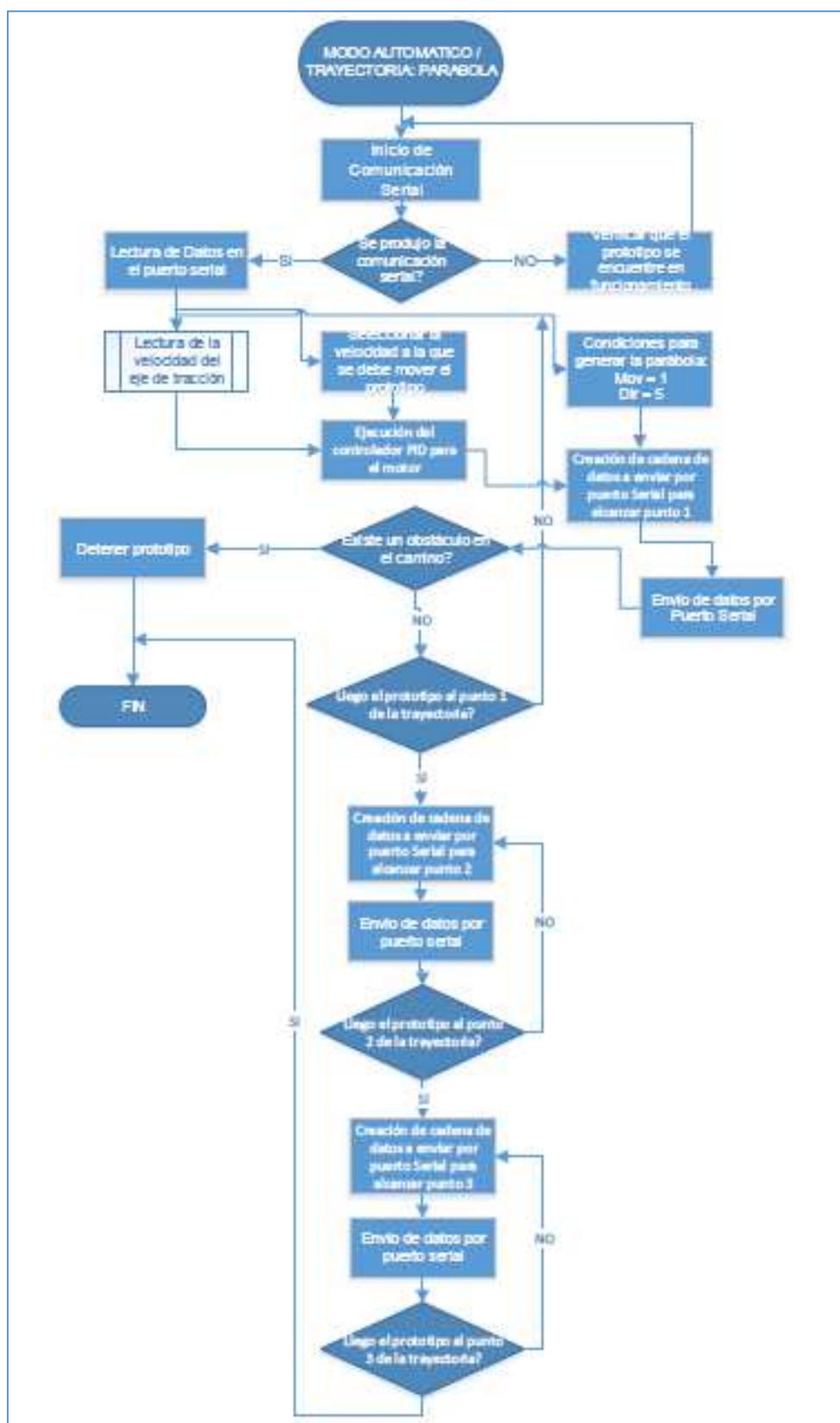


Figura 78 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo parábola

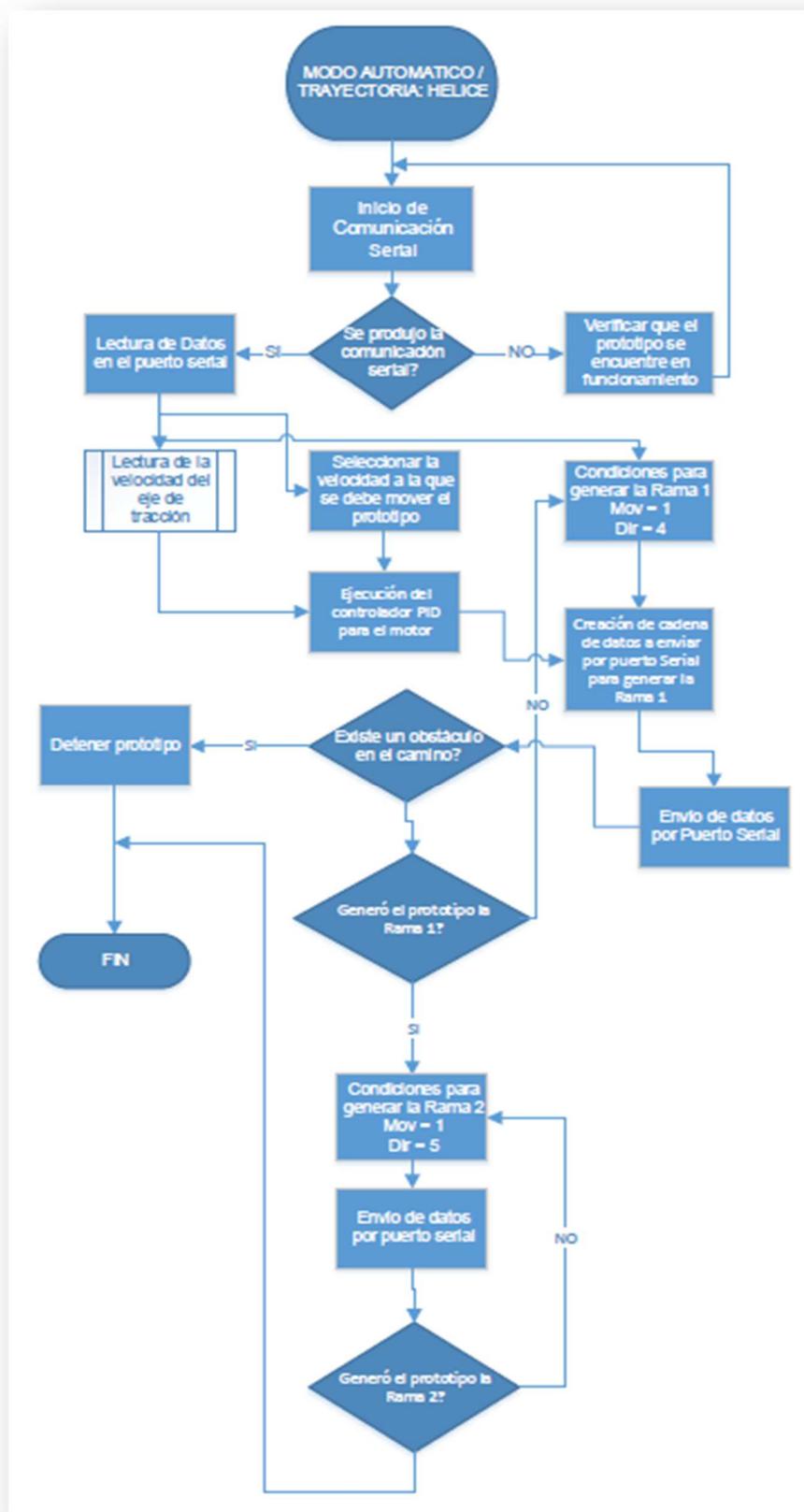


Figura 79 Diagrama de Flujo para trayectoria tipo Hélice

3.6.8 Programación del Sistema de Adquisición de Datos (Arduino)

El programa de Arduino, es uno de los elementos de software más importantes que tiene el prototipo. El dispositivo, es el encargado de permitir la comunicación en tiempo real entre el computador y el prototipo, es por esta razón que el programa de Arduino debe ser único, tanto para el modo manual como para el modo automático. La lógica de programación se observa en el diagrama de flujo (Figura 80).

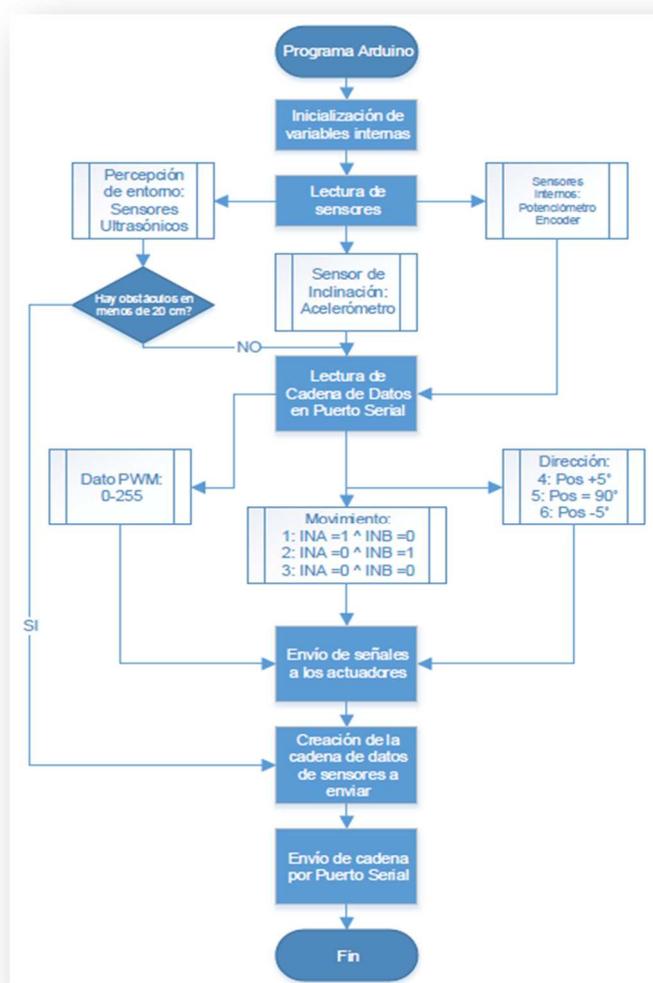


Figura 80 Diagrama de Flujo programa Arduino

La distribución de pines del Arduino Mega utilizado, se puede ver en la Tabla 45.

Tabla 45 Distribución de pines del Arduino

	Pines	Tipo	Descripción
Pines Digitales	2	Entrada	Señal del Encoder, asociado a una interrupción externa
	3	Salida	Señal de activación del relé asociado a la alimentación de Motor DC
	4	Entrada	Señal de Echo de ultrasónico 1
	5	Entrada	Señal de Echo de ultrasónico 2
	6	Entrada	Señal de Echo de ultrasónico 3
	7	Entrada	Señal de Echo de ultrasónico 4
	8	Salida	Señal de PWM para el Motor Driver
	9	Salida	Señal de activación del relé asociado a la alimentación de Servo
	10	Salida	Señal de Trig para los sensores ultrasónicos
	11	Salida	Señal de PWM para movimiento de Servo
	24	Salida	Señal de activación para motor driver INA
	26	Salida	Señal de activación para motor driver INB
Pines Analógicos	0	Entrada	Señal analógica de entrada, proveniente del acelerómetro, eje X
	1	Entrada	Señal analógica de entrada, proveniente del acelerómetro, eje X
	2	Entrada	Señal analógica de entrada, proveniente del acelerómetro, eje X
	3	Entrada	Señal analógica de entrada, proveniente del potenciómetro acoplado al mecanismo de dirección

3.6.9 Diseño de la Interfaz HMI

Establecidas las características que deben tener cada una de las interfaces gráficas para el control y monitoreo del Robot Móvil se diseña cada una de ellas de la siguiente manera:

- **Pantalla Principal** (Figura 81)



Figura 81 Interfaz Gráfica de Pantalla principal

Con la interfaz diseñada se detalla el funcionamiento de cada uno de los botones y visualizadores que compone la interfaz (Tabla 46).

Tabla 46 Elementos de la Pantalla Principal de la Interfaz Gráfica

Botón / Ventana	Características / Funcionalidad
	Información del Proyecto
<p>Robot</p> <p style="text-align: center;">ROMOV</p> <p>Autores</p> <p style="text-align: center;">DIEGO MOYOLEMA PATRICIO PEREIRA</p>	Nombre del prototipo y autores
<p>Modo de Funcionamiento</p> <p style="text-align: center;"> <input type="text" value="MODO AUTOMATICO"/> </p> <p style="text-align: center;"> <input type="text" value="MODO MANUAL"/> </p> <p style="text-align: center;"> <input type="text" value="MODO AUTOMATICO"/> </p>	Ventana para selección de modo
	<p style="text-align: center;">Botones</p> <p>Iniciar: Para pasar a la interfaz seleccionada</p> <p>Salir: Para salir de la Interfaz gráfica</p> <p>Ayuda: Permite visualizar el informe técnico del proyecto en formato .pdf</p>
<p>Año</p> <p style="text-align: center;">2014</p> <p>Tutores</p> <p style="text-align: center;">Ing. Milton Acosta Ing. Luis Orozco</p>	Información acerca del año de presentación y los tutores guías del proyecto
	Imagen alusiva al proyecto (prototipo sin carcasa de fibra)

- **Pantalla Modo Manual** (Figura 82)

Se presenta el funcionamiento de cada uno de los botones y visualizadores que compone la interfaz de Modo Manual (Tabla 47).

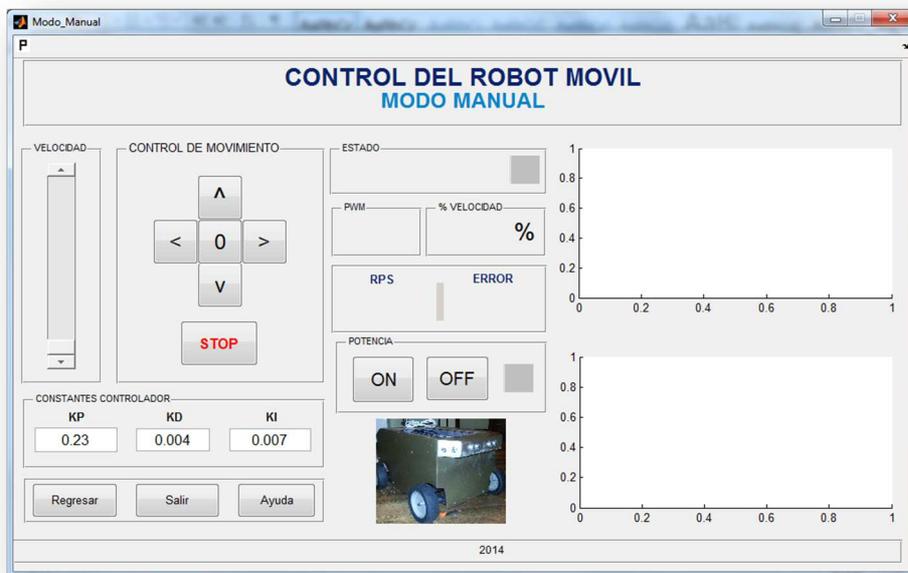
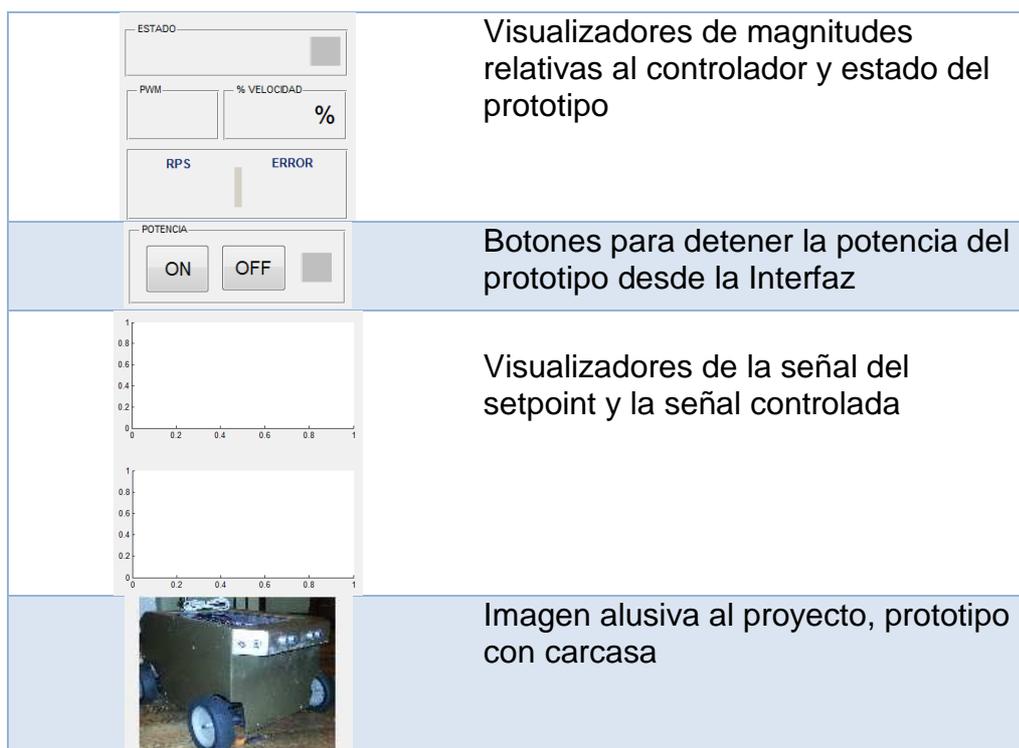


Figura 82 Interfaz Gráfica de Modo Manual

Tabla 47 Elementos del Modo Manual de la Interfaz Gráfica

Botón / Ventana	Características / Funcionalidad
	Información acerca de la Interfaz
	Botón para inicio de comunicación serial
	Slider para la velocidad del prototipo
	Botones para el control del movimiento del prototipo
	Ventanas para modificar las variables del controlador



- **Pantalla Modo Automático** (Figura 83)

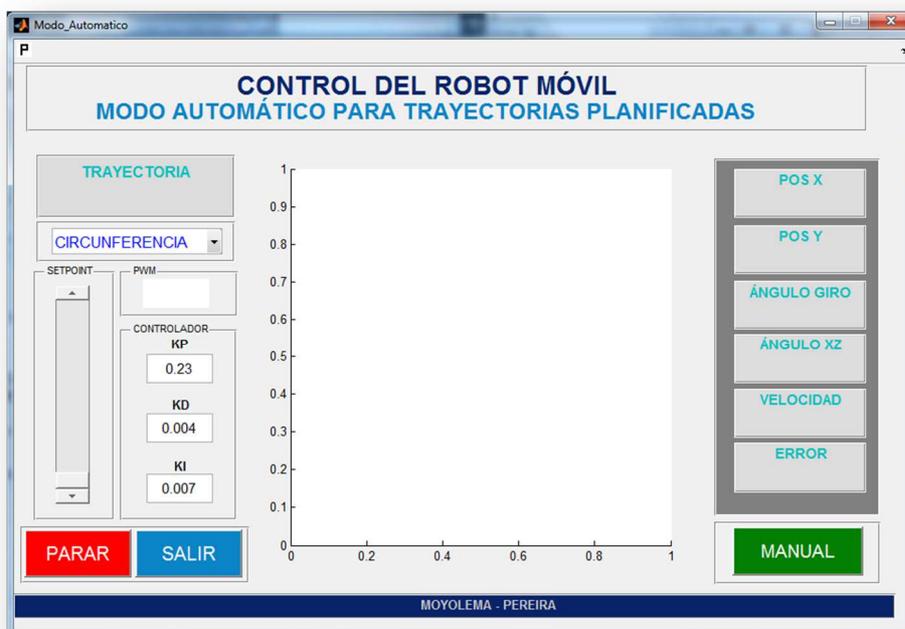
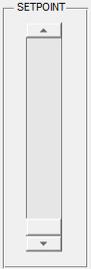
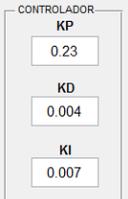
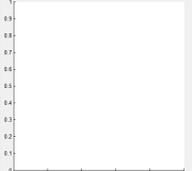


Figura 83 Interfaz Gráfica de Modo Automático

Se detalla el funcionamiento de cada uno de los botones y visualizadores que compone la interfaz de Modo Automático (Tabla 48).

Tabla 48 Elementos del Modo Automático de la Interfaz Gráfica

Botón / Ventana	Características / Funcionalidad
	Información acerca de la Interfaz
	Ventana para seleccionar el tipo de trayectoria y su visualizador
	Slider para seleccionar la velocidad del prototipo
	Visualizador del Setpoint de velocidad
	Ventanas para modificar las variables del controlador
	Visualizador de la gráfica de la trayectoria trazada por el prototipo
	Visualizadores de magnitudes físicas del prototipo
	Botones Parar: Stop de emergencia Salir: Para dejar de ejecutar la Interfaz
	Botón Manual: para pasar al modo manual

Capítulo 4.- Construcción, Montaje y Validación del Prototipo

En este capítulo, se describe el proceso completo de construcción del prototipo a partir de hojas de proceso que justifican cada uno de los pasos que se han dado para el efecto. De igual manera, a partir de los planos eléctricos se puede determinar por completo las conexiones del prototipo. También, se presenta la validación del funcionamiento del prototipo analizando y corrigiendo errores mediante pruebas pertinentes.

4.1 Proceso de Construcción de Elementos Mecánicos

Para la construcción del robot móvil, es necesario diseñar y manufacturar diferentes elementos que permitirán el óptimo funcionamiento de los sistemas mecánicos, para ello se elabora unas hojas de procesos detallando las operaciones realizadas a cada elemento partiendo desde su estado más sencillo y obteniendo al final el elemento que servirá para el ensamble del prototipo de robot móvil.

Las hojas de procesos de los diferentes elementos mecánicos manufacturados que conforman el robot móvil se encuentran en el Anexo K.

4.2 Proceso de Montaje

4.2.1 Soportes de Elementos

Para el acople de los elementos tales como los motores, baterías, placas, sensores se ha decidido por la implementación de soportes dentro de la plataforma, con el fin de mantenerlos estables y fijos (Figura 84, Figura 85 y Figura 86). Estos están unidos a dichos elementos por medio de pernos y tuercas, lo que le da la facilidad que todo el robot móvil sea desarmable.



Figura 84 Soporte para el Motor DC



Figura 85 Soportes para el Servomotor



Figura 86 Soportes para las baterías

4.2.2 Ensamble Final Mecánico

Una vez que se ha considerado todos los parámetros mecánicos se presenta el modelo final del robot móvil (Figura 87) con todos los elementos ensamblados tanto en su parte interior como en su parte superior del chasis.

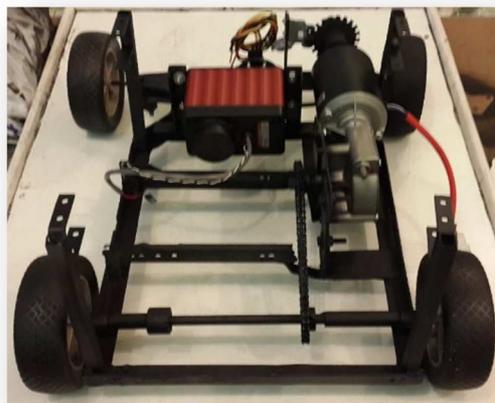


Figura 87 Ensamble Mecánico Final del Robot Móvil

Las dimensiones del robot móvil se pueden apreciar en los planos mecánicos, presentes en el Anexo A.

4.2.3 Especificaciones Mecánicas finales del prototipo

Tabla 49. Especificaciones Mecánicas del Prototipo

Características	Descripción
Dirección:	Mecanismo de Ackerman
Carga a soportar:	10 [kg]
Tracción:	Posterior
Tipo de Ruedas:	Convencionales
Diámetro de la barra de dirección:	¼" (6.35 [cm])
Material Chasis:	Hierro
Material Revestimiento:	Fibra de Vidrio
Material Soportes Placas:	Acrílico
Transmisión de Potencia:	Cadena
Longitud de la Cadena:	38 [cm]
Peso Máximo:	15.8 [kg]

4.2.4 Despiece

Dentro del ensamble del robot móvil, se detalla los elementos principales que conforman dicho ensamble, indicando su posición dentro del prototipo y su relación con otros elementos.

Aquí van Planos de Despiece

4.2.5 Construcción de Placas

Establecido el diseño de las placas electrónicas para el acondicionamiento del acelerómetro y del regulador de voltaje (12V-5V), se procede a la fabricación y perforación de las mismas (Figura 88).

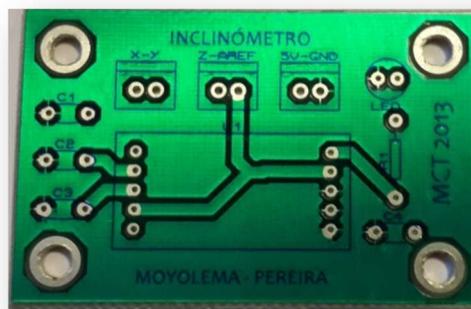


Figura 88 Placa Electrónica perforada

Una vez manufacturada las placas se procede a realizar la soldadura de los diferentes elementos electrónicos, como se observa en la Figura 89 y Figura 90.



Figura 89 Placa de Acondicionamiento soldada



Figura 90 Placa del regulador de 5V soldada

4.2.6 Integración de Sistemas

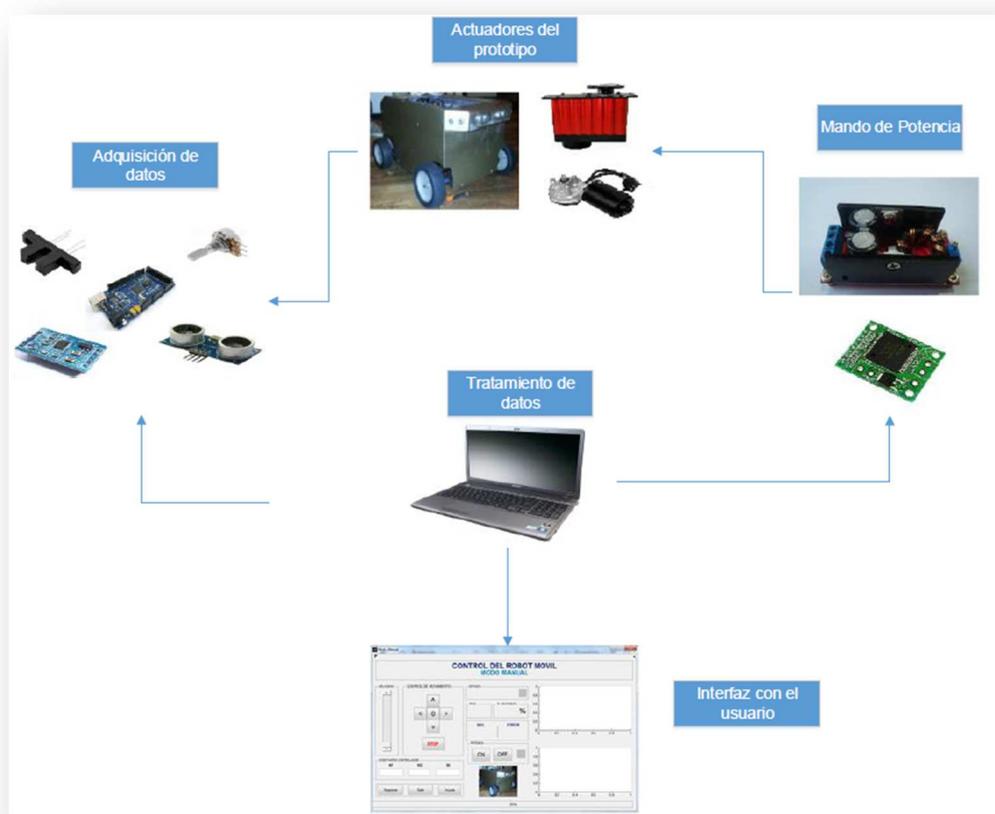


Figura 91 Diagrama de adaptación de componentes

Se define al robot móvil, como un prototipo automatizado (Figura 91), en el cual se cumplen los puntos más importantes tales como:

- Adquisición de datos
- Tratamiento de datos
- Mandos de potencia
- Actuadores
- Dialogo Humano – Máquina

Tomando en cuenta todas las características que posee el dispositivo implementado, se integra elementos electrónicos (sensores) a los motores para con ello obtener la señal tanto de velocidad como de posición de la siguiente manera:

- **Encoder:** Como se puede observar en la selección de sensores, el encoder seleccionado, comercialmente viene equipado ya con su acondicionamiento. Lo que permite acoplar directamente con la tarjeta Arduino, debido a que necesita únicamente de una alimentación de 5VDC, y el pin de señal, conectarlo a un pin de interrupción del Arduino, y mediante programación, contabilizar el número de interrupciones externas producidas por un disco perforado (Figura 92).

Para el proceso de integración de este sensor en el prototipo, se manufactura un disco de baja resolución, en este caso de resolución igual a 20, este girará a una velocidad alta (velocidad mayor a las 1000 revoluciones por minuto) debido a que se encuentra acoplado en el eje sin reducción del motor DC (Figura 92). El material del disco es de duralón, material seleccionado debido a su bajo peso y a la facilidad en su maquinabilidad (Dimensiones del mismo están localizadas en Planos Mecánicos – Anexo A).

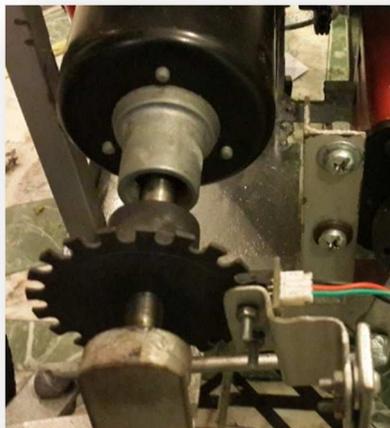


Figura 92 Encoder y Disco acoplados al Motor DC

- **Potenciómetro.-** Este sensor no requiere de acondicionamiento, ya que directamente se necesita conocer cuál es su valor de voltaje para predecir la posición del mecanismo de dirección, por lo que únicamente se debe alimentar con 5VDC y conectar a uno de los pines de entrada analógicas.

Al igual que el encoder este sensor también está acoplado a uno de los actuadores, el servomotor de la dirección, donde una variación de ángulo incide en una variación de voltaje (Figura 93).

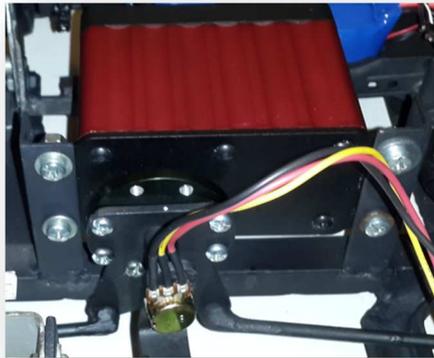


Figura 93 Potenciómetro acoplado al Servomotor

Sensores Ultrasónicos: Cada sensor ultrasónico requiere de una señal PWM y un puerto digital de entrada al microcontrolador para el pin ECHO, por lo que se requieren cuatro pines digitales, para registrar la respuesta de cada sensor, la ventaja está en que con una sola señal de PWM se puede disparar los cuatro sensores. Igual que en el caso del encoder, cada sensor ya posee su acondicionamiento, por lo que es necesario únicamente conectar los pines de alimentación de cada sensor, y los pines de disparo y de Echo directo al Arduino.

El funcionamiento de los sensores ultrasónicos dentro del prototipo está limitado por una distancia de: [4 cm – 350 cm].

La integración de estos sensores serán en una configuración lineal en la parte frontal del Robot Móvil, para ello se los coloca dentro de la carcasa del mismo (Figura 94).



Figura 94 Conexión de Sensores Ultrasonicos en el prototipo

4.2.6.1 Conectores y Protección del Cableado

Dado que las partes del Robot Móvil es desmontable se utiliza conectores para los diferentes elementos que se encuentren acoplados en la carcasa y en el chasis del prototipo, con ello aseguramos el desmontaje y la fácil con conexión de los mismos (Figura 95).



Figura 95 Conectores para Desmontaje de la Carcasa

De igual manera, se necesita tener puntos de prueba y puntos comunes para evitar la proporción del cableado de los diferentes elementos, para ello se hace uso de borneras las mismas que servirán como uniones de cableado y como puntos de prueba (Figura 96).



Figura 96 Borneras para unión y puntos de prueba

Para la organización del cableado se utiliza canaletas y espirales, la primera para organizar el cableado dentro de los soportes de acrílico y la segunda para una organización del cableado aéreo desde cualquier elemento del chasis hasta los soportes de acrílico (Figura 97, Figura 98 y Figura 99).

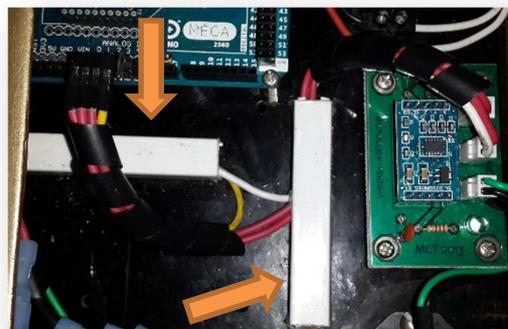


Figura 97 Organización del cableado mediante canaletas



Figura 98 Organización del cableado mediante espiral 1



Figura 99 Organización del cableado mediante espiral 2

4.2.7 Características Finales del Prototipo

Las características más sobresalientes que posee cada uno de los sistemas del prototipo, se aprecian en la Tabla 50.

Tabla 50 Características ROMOV

Características principales ROMOV	
<u>Sistema Mecánico</u>	
Número de ruedas	Cuatro
Tracción	Posterior
Dirección	Mecanismo Ackerman
Peso	15.8 Kg
Carga a soportar	10 Kg
Material de la carcasa	Fibra de vidrio
<u>Sistema Electrónico</u>	
Actuadores	Servo Torxis y Motor DC
Sensores	Sensor óptico con encoder y disco de duralón, acelerómetro MMA7361L, 4 sensores ultrasónicos HC-SR04 y potenciómetro rotatorio.
Microcontrolador	Arduino Mega 2560
Comunicación	Serial Inalámbrica, mediante módulos XBEE
Distancia máxima de comunicación	10 metros
<u>Sistema de Control</u>	
Instrumento	Computador portátil
Software	Matlab y Arduino 1.5.2
Dialogo Humano - Prototipo	Interfaz gráfica (HMI)
Modos de Operación	Manual y Automático

Dentro de la etapa de control, en todo el desarrollo de la programación de trayectorias y controlador, es imprescindible, dar a conocer que de la etapa de modelamiento, se han utilizado las ecuaciones que se detallan en el Modelado Cinemático. El modelado dinámico del prototipo y del motor son descartados.

Las razones por las que se descarta el modelo Dinámico del prototipo, es debido a que entre los parámetros a utilizar se encuentra el coeficiente

de fricción entre las llantas y la superficie por la cual se desplaza el prototipo. Esto es un inconveniente que gradualmente aumenta, ya que es necesario ir modificando el valor de este coeficiente dependiendo del estado de las ruedas así como la superficie, y debido a que no se tienen elementos de sensado de este tipo de magnitud física, lo mejor es descartar el modelamiento para el desarrollo de la programación. De igual manera, el modelo dinámico del motor, requiere que se conozcan una gran cantidad de magnitudes propias del Motor, y es mucho más sencillo modelar el Motor DC acoplado al prototipo mediante el uso de Matlab.

El prototipo, listo para trabajar en el modo manual o automático se aprecia en la Figura 100.



Figura 100 Prototipo Final

4.2.8 Identificación del Sistema

- **Modelado del Sistema**

En el robot móvil, se controla y monitorea la velocidad de desplazamiento que el mismo posee en el desarrollo de las trayectorias, tanto en el modo manual como en el modo automático. Para ello, los datos que se adquieren son los de velocidad angular (RPS), de esta manera se puede identificar y obtener un modelo matemático de la planta del robot móvil, la entrada del sistema es el ancho de pulso con el cual se controla la velocidad del motor DC. Mientras que la salida del sistema es la velocidad a la cual se está moviendo en el eje principal del motor, para más adelante poder utilizar este dato para estimar por completo cual es la posición en la cual se encuentra el robot, mediante herramientas matemáticas.

Es importante indicar, que los datos se trabajan matemáticamente mediante software para proceder a la estimación de la planta del sistema, debido a que si bien es cierto, se deberá enviar un dato de PWM, este es trabajado matemáticamente para que sea un dato de entrada de RPS en la estimación por software, y además, el sistema físico responderá enviando un dato de una variable auxiliar que se acumula mediante interrupciones, por lo que este dato también es trabajado matemáticamente para obtener una respuesta del sistema, también en revoluciones por segundo. Y de esta manera, matemáticamente la entrada y la salida del sistema tendrán las

mismas unidades, por lo que la estimación de la planta del Robot Móvil será la más aproximada.

- **Software**

Para realizar la adquisición de datos del sistema, se ha diseñado una interfaz gráfica ambientada en Matlab® (Figura 101) donde se puede guardar los datos obtenidos y exportarlos a matrices tanto para los valores del escalón, velocidad y el tiempo.

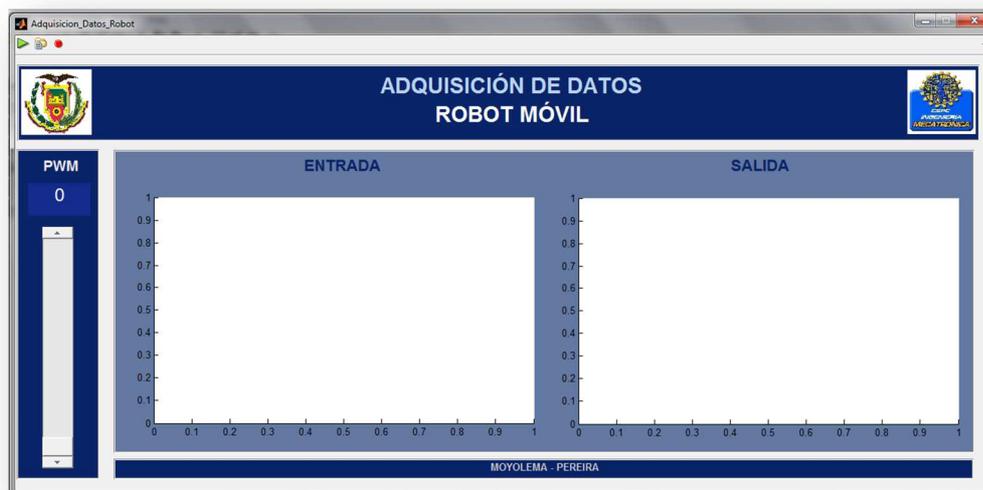


Figura 101 Interfaz Gráfica De Adquisición De Datos

- **Hardware**

Como ya se ha detallado con anterioridad, se utiliza una tarjeta microcontroladora, Arduino MEGA 2560, como enlace físico entre el robot móvil y la computadora portátil. Se conoce que la tarjeta posee un microcontrolador de la familia ATMEGA, lo que significa que es posible

utilizar comunicación serial, protocolo de transmisión y recepción de datos RS-232 a través de módulos inalámbricos, XBEE. Por lo que los datos enviados desde Matlab® son recibidos por el Arduino y enviados al motor, y la respuesta del mismo será recibida por el Arduino y enviada al computador.

- **Tiempo de muestreo**

La selección del tiempo de muestreo, tiene una incidencia muy alta en el hecho de que de esto depende justamente la calidad de datos que se van a obtener en el momento de realizar la adquisición, por lo cual es necesario seleccionar un tiempo de muestreo que permita que esto suceda, para ello, sabiendo que el Arduino Mega trabaja con un microcontrolador ATMEGA 2650, para saber cuál es el tiempo que se demora el arduino en ejecutar cada instrucción, se debe acudir al uso del Datasheet del microcontrolador Tabla 51.

Tabla 51 Modos de operación del cristal oscilador

Rango de Frecuencia (MHz)	CKSEL 3..1	Rango de Capacitores recomendados C1 y C2 (pF)
0.4 – 0.9	100	---
0.9 – 3.0	101	12 – 22
3.0 – 8.0	110	12 – 22
<u>8.0 – 16.0</u>	<u>111</u>	<u>12 – 22</u>

Sabiendo que la tarjeta Arduino, tiene un cristal de 16MHZ, la configuración recomendada del fabricante de CKSEL3..1 es 111, por lo que ahora se puede acudir a la Tabla 52 (Anexo C) para conocer cuál es el prescaler con el cual trabaja el Arduino MEGA 2650.

Tabla 52 Selección del reloj del Prescaler

CLKPS3	CLKPS2	CLKPS1	CLKPS0	Clock Division Factor
0	0	0	0	1
0	0	0	1	2
0	0	1	0	4
0	0	1	1	8
0	1	0	0	16
0	1	0	1	32
0	1	1	0	64
0	1	1	1	128
1	0	0	0	256
1	0	0	1	Reservado
1	0	1	0	Reservado
1	0	1	1	Reservado
1	1	0	0	Reservado
1	1	0	1	Reservado
1	1	1	0	Reservado
1	1	1	1	Reservado

Por lo tanto, en base a la Tabla 52 el prescaler con el que trabaja el Arduino Mega 2560 es 128.

Sabiendo esto, es posible conocer cuál es el tiempo de instrucción con el que trabaja el dispositivo:

$$T_{instruccion} = \frac{128}{16[MHz]} = 8[us]$$

Además, haciendo una aproximación del total de líneas programadas, con las que se usan con los subprogramas del Arduino, se puede considerar que el tiempo mínimo que se demora en ejecutar el programa completo es de 24 [ms] (3000 líneas de programación aproximadas), y a continuación estimar el tiempo de muestreo:

$$T_m > 3 * T_{procesador}$$

$$T_m > 72 \text{ ms}$$

Se deberá cumplir entonces, que el tiempo de muestreo deberá ser mayor que 72 [ms], por lo que se podría utilizar un muestreo de 100 [ms] para cerciorarse de que todas las líneas de programación han sido ejecutadas.

El tiempo de muestreo calculado es: $T_m = 100 \text{ [ms]} = 0.1 \text{ [s]}$, sin embargo, mediante pruebas realizadas en tiempo real, enviando y recibiendo datos entre el computador y el robot, es necesario utilizar un tiempo de muestreo mayor, esto debido a que el contador asociado a la interrupción del sensor óptico (encoder), en un tiempo de muestreo pequeño se acumula relativamente poco, y es necesario aumentar este

tiempo de muestreo para que el contador envíe un dato mayor y que de esta manera la estimación de la velocidad es aún mejor, por lo que el tiempo de muestro final es:

$$T_m = 250 \text{ [ms]}$$

- **Toma de datos**

La adquisición de datos, tuvo lugar durante 3 segundos, tiempo en el cual se aplicó un escalón de aproximadamente 80% del valor total, lo que corresponde a 219 en ancho de pulso (set point de 30 RPS). La salida del sistema, está dado de igual manera en RPS (Figura 102). La respuesta de la planta es la siguiente:

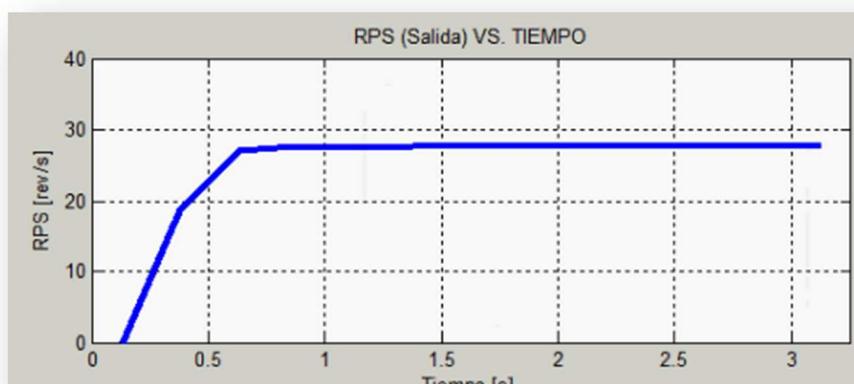


Figura 102 Respuesta de la planta

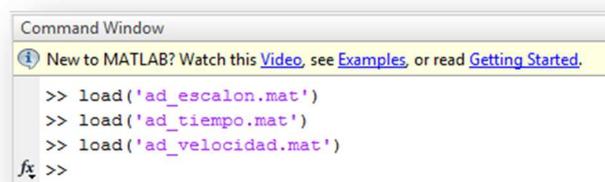
De los datos que se han obtenido, se puede verificar que la respuesta al escalón en lazo abierto es estable, por lo que es posible, utilizar los datos

de esta adquisición para poder identificar la planta, mediante herramientas matemáticas que contiene el software Matlab®.

Para guardar los datos, basta con dar clic en el icono ubicado en la barra de herramientas de la Interfaz gráfica, y automáticamente se tienen las matrices tanto del valor del escalón, la velocidad y el tiempo.

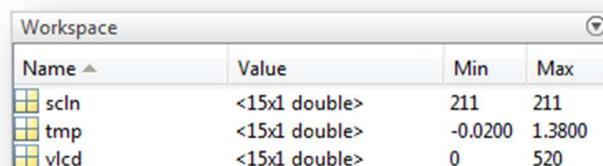
- **Identificación del sistema mediante Matlab**

Para la identificación del sistema, se utiliza las herramientas que ofrece Matlab® para este fin. Para ello, después de tener guardadas las matrices de datos, se deben las mismas exportar al Workspace (Figura 103) y cargarlos al Toolbox de Matlab® para la identificación (Figura 104).



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> load('ad_escalon.mat')
>> load('ad_tiempo.mat')
>> load('ad_velocidad.mat')
fx >>
```

Figura 103 Comandos para exportar de matrices



Name	Value	Min	Max
scln	<15x1 double>	211	211
tmp	<15x1 double>	-0.0200	1.3800
vlcd	<15x1 double>	0	520

Figura 104 Matrices de datos exportadas a Workspace

Después de exportar las matrices de datos de escalón, velocidad y tiempo, las mismas deberán ser procesadas. Para ello, se debe digitar '*ident*' en el 'Command Window' de Matlab® (Figura 105).

```
>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
>> |
```

Figura 105 Comando Ident en Matlab®

Después de ello, se abrirá una ventana (Figura 106) que permitirá realizar la identificación del sistema.

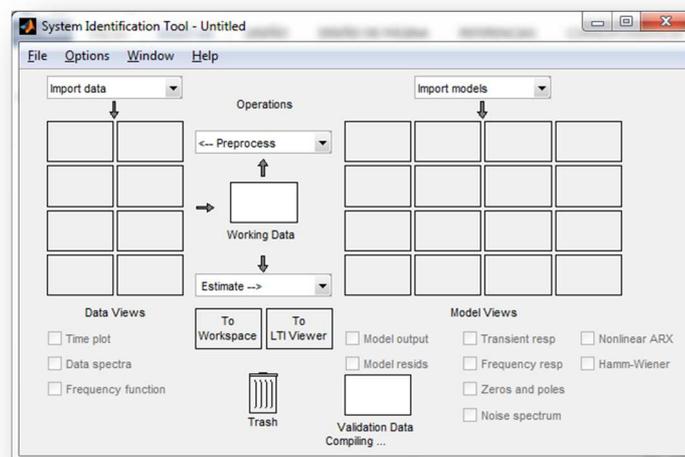


Figura 106 Ventada de la Herramienta de Identificación de Sistemas

Para poder procesar los datos, primeramente hay que seleccionar en la pestaña '*Import data*' la opción '*time domine data*' (Figura 107).

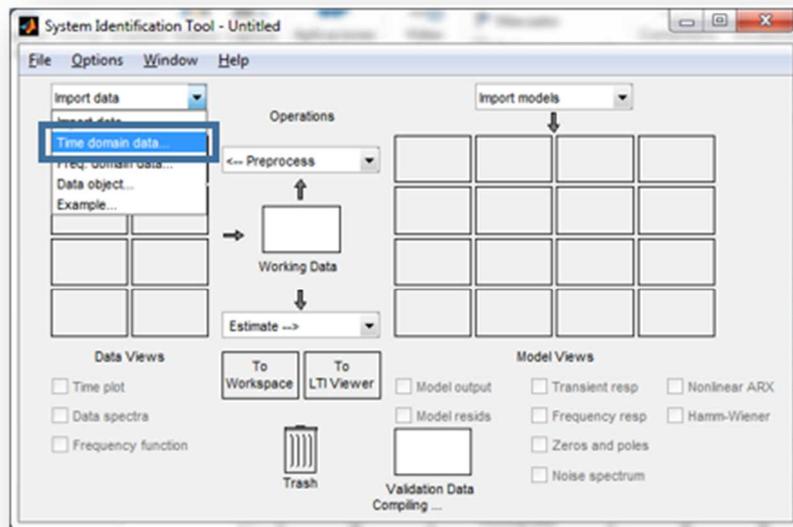


Figura 107 Selección del tipo de datos a importar

Después de este paso, aparecerá la ventana para importar los datos en el dominio del tiempo, se debe en ese momento ingresar en el casillero de *'Input'* el nombre de la matriz de datos de entrada, en este caso *'scln'*; y en el casillero de *'output'* escribimos el nombre de la matriz de salida, en este caso *'vlcd'*. Además de eso, se debe cambiar los valores iniciales en los casilleros *'Starting time'* y *'Sampling interval'*.

Los valores que se deberán ubicar son 0 y 0.25 respectivamente, el primero corresponde al tiempo de inicio y el segundo el tiempo de muestreo, ya calculado. Seguido de ello se deberá importar estas matrices, dando clic en el botón *'Import'* (Figura 108).

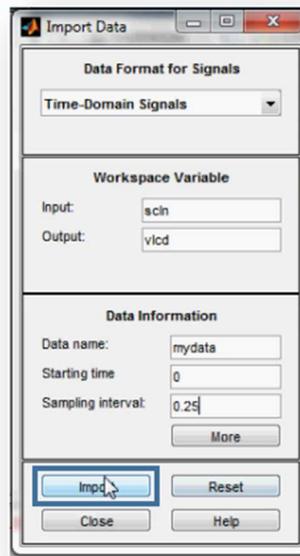


Figura 108 Ingreso de datos para modelado

Habiendo importado las matrices, el siguiente paso, previo a modelar la planta, será verificar los datos importados. Para ello se debe dar clic en “*time plot*” (Figura 109).

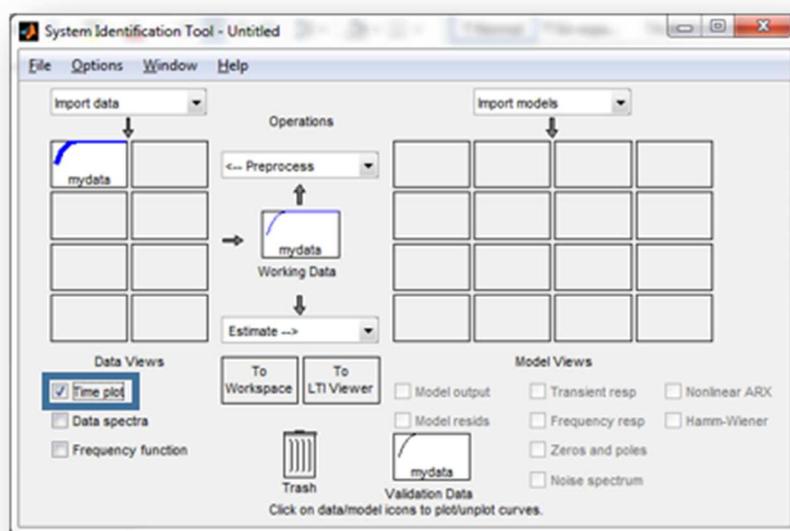


Figura 109 Selección de Time Plot para visualizar datos

Y de esta manera, se verificarán los datos que han sido importados.

Aparecerá la siguiente gráfica (Figura 110):

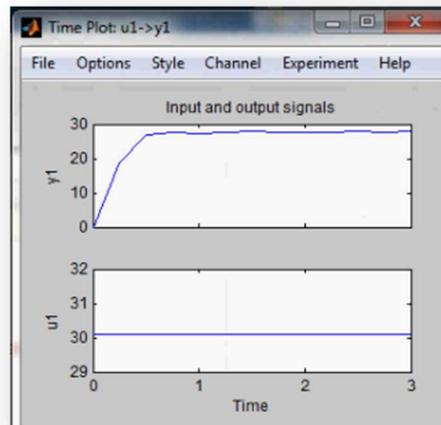


Figura 110 Verificación de datos

Comprobado que los datos importados de manera son correctos, se procede a procesar los mismos, para ellos, primeramente se debe dar clic en el botón “*Estimate*”, y de la lista de opciones que se generan se debe seleccionar “Process Models” (Figura 111).

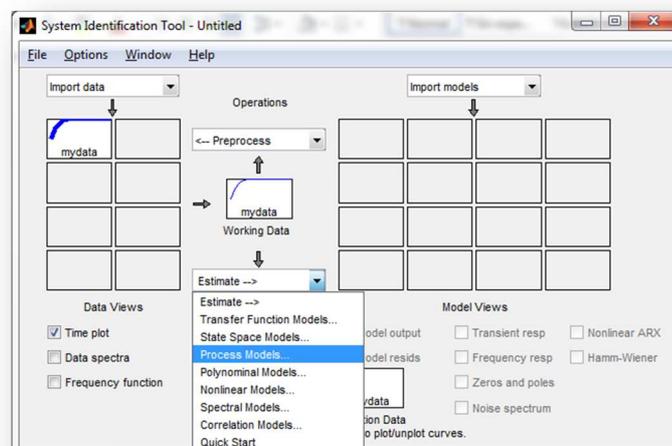


Figura 111 Selección del tipo de Estimación

Se despliega entonces una nueva ventana, en la cual se selecciona el tipo de función de transferencia que se debe estimar para el modelo del prototipo. Se debe entonces seleccionar una función con dos polos, sin “zeros”, sin “delay” y sin “integrador”, para ello se debe dejar vacíos los casilleros de selección de los mismos. Y dar clic en el botón “Estimate” (Figura 112).

Con esto, veremos como en la ventana principal, tendremos ya una salida del sistema, para poder verificar que tan cercana esta la estimación del modelo con respecto a los datos que se han importado, deberemos dar seleccionar la opción “*Model Output*” (Figura 113).

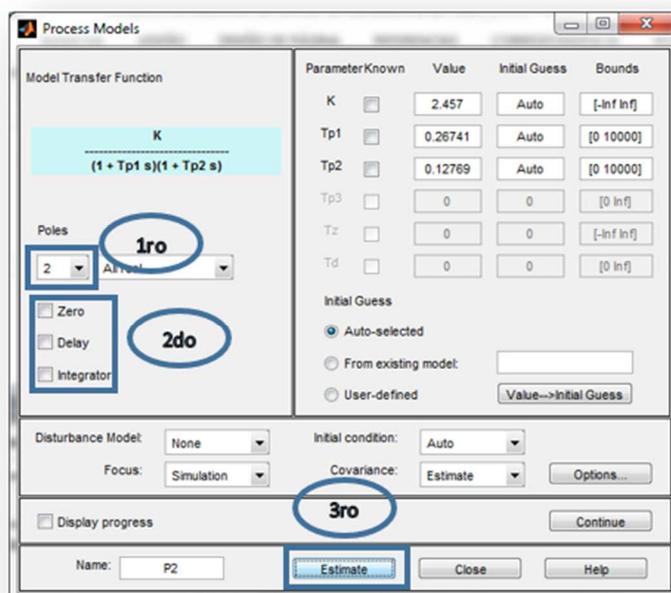


Figura 112 Selección de parámetros para la planta

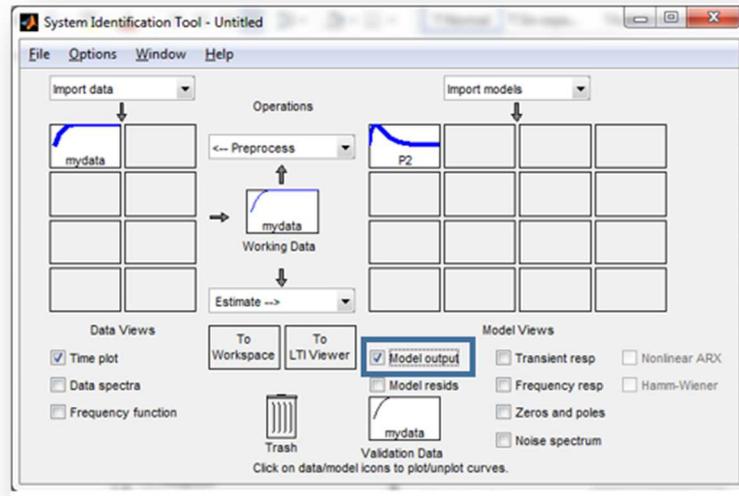


Figura 113 Selección de característica para visualizar salida'

Al seleccionar esta opción, se observa que se despliega una ventana adicional, en la cual se puede ver el porcentaje del mejor ajuste de la estimación. En este caso, se observa que es mayor de 90 el valor por lo cual la estimación es válida para trabajar (Figura 114).

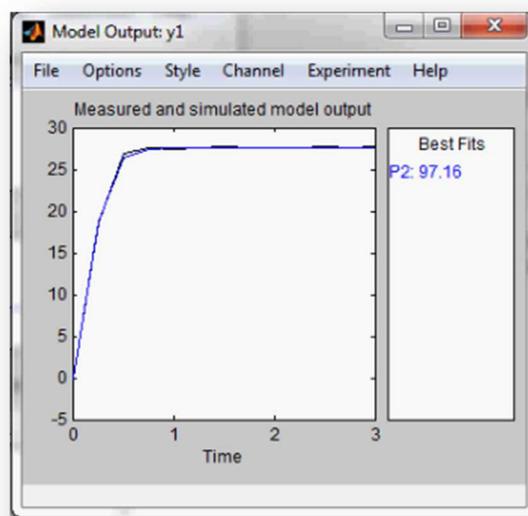


Figura 114 Salida del Modelo

Al conocer la estimación, se debe trasladar al “*Command Window*”, para ello se debe dar clic sobre la función P2 y sin soltar la arrastramos hasta la pequeña ventana “*To Workspace*” (Figura 115).

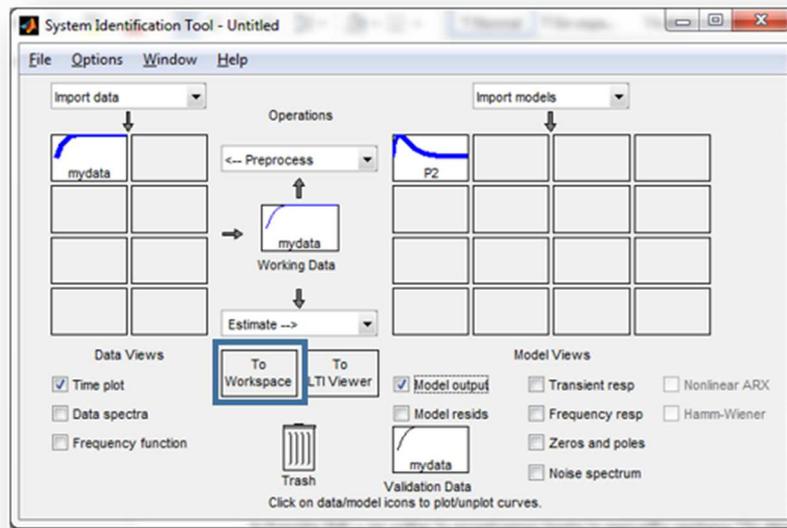


Figura 115 Pasar la función de transferencia al Workspace

La función de transferencia del prototipo de Robot Móvil se muestra en la Figura 116.

$$Gp(s) = \frac{2.457}{(1 + 0.26741s)(1 + 0.12769s)}$$

Figura 116 Función de Transferencia del Sistema

4.2.8.1 Diseño del control de velocidad para la tracción del robot móvil

Teniendo la función e transferencia en el Workspace, para ver el comportamiento de la misma, se debe primero ver la respuesta al escalón tanto en lazo abierto, como en lazo cerrado. Para el primer comportamiento deberemos escribir en el “*Command Window*” lo siguiente (Figura 117):

```
>> step(P2)  
>> |
```

Figura 117 Comando para hallar la respuesta al escalón en lazo abierto

Con ello, tendremos la siguiente gráfica (Figura 118):

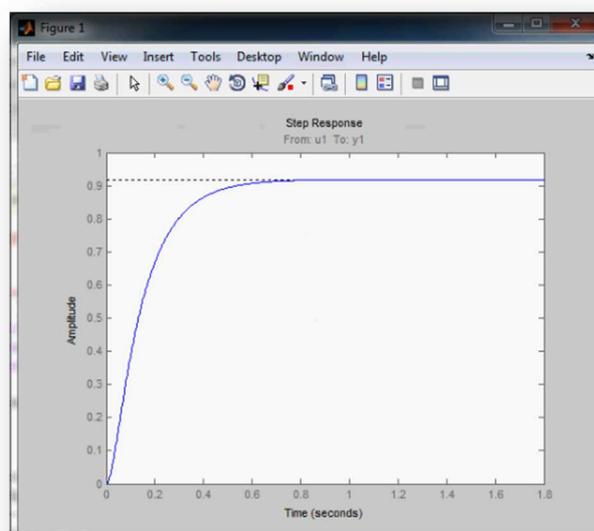


Figura 118 Respuesta en lazo abierto

Para obtener la respuesta en lazo cerrado, se deberá escribir el siguiente comando (Figura 119):

```
>> step(feedback(P2,1))  
>> |
```

Figura 119 Comando para hallar la respuesta al escalón en lazo cerrado

Obteniendo la siguiente gráfica (Figura 120):

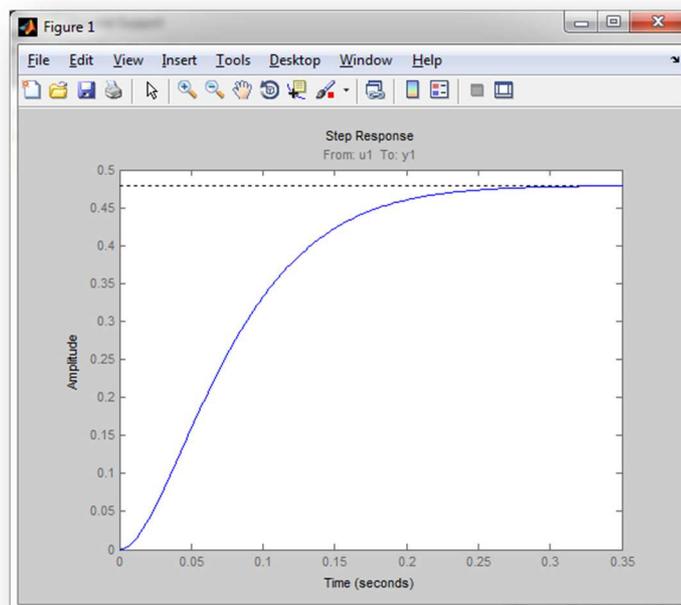
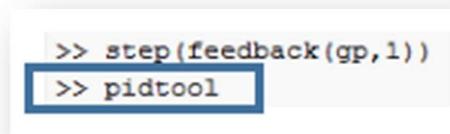


Figura 120 Respuesta al escalón en lazo cerrado

De la gráfica obtenida en lazo cerrado, se asevera que el principal inconveniente con la planta que se tiene, es que la misma no llega al setpoint por lo que es necesario el uso de un controlador para poder

corregir este inconveniente, para ello se estima un controlador PID, mediante el uso del paquete “*PIDTOOL*”, y a partir de las constantes que se hallen en ese instante, se deberá luego manipular las mismas para observar el comportamiento de la planta con el controlador y con pruebas en tiempo real de monitoreo del robot móvil.

Para poder hacer uso del módulo de controladores que posee Matlab®, debemos digitar lo siguiente (Figura 121):



```
>> step(feedback(gp,1))
>> pidtool
```

Figura 121 Comando para herramienta de controladores

Se despliega entonces la ventana del módulo de estimación de controladores, por lo que es necesario primero importar la planta que se tiene en el “*Command Window*”, dando clic en la barra de inicio de la ventana en el icono correspondiente a la importación (Figura 122), y después de ello seleccionando la función de transferencia de la planta (Figura 123):

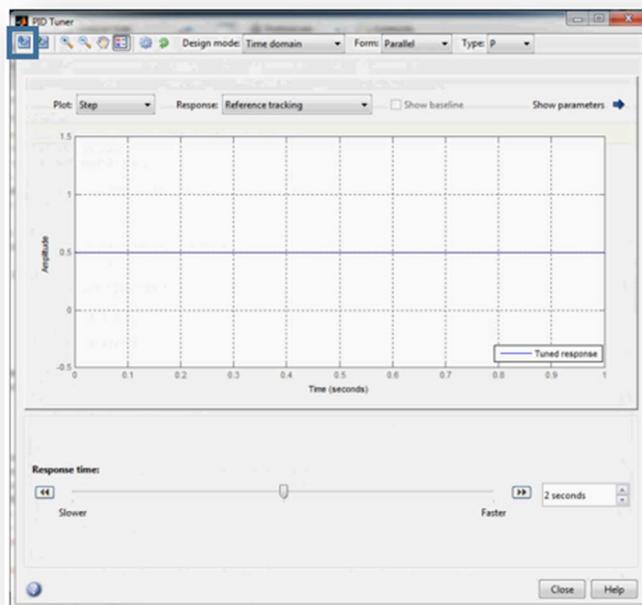


Figura 122 Selección del icono de importación

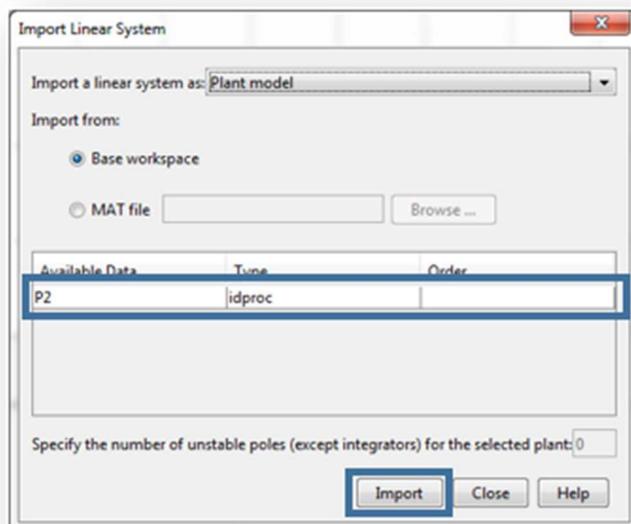


Figura 123 Selección de la planta para importar

En la misma barra de inicio, se deberá seleccionar el controlador que se desea estimar (Figura 124):

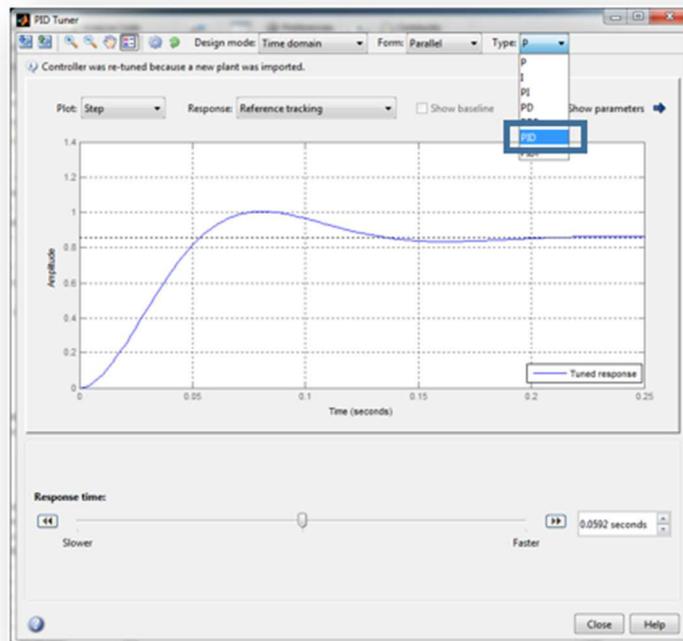


Figura 124 Selección del tipo de controlador

Se puede observar en ese momento, la respuesta de la planta controlada por el PID estimado mediante esta herramienta, sin embargo, hay que percatarnos de ciertos parámetros que se deben considerar para tomar como aplicables las constantes K_p , K_i y K_d que el mismo nos entrega, entre ella están los parámetros de Tiempo de estabilización y Máximo pico (Figura 125).

Al verificar estos datos, se puede ver que el máximo pico es demasiado alto para las expectativas del controlador, debido a que se buscaría una respuesta con un pico mucho más bajo del obtenido y adicionalmente, una respuesta físicamente posible, debido a que como se trata de un motor DC, se conoce que es un sistema de respuesta rápida, sin embargo, que el

tiempo de estabilización sea de 0.192 segundos es físicamente imposible de tener, por lo que se deberá ir modificando en las barras de tiempo de respuesta y del comportamiento transitorio, para obtener una curva de respuesta de la planta controlada que sea con el pico mínimo posible y a su vez que sea físicamente comprobable su validez.

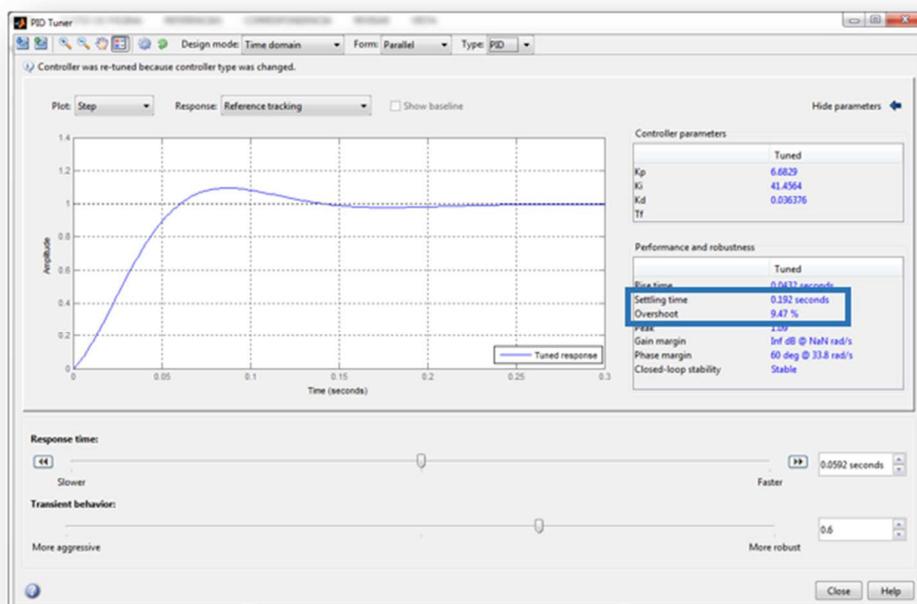


Figura 125 Verificación de máximo pico y tiempo de estabilización

Se manipulara el controlador, para obtener un pico de aproximadamente 1% y a su vez un tiempo de respuesta de 0.5 segundos, lo cual ya es físicamente posible (Figura 126).

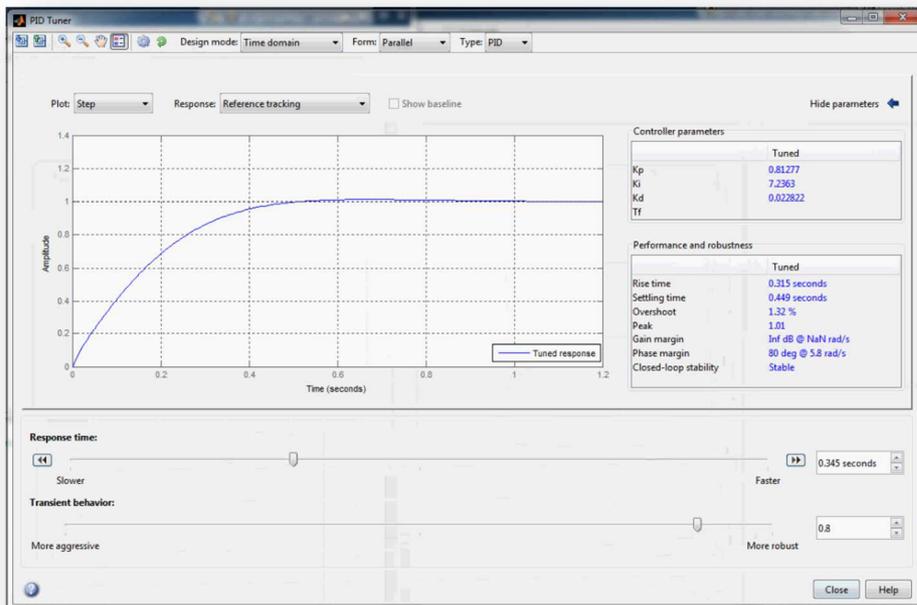


Figura 126 Respuesta de la planta controlada

Con las condiciones dadas, las constantes que arroja como respuesta son (Tabla 53):

Tabla 53 Constantes del controlador estimado

CONSTANTES DEL CONTROLADOR	
KP	0.81277
KI	7.2363
KD	0.022822

Estas constantes, ahora deben ser probadas dentro de la Interfaz gráfica que ha sido diseñada para el control Manual del Robot Móvil. Y al mismo tiempo, manipular las constantes obtenidas, dependiendo del comportamiento del controlador y encontrar cuales son las más óptimas

con respecto al intercambio de información entre el robot móvil y el computador.

- **Afinamiento de constante del controlador**

Para proceder a afinar las constantes del controlador, es necesario primeramente comprobar el funcionamiento de las obtenidas mediante el software *Matlab*®. La probabilidad de que las constantes funcionen de una manera correcta es incierta debido a que se debe considerar el hecho de que el procesamiento de las señales se realiza netamente en el computador portátil; razón por la cual, se deberán ir afinando en tiempo real. Para ello, se utilizará la interfaz gráfica diseñada para la operación manual del robot (Figura 127).

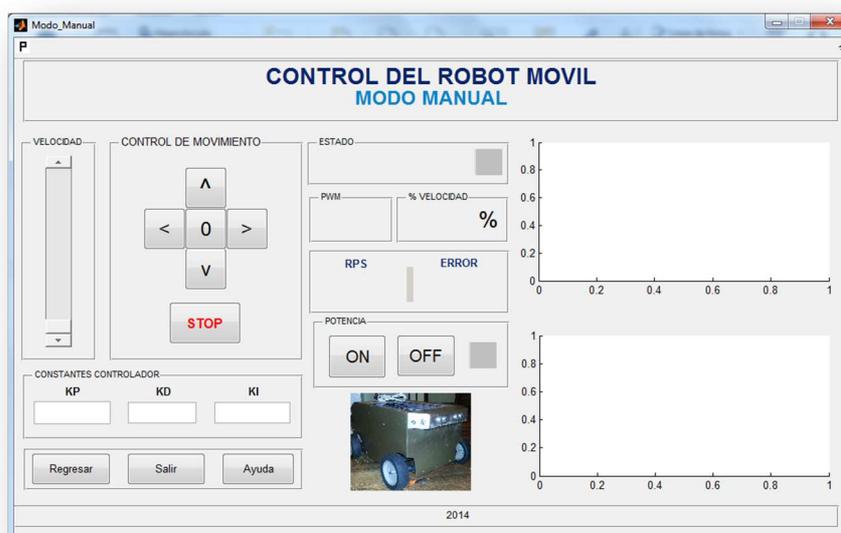


Figura 127 Interfaz gráfica para control manual

En la misma, se puede verificar que en el lado derecho, se tiene la salida gráfica, en donde se observa la variación del setpoint de velocidad y la respuesta del sensor. En los casilleros de las constantes del controlador, se debe ingresar los valores calculados por *Matlab®*, y en función de la respuesta ir afinando las constantes (Figura 128).

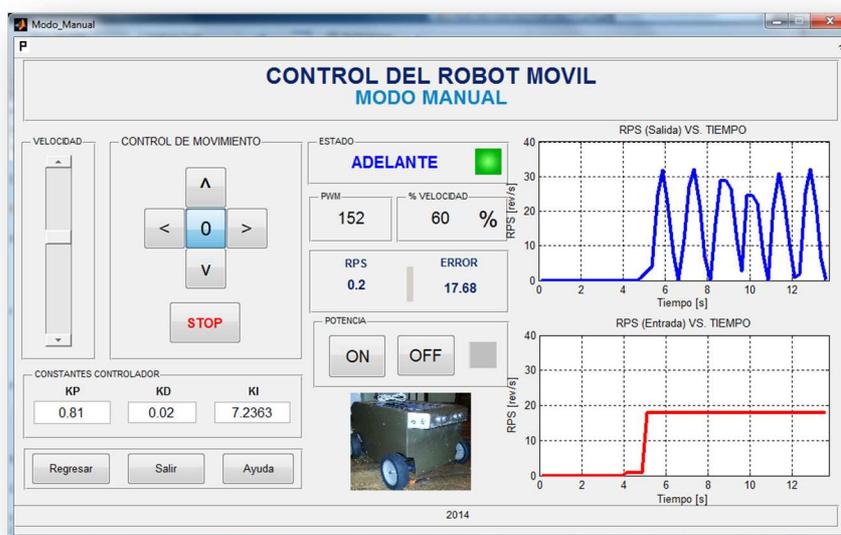


Figura 128 Verificación de constantes obtenidas en PIDtool

Se verifica, que las constantes obtenidas generan un oscilamiento de la señal controlada, por lo cual es necesario afinar las constantes.

Mediante sintonización iterativa, las constantes que mejor se comportan en el sistema son las siguientes (Tabla 54):

Tabla 54 Constantes sintonizadas por afinamiento

Kp	Kd	Ki
0.28	0.004	0.007

Con ello se puede obtener la función de transferencia del controlador como se muestra en la Figura 129.

$$G_c(s) = \frac{0.004s^2 + 0.28s + 0.007}{s}$$

Figura 129 Función de Transferencia del Controlador

Al verificar el funcionamiento de estas variables en la interfaz gráfica, se puede ver el comportamiento del mismo mediante un seguimiento del setpoint (Figura 130 y Figura 131).

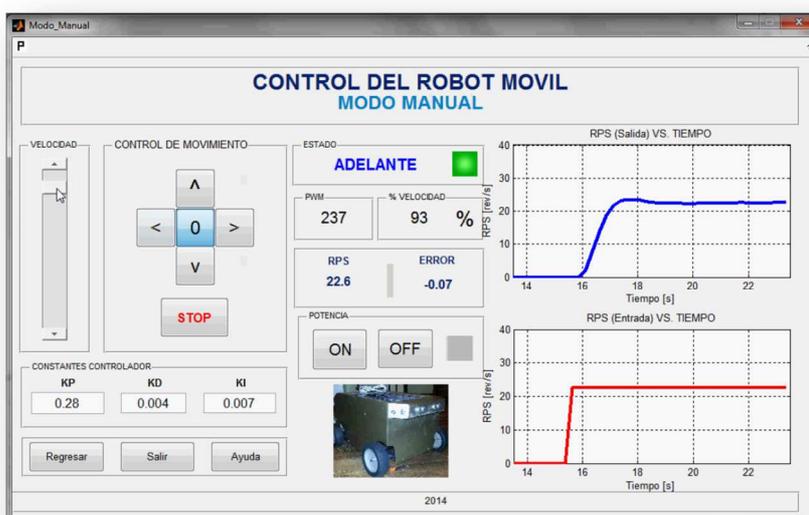


Figura 130 Seguimiento de set point

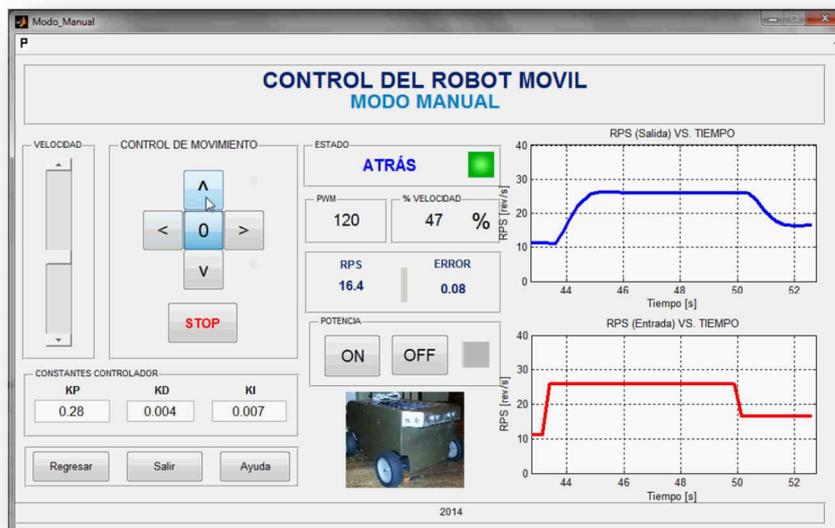


Figura 131 Seguimiento de setpoint con constantes afinadas

En las gráficas, se verifica que el controlador mantiene el error en estado estacionario cercano a cero, por lo cual se demuestra la validez del mismo. Adicionalmente, se menciona, que debido a que la planta del motor es sumamente rápida en su respuesta, es necesario el uso de un atenuador en lugar de un amplificador en el controlador, esto se ve reflejado en el valor de la constante K_p es menor que uno; acompañado del uso de la parte integral y diferencial.

4.2.9 Diseño del controlador para el sistema de dirección del robot móvil

El uso de Arduino, ayuda de manera sobresaliente en esta etapa de control del Servo asociado a la dirección del prototipo, esto se debe, a que Arduino posee una librería asociada al uso de servomotores.

La posición angular del servomotor está dada por la medición del valor de voltaje del potenciómetro, con el cual se podrá realizar las estimaciones odométrica mientras el robot se encuentra realizando una curva específica.

Los servomotores tienen en su estructura tres hilos para la conexión, alimentación, tierra y señal. Como el servomotor usado en el prototipo posee su circuito de control dentro de su carcasa, tiene cuatro hilos, alimentación, tierra de la alimentación, señal y tierra de la señal. Se debe en este caso, unir las tierras de alimentación y de señal. La alimentación vendrá de una de las baterías de LiPo de 3 celdas, mientras que la señal de uno de los pines de Arduino, que pueda trabajar con la librería de arduino.

Para el control manual del prototipo, en el HMI diseñado, se pueden observar los botones para el control de la dirección (Figura 132).



Figura 132 Botones para control de servo

Con estos elementos, cuando el prototipo está en funcionamiento, se puede mover la dirección, a la derecha, a la izquierda o desde cualquier punto regresarla a la posición inicial y visualizar el valor del ángulo de giro en el HMI.

4.2.10 Análisis del modelo cinemático

En función de todas las condiciones cinemáticas expuestas, y conociendo las dimensiones del prototipo (Capítulo 3.2), se puede conocer los valores numéricos de ciertas relaciones geométricas.

Para comprobar las dimensiones ya definidas anteriormente, hacemos uso de las dimensiones reales del prototipo, que se pueden obtener con facilidad, y a su vez encontrar el CCI para cuando el prototipo tiene la

dirección totalmente a la derecha (Figura 133), como cuando está totalmente a la izquierda (Figura 136).

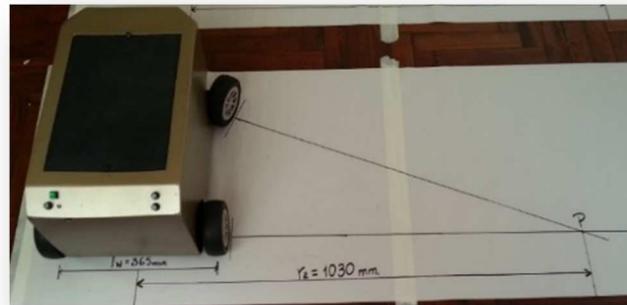


Figura 133 Prototipo con dirección a la derecha

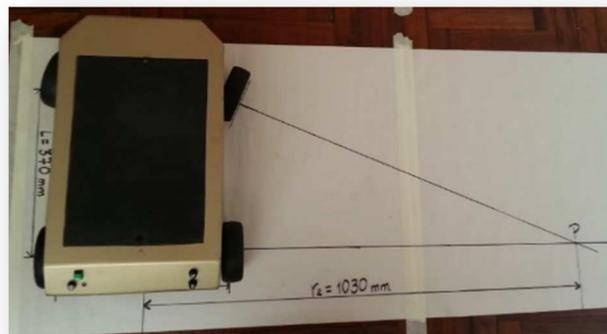


Figura 134 Geometría del prototipo con dirección a la derecha



Figura 135 Distancia entre ejes del prototipo

Por lo que se tiene las dimensiones de los parámetros cuando el prototipo tiene sus ruedas giradas completamente a la derecha:

Tabla 55 Dimensiones al girar a la derecha

Dimensiones del Prototipo (ruedas giradas a la derecha)	
l_w : Longitud de los ejes	365 [mm] (Figura 133)
L : Distancia entre ejes	370 [mm] (Figura 135)
r : Distancia al CCI	1030 [mm] (Figura 134)

A partir de estos datos (Tabla 55), se puede conocer cuál es el ángulo que cada una de las ruedas delanteras ha girado, es decir, el ángulo de la rueda interna a la curva y el ángulo de la rueda externa a la curva.

- Ángulo exterior:

$$\tan(\theta_1) = \frac{L}{r - \frac{l_w}{2}}$$

$$\tan(\theta_1) = \frac{370 \text{ [mm]}}{1030 \text{ [mm]} - \frac{365 \text{ [mm]}}{2}} = 0.44$$

$$\theta_1 = 23.59^\circ$$

- Ángulo interior:

$$\tan(\theta_2) = \frac{L}{r + \frac{l_w}{2}}$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{370 \text{ [mm]}}{1030 \text{ [mm]} + \frac{365 \text{ [mm]}}{2}} = 0.305$$

$$\theta_2 = 16.96^\circ$$

De los resultados obtenidos, la primera observación importante se da en la verificación de que el ángulo que gira la rueda exterior es mayor al ángulo que gira la rueda interior cumpliéndose con la condición para un mecanismo de tipo Ackerman.

Al trabajar con un modelo Ackerman, se puede utilizar el modelo cinemático de la bicicleta para simplificar dicha estructura, por lo que se debe encontrar el ángulo promedio, ángulo que giraría la rueda imaginaria en el centro del eje delantero, de la siguiente manera:

$$\theta_d = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

$$\theta_d = \frac{23.59^\circ + 16.96^\circ}{2}$$

$$\theta_d = 20.28^\circ$$

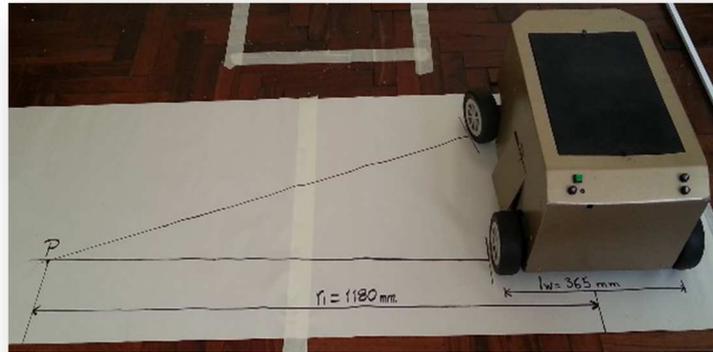


Figura 136 Prototipo con dirección a la izquierda

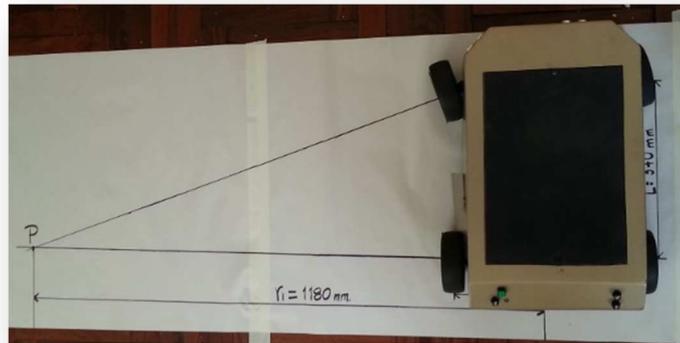


Figura 137 Geometría del prototipo con dirección a la izquierda

De igual manera se obtiene las dimensiones reales del prototipo cuando la dirección del robot móvil se encuentra giradas totalmente a la izquierda (Figura 136), y a su vez encontrar el CCI en dicha posición de la dirección.

Por lo que se tiene las dimensiones de los parámetros cuando el prototipo tiene sus ruedas giradas completamente a la izquierda:

Tabla 56 Dimensiones al girar a la izquierda

Dimensiones del Prototipo (ruedas giradas a la izquierda)	
l_w : Longitud de los ejes	365 [mm] (Figura 136)
L : Distancia entre ejes	370 [mm] (Figura 135)
r : Distancia al CCI	1180 [mm] (Figura 137)

Procediendo de la misma manera, con los datos de la Tabla 56 se calculan los ángulos tanto interior como exterior de las ruedas, así:

- Ángulo exterior:

$$\tan(\theta_1) = \frac{L}{r - \frac{l_w}{2}}$$

$$\tan(\theta_1) = \frac{370 \text{ [mm]}}{1180 \text{ [mm]} - \frac{365 \text{ [mm]}}{2}} = 0.37$$

$$\theta_1 = 20.35^\circ$$

- Ángulo interior:

$$\tan(\theta_2) = \frac{L}{r + \frac{l_w}{2}}$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{370 \text{ [mm]}}{1180 \text{ [mm]} + \frac{365 \text{ [mm]}}{2}} = 0.27$$

$$\theta_2 = 15.19^\circ$$

Con estos valores, se calcula el ángulo promedio de giro de las ruedas a la izquierda:

$$\theta_i = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

$$\theta_i = \frac{20.35^\circ + 15.19^\circ}{2}$$

$$\theta_i = 17.77^\circ$$

Si se compara los valores de θ_d y θ_i , se verifica que tienen una diferencia de 2.51° , dicho error se lo atribuye a la manufactura y el ensamble del mecanismo Ackerman, mas no a su diseño geométrico, debido a que como mecanismo está cumpliendo la funcionalidad, que la rueda interior tenga un ángulo mayor que la rueda exterior, tanto al girar a la derecha como a la izquierda. Sin embargo, en el momento en el que la estructura del prototipo se lleva a cabo, por errores humanos en la manufactura se acarrea esta diferencia.

Esta característica se va a verificar en el momento en el que se realiza el seguimiento a las trayectorias planificadas, ya que al girar a la izquierda tiene un radio de curvatura distinto al que se tiene al girar a la derecha.

4.3 Validación de Prototipo

4.3.1 Verificación del Sistema

4.3.1.1 Funcionamiento del Controlador en Modo Manual del HMI

El desarrollo de la interfaz de Modo Manual, permite controlar la velocidad de desplazamiento del prototipo así como también permite con los botones asociados, movilizarlo sea hacia adelante, atrás, izquierda o derecha. En donde lo más importante viene a ser la velocidad de reacción del usuario para evitar colisiones o algún daño en el prototipo.

Adicionalmente, en el modo manual, se puede verificar el correcto funcionamiento electrónico del prototipo, así como el funcionamiento del controlador.

En el seguimiento del controlador, se puede observar (Figura 138) que el error es pequeño al comparar la señal controlado con el setpoint. Lo que garantiza que el controlador está trabajando de forma eficiente.

Otra característica importante del controlador es que puede hacer su función en los dos sentidos de rotación del eje del motor, es decir cuando el desplazamiento es hacia adelante o hacia atrás, se observa (Figura 139)

que existe un pico pequeño en la gráfica, esto debido al cambio de giro del motor, y el controlador cumple su función.

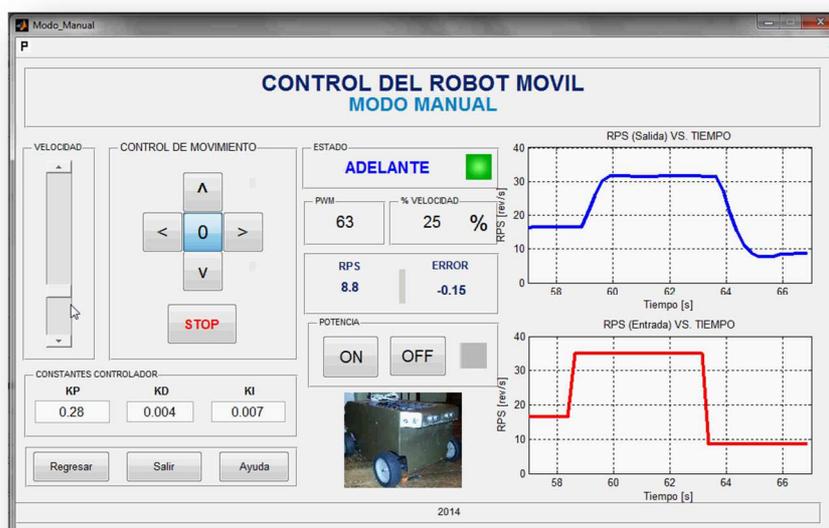


Figura 138 Seguimiento de Controlador

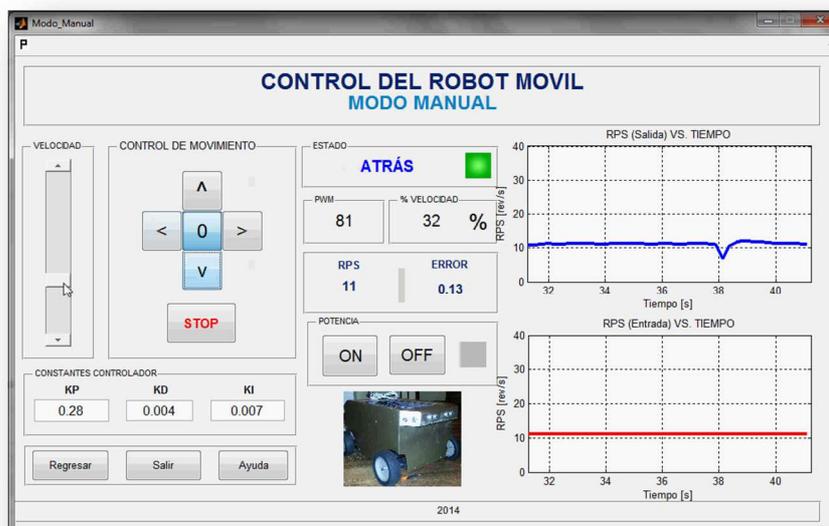


Figura 139 Cambio de Giro del Motor DC

Con el funcionamiento del controlador, el mismo es implementado en la programación del funcionamiento automático del robot.

4.3.1.2 Pruebas en Modo Automático

La experimentación en tiempo real, se define como las pruebas realizadas de las trayectorias que debe cumplir el prototipo en el Modo Automático, en donde se han localizado ciertos inconvenientes en el desarrollo de las trayectorias.

Los dos principales problemas que se han encontrado son:

- El prototipo no alcanza el punto final a donde debería llegar
- Existencia de un problema con la transferencia de datos desde el prototipo al computador, por lo que se observan picos en el controlador, en el desarrollo de las trayectorias.

En las pruebas realizadas a la trayectoria tipo Parábola se pudo evidenciar el problema de que el prototipo no alcanza el punto final de la trayectoria (Figura 140).

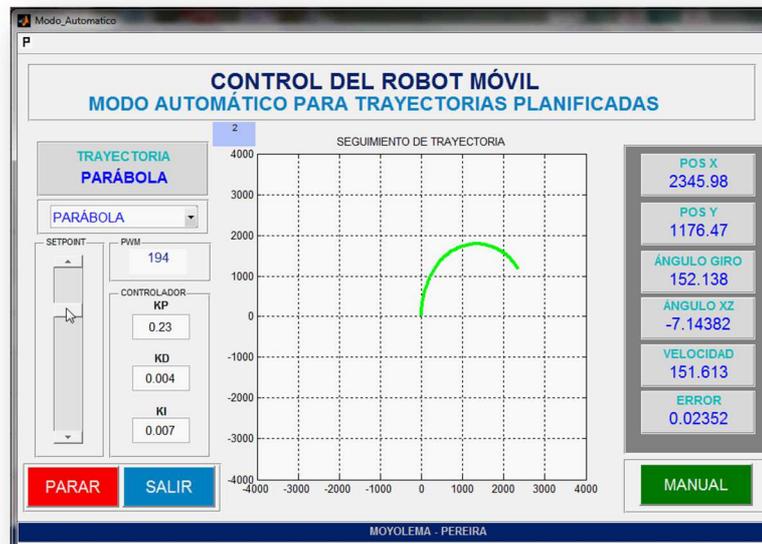


Figura 140 Modo Automático, prototipo no llega al punto final (Parábola)

De igual manera, se pudo encontrar el mismo comportamiento en la trayectoria tipo circunferencia (Figura 141).

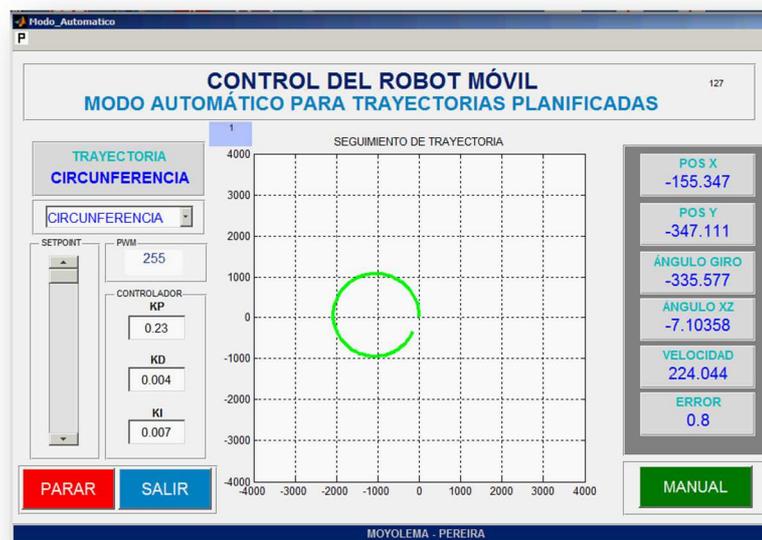


Figura 141 Modo Automático, prototipo no llega al punto final (Circunferencia)

En ambos casos, se observa que el prototipo no logra llegar al punto final de la trayectoria.

Adicional a este inconveniente, en el desarrollo de la trayectoria tipo Parábola, se pudo encontrar otro error, en el que el computador recibe un dato adicional que lo evalúa como un dato de velocidad, lo que produce una gráfica mal trazada de la trayectoria (Figura 142).

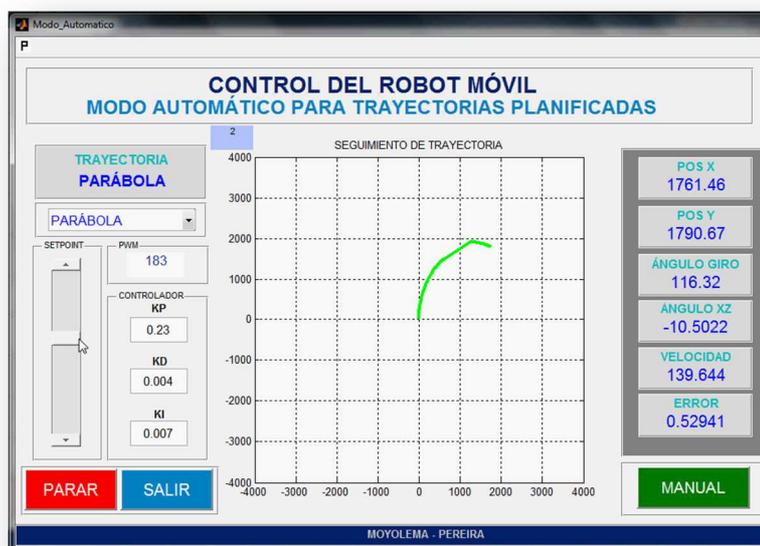


Figura 142 Modo Automático, error por picos en lecturas de velocidad

Para verificar si el problema se encuentra en la recepción de los datos, se adiciona un visualizador de la respuesta de la planta controlada en donde se observa el pico en la velocidad (Figura 143), mientras que en la gráfica de la parábola, se dibuja una línea recta en la dirección en la que se mueve el prototipo.

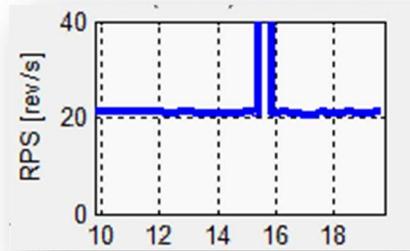


Figura 143 Modo Automático, gráfica de error por picos en lecturas de velocidad

Ambos problemas, generan un trazado erróneo de la trayectoria el prototipo realiza.

4.3.2 Protocolo de Pruebas

- **Variables Controladas**
 - **Detección de obstáculos**

Como se indica en el Capítulo 3, el sensor a utilizar es el Ultrasónico HC-SR04. Implementado el mismo sobre el prototipo, se verifica el rango de medición. Ubicando objetos delante del prototipo a una distancia conocida (medida real), y comparando con el valor que entrega el sensor. Haciendo uso de la Tabla 57 y Tabla 58, se observa los distintos valores que se obtienen.

Tabla 57 Errores Ultrasonicos Prueba 1

Sensor: Ultrasonico HC-SR04			Prueba 1	
Medida Real (cm)	Medida del sensor (cm)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
4,00	4,08	0,08	0,02	2,00%
4,00	4,15	0,15	0,04	3,75%
4,00	3,98	0,02	0,01	0,50%
4,00	3,95	0,05	0,01	1,25%
4,00	4,01	0,01	0,00	0,25%
4,00	4,00	0,00	0,00	0,00%
4,00	4,07	0,07	0,02	1,75%
4,00	3,95	0,05	0,01	1,25%
4,00	3,98	0,02	0,01	0,50%
4,00	3,99	0,01	0,00	0,25%
4,00	4,15	0,15	0,04	3,75%
Promedios	4,03	0,06	0,01	1,39%

Tabla 58 Errores Ultrasonico Prueba 2

Sensor: Ultrasonico HC-SR04			Prueba 2	
Medida Real (cm)	Medida del sensor (cm)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
350,00	355,40	5,40	0,02	1,54%
350,00	352,00	2,00	0,01	0,57%
350,00	346,10	3,90	0,01	1,11%
350,00	345,10	4,90	0,01	1,40%
350,00	354,20	4,20	0,01	1,20%
350,00	348,20	1,80	0,01	0,51%
350,00	345,00	5,00	0,01	1,43%
350,00	356,10	6,10	0,02	1,74%
350,00	350,00	0,00	0,00	0,00%
350,00	357,20	7,20	0,02	2,06%
350,00	343,50	6,50	0,02	1,86%
Promedios	350,25	4,27	0,01	1,22%

En ambas tablas se puede observar que el error porcentual promedio, no supera el 2%; por lo que el sensor satisface los requerimientos.

- **Inclinación de superficie**

El análisis de error sobre esta magnitud, es necesario conocer previamente el valor real de la superficie sobre la cual se está moviendo el prototipo, para ello se utiliza una aplicación en un dispositivo adicional (Smartphone con sistema operativo Android), en donde se visualiza la inclinación de cada superficie, Figura 144 y Figura 145.



Figura 144 Valor Pendiente 1



Figura 145 Valor Pendiente 2

Conociendo el valor real de inclinación de la superficie, se trabaja con el prototipo en estos lugares. De la recolección de datos, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 59 y Tabla 60.

Tabla 59 Errores superficie de 15°

Sensor: Acelerómetro MMA7361L		Prueba 1		
Medida Real (°)	Medida del sensor (°)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
15,00	14,50	0,50	0,03	3,33%
15,00	15,60	0,60	0,04	4,00%
15,00	14,20	0,80	0,05	5,33%
15,00	15,80	0,80	0,05	5,33%
15,00	15,00	0,00	0,00	0,00%
15,00	14,60	0,40	0,03	2,67%
15,00	15,40	0,40	0,03	2,67%
15,00	15,80	0,80	0,05	5,33%
15,00	14,70	0,30	0,02	2,00%
15,00	15,80	0,80	0,05	5,33%
15,00	14,40	0,60	0,04	4,00%
Promedios	15,07	0,55	0,04	3,64%

Tabla 60 Errores superficie de 30°

Sensor: Acelerómetro MMA7361L		Prueba 2		
Medida Real (°)	Medida del sensor (°)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
30,10	31,50	1,40	0,05	4,65%
30,00	30,00	0,00	0,00	0,00%
30,00	28,50	1,50	0,05	5,00%
30,00	29,60	0,40	0,01	1,33%
30,00	31,40	1,40	0,05	4,67%
30,00	28,60	1,40	0,05	4,67%
30,00	29,40	0,60	0,02	2,00%
30,00	31,50	1,50	0,05	5,00%
30,00	31,70	1,70	0,06	5,67%
30,00	28,70	1,30	0,04	4,33%
30,00	31,80	1,80	0,06	6,00%
Promedios	30,25	1,18	0,04	3,94%

Como el valor del error porcentual promedio, no supera el 5%; se considera que el sensor utilizado satisface los requerimientos del sistema.

○ **Velocidad del Prototipo**

En la Interfaz gráfica diseñada, se puede observar el valor de velocidad lineal a la cual se desplaza el prototipo; sin embargo, para compararla con un patrón, se procede a cronometrar el tiempo que se demora el prototipo en recorrer una distancia conocida, y de esta manera calcular la velocidad a la que se desplaza. Esta velocidad se compara con la que se visualiza en el Interfaz gráfico. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 61.

Tabla 61 Errores para Velocidad

Herramienta: Cronómetro					Prueba 1		
Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/seg)	Velocidad (m/min)	Valor Medido (GUIDE) (m/min)	Error Abs	Error Rel	Error Porcent
3,00	15,12	0,20	11,90	11,95	0,05	0,02	1,51%
3,00	15,20	0,20	11,84	11,93	0,09	0,03	2,93%
3,00	14,80	0,20	12,16	12,22	0,06	0,02	1,93%
3,00	14,90	0,20	12,08	12,15	0,07	0,02	2,32%
3,00	15,02	0,20	11,98	12,02	0,04	0,01	1,20%
3,00	14,96	0,20	12,03	12,15	0,12	0,04	3,93%
3,00	14,36	0,21	12,53	12,44	0,09	0,03	3,16%
3,00	15,20	0,20	11,84	11,93	0,09	0,03	2,93%
3,00	15,01	0,20	11,99	11,93	0,06	0,02	2,07%
3,00	14,96	0,20	12,03	12,15	0,12	0,04	3,93%
3,00	15,08	0,20	11,94	12,02	0,08	0,03	2,79%
Promedio				12,08	0,08	0,03	2,61%

Se observa, que el error no supera el 5%, para ninguno de los casos. En donde se verifica que el prototipo si se mueve a la velocidad media establecida de 12m/min.

- **Variables Manipuladas**

Para las variables manipuladas, es necesario tomar en cuenta cómo está funcionando tanto el controlador de cada uno de los actuadores y su respectivo sensor. Para ello, se compara el valor deseado con respecto al valor sentido, para ambos casos.

- **Regulación de Velocidad (Motor DC)**

Para verificar el comportamiento del controlador, y que el mismo cumple su función, se ubican distintos valores deseados de velocidad 25%, 32%, 5% y 80%. Y para cada uno de estos valores, se recolectan los datos de respuesta del controlador y se calcula el error para cada caso, tal como se observa en la Tabla 62, Tabla 63, Tabla 64 y Tabla 65.

Tabla 62 Controlador Motor DC - 25%

Herramienta: Sensor óptico y Arduino			Prueba 1	25%
Valor Requerido (Setpoint) (rps)	Medida del sensor (rps)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
8,65	8,80	0,15	0,02	1,73%
8,65	8,75	0,10	0,01	1,16%
8,65	8,85	0,20	0,02	2,31%
8,65	8,80	0,15	0,02	1,73%
8,65	8,65	0,00	0,00	0,00%
8,65	8,60	0,05	0,01	0,58%
8,65	8,55	0,10	0,01	1,16%
8,65	8,60	0,05	0,01	0,58%
8,65	8,70	0,05	0,01	0,58%
8,65	8,80	0,15	0,02	1,73%
8,65	8,60	0,05	0,01	0,58%
Promedios	8,70	0,10	0,01	1,10%

Tabla 63 Controlador Motor DC - 32%

Herramienta: Sensor óptico y Arduino			Prueba 2	32%
Valor Requerido (Setpoint) (rps)	Medida del sensor (rps)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
11,12	10,90	0,22	0,02	1,98%
11,12	11,00	0,12	0,01	1,08%
11,12	10,90	0,22	0,02	1,98%
11,12	11,10	0,02	0,00	0,18%
11,12	11,20	0,08	0,01	0,72%
11,12	11,00	0,12	0,01	1,08%
11,12	10,90	0,22	0,02	1,98%
11,12	10,90	0,22	0,02	1,98%
11,12	11,00	0,12	0,01	1,08%
11,12	11,10	0,02	0,00	0,18%
11,12	11,20	0,08	0,01	0,72%
Promedios	11,02	0,13	0,01	1,18%

Tabla 64 Controlador Motor DC - 55%

Herramienta: Sensor óptico y Arduino		Prueba 3		55%
Valor Requerido (Setpoint) (rps)	Medida del sensor (rps)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
16,35	16,20	0,15	0,01	0,92%
16,35	16,10	0,25	0,02	1,53%
16,35	16,50	0,15	0,01	0,92%
16,35	16,20	0,15	0,01	0,92%
16,35	16,10	0,25	0,02	1,53%
16,35	16,05	0,30	0,02	1,83%
16,35	16,20	0,15	0,01	0,92%
16,35	16,50	0,15	0,01	0,92%
16,35	16,10	0,25	0,02	1,53%
16,35	16,00	0,35	0,02	2,14%
16,35	16,30	0,05	0,00	0,31%
Promedios	16,20	0,20	0,01	1,22%

Tabla 65 Controlador Motor DC - 80%

Herramienta: Sensor óptico y Arduino		Prueba 4		80%
Valor Requerido (Setpoint) (rps)	Medida del sensor (rps)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
24,11	24,30	0,19	0,01	0,79%
24,11	24,20	0,09	0,00	0,37%
24,11	24,20	0,09	0,00	0,37%
24,11	23,70	0,41	0,02	1,70%
24,11	23,90	0,21	0,01	0,87%
24,11	24,30	0,19	0,01	0,79%
24,11	23,70	0,41	0,02	1,70%
24,11	23,80	0,31	0,01	1,29%
24,11	23,70	0,41	0,02	1,70%
24,11	24,50	0,39	0,02	1,62%
24,11	24,40	0,29	0,01	1,20%
Promedios	24,06	0,27	0,01	1,13%

En los casos en los que se calcula el error porcentual, para diversos valores deseados, se observa que el mismo no supera el 2%. Lo que verifica el diseño del controlador.

○ **Sistema de Dirección (Servomotor)**

En el análisis de errores para la dirección, hay que tomar en cuenta que el servomotor seleccionado tiene un circuito integrado (controlador) dentro de su estructura, por lo que requiere únicamente que se envíe la señal de posición. Se analizan los valores límites a la derecha y a la izquierda; con el sensor acoplado, se puede verificar que el actuador llega a la posición requerida, la recolección de datos y el cálculo de errores se observa en la Tabla 66 y Tabla 67.

Tabla 66 Controlador Servomotor - Límite Derecha

Herramienta: Potenciómetro Rotatorio y Arduino			Prueba 1	Derecha	
Valor Requerido (Setpoint) (°)	Medida del sensor (0-1023)	Medida del sensor (°)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcent
20,28	622,00	19,83	0,45	0,02	2,22%
20,28	624,00	20,73	0,45	0,02	2,22%
20,28	620,00	18,93	1,35	0,07	6,67%
20,28	622,00	19,83	0,45	0,02	2,22%
20,28	625,00	21,18	0,90	0,04	4,44%
20,28	625,00	21,18	0,90	0,04	4,44%
20,28	623,00	20,28	0,00	0,00	0,00%
20,28	625,00	21,18	0,90	0,04	4,44%
20,28	623,00	20,28	0,00	0,00	0,00%
20,28	628,00	22,53	2,25	0,11	11,11%
20,28	627,00	22,08	1,80	0,09	8,89%
Promedios		20,73	0,86	0,04	4,24%

Tabla 67 Controlador Servomotor - Límite Izquierda

Herramienta: Potenciómetro Rotatorio y Arduino			Prueba 2	Izquierda	
Valor Requerido (Setpoint) (°)	Medida del sensor (0-1023)	Medida del sensor (rps)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
17,77	518,00	17,20	0,57	0,03	3,23%
17,77	517,00	17,48	0,29	0,02	1,61%
17,77	519,00	16,91	0,86	0,05	4,84%
17,77	521,00	16,34	1,43	0,08	8,06%
17,77	520,00	16,62	1,15	0,06	6,45%
17,77	519,00	16,91	0,86	0,05	4,84%
17,77	517,00	17,48	0,29	0,02	1,61%
17,77	516,00	17,77	0,00	0,00	0,00%
17,77	520,00	16,62	1,15	0,06	6,45%
17,77	518,00	17,20	0,57	0,03	3,23%
17,77	519,00	16,91	0,86	0,05	4,84%
Promedios		17,04	0,73	0,04	4,11%

El error, para ambos casos, indica que el actuador logra llegar a la posición requerida con un error menos al 5% sea al lado derecho o al lado izquierdo, lo que indica dos situaciones:

1. El controlador que posee el actuador trabaja de manera adecuada.
2. Debido a la manera en la que se tiene acoplado potenciómetro rotatorio y la forma de uso, es posible decir que el sensor cumple con su objetivo, de permitir conocer cuál es la posición en la que se encuentra el actuador y estimar el ángulo de las ruedas.

Tabla 68 Pruebas en Circunferencia

Herramienta: Matlab							Prueba 1	Circunferencia	
Punto	Valor Requerido (X) (mm)	Valor Requerido (Y) (mm)	Módulo requerido (mm)	Valor Estimado (X) (mm)	Valor Estimado (Y) (mm)	Módulo Estimado (mm)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
1	-1180,00	1180,00	1668,77	-1198,85	1116,05	1637,93	30,84	0,02	1,85%
2	-2360,00	0,00	2360,00	-2294,83	20,76	2294,92	65,17	0,03	2,76%
3	-1180,00	-1180,00	1668,77	-1153,08	-1122,87	1609,48	26,92	0,02	1,61%
Promedios							40,98	0,02	2,07%

Tabla 69 Pruebas en Parábola

Herramienta: Matlab							Prueba 2	Parábola	
Punto	Valor Requerido (X) (mm)	Valor Requerido (Y) (mm)	Módulo requerido (mm)	Valor Estimado (X) (mm)	Valor Estimado (Y) (mm)	Módulo Estimado (mm)	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
1	-820,00	1590,00	1788,99	-847,37	1678,74	1880,48	91,49	0,05	5,11%
2	-1260,00	1810,00	2205,38	-1279,56	1789,25	2199,70	5,68	0,00	0,26%
3	-1700,00	1590,00	2327,68	-1720,06	1716,27	2429,85	102,17	0,04	4,39%
4	-2510,00	0,00	2510,00	-2518,46	27,18	2518,61	8,61	0,00	0,34%
Promedios							51,99	0,03	2,53%

Tabla 70 Pruebas en Hélice

Punto	Herramienta: Matlab						Error Absoluto	Prueba 3 Error Relativo	Hélice Error Porcentual
	Valor Requerido (X) (mm)	Valor Requerido (Y) (mm)	Módulo requerido (mm)	Valor Estimado (X) (mm)	Valor Estimado (Y) (mm)	Módulo Estimado (mm)			
1	-1180,00	1180,00	1668,77	-1167,96	1153,18	1641,33	27,44	0,02	1,64%
2	-2360,00	0,00	2360,00	-2319,82	-3,45	2319,82	40,18	0,02	1,70%
3	-1180,00	-1180,00	1668,77	-1169,64	-1134,25	1629,29	39,48	0,02	2,37%
4	1030,00	1030,00	1456,64	1093,75	888,19	1408,96	47,68	0,03	3,27%
5	2060,00	0,00	2060,00	1985,21	-9,05	1985,23	74,77	0,04	3,63%
6	1030,00	-1030,00	1456,64	1028,14	-978,26	1419,18	37,46	0,03	2,57%
Promedios							44,50	0,03	2,53%

○ **Controlador de Trayectorias**

Para el análisis de errores en las diferentes trayectorias, se realiza la toma de datos de diversos puntos para cada trayectoria definida (circunferencia, parábola y hélice) y se compara con el valor obtenido mediante la estimación odométrica al pasar por ese punto. Con la debida recolección de datos, se tabulan como se observa en la Tabla 68, Tabla 69 y Tabla 70. En donde se observa que el cálculo del error se da con respecto al módulo que tiene cada punto con respecto al sistema de coordenadas globales.

En función de los resultados obtenidos, se observa que el error en el controlador de trayectorias no sobrepasa del 5%, lo que indica el correcto diseño del mismo, independientemente de la trayectoria definida con la cual se trabaje.

4.3.2.1 Depuración del sistema en base a errores

Al tomar en cuenta los tipos de errores que se generan en el cumplimiento de las trayectorias, hay que saber exactamente en donde se debe corregir la programación; para el error en el que no se logra culminar la gráfica de la trayectoria, requiere que se verifique por completo la programación en *Matlab®*, en la etapa del modo automático, la sintaxis en

la cual se está enviando las órdenes al prototipo hasta que alcance los puntos requeridos en las trayectorias.

Mientras que, para el error en el que se evidencia un pico en la gráfica de la señal controlada, se debe corregir en arduino. Dado que se estarían colando datos, y al limitar el rango de existencia del dato de velocidad, se puede garantizar que si se llegan a colar datos absurdos, que salgan del rango, arduino los desecha sin enviarlos al computador.

4.3.2.2 Cumplimiento de trayectorias programadas en tiempo real

Después de pulir la programación tanto de *Matlab*® y Arduino, dentro de los parámetros expresados en el punto anterior, se verifica que las tres trayectorias ya se cumplen por parte del prototipo.

Para verificar el cumplimiento de cada una de las trayectorias, se hace uso nuevamente de la interfaz gráfica diseñada para el modo automático, en donde se pueden observar los siguientes resultados.

- **Circunferencia** (Figura 146)

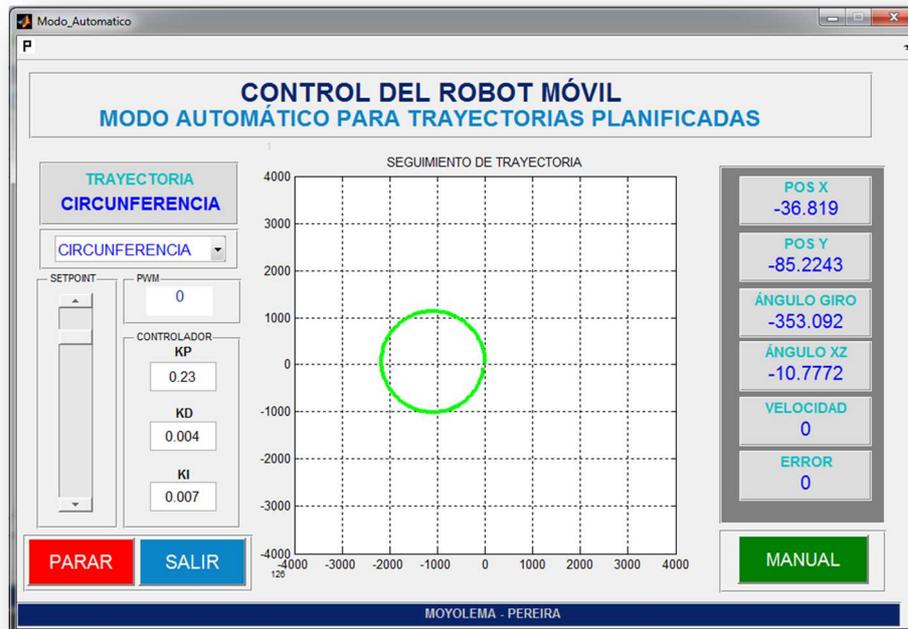


Figura 146 Trazado de Circunferencia en tiempo real

Se puede observar en la gráfica, que la trayectoria trazada, es un círculo de diámetro mayor a 2000 [mm]. Y que el punto final en el que se detuvo el prototipo es (-36.82;-85.22) [mm]. Lo que quiere decir que a esa distancia quedo el prototipo alejado del origen. Las magnitudes, no son extremadamente grandes como para considerar que la trayectoria se haya completado parcialmente, sino que al contrario, la diferencia de posición entre el punto inicial y final permiten deducir que la gráfica se ha trazado de manera correcta.

- **Parábola** (Figura 147)

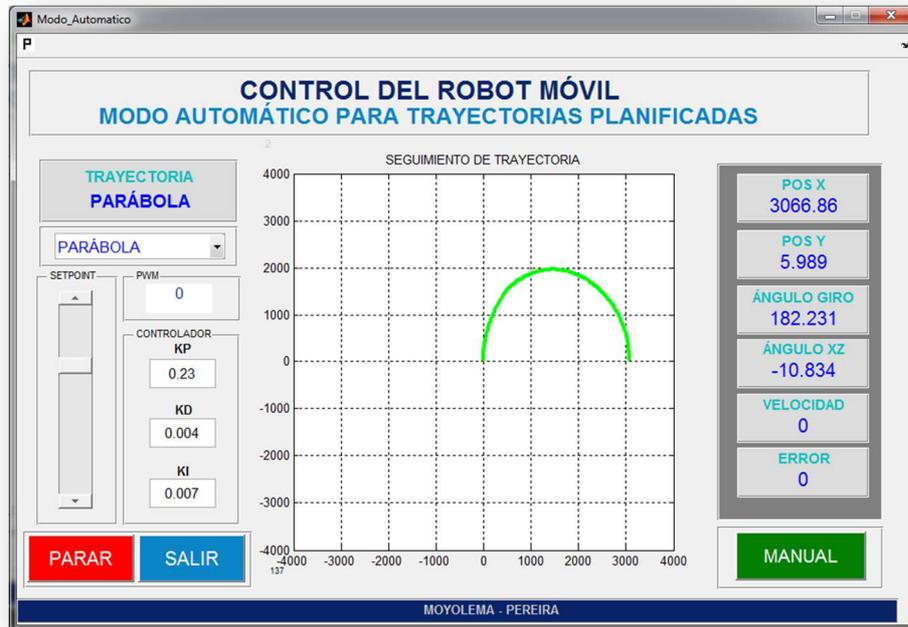


Figura 147 Trazado de Parábola en tiempo real

Con la programación para esta trayectoria, se denota, el cumplimiento de la misma. Al igual que en el caso anterior, la gráfica se considera correcta ya que el punto final es (3066.86; 5.98) mm lo que implica que el prototipo está a cerca de 6mm de cruzar con el eje X imaginario.

- **Hélice** (Figura 148)

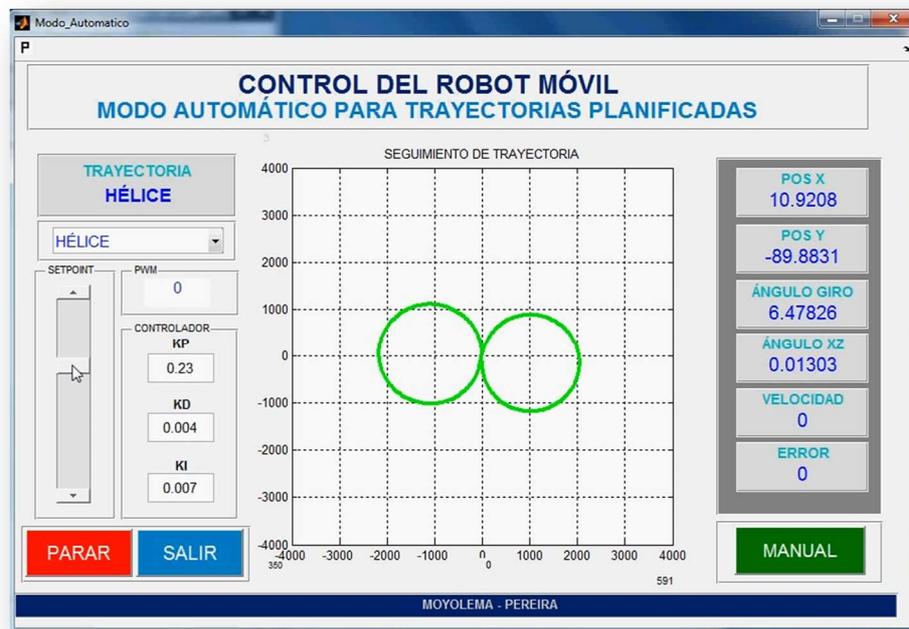


Figura 148 Trazado de Hélice en tiempo real

Por la programación realizada para esta trayectoria, se deduce que matemáticamente es correcta, debido a que el punto final es (314.24; 536.199) [mm]. Sin embargo, en esta trayectoria se puede ya verificar la diferencia entre los radios de los centros instantáneos de curvatura para cada lado, y por esta razón, las dos ramas no son simétricas.

- **Detección de obstáculo** (Figura 149)

Finalmente, se aprecia claramente, el funcionamiento de la interfaz gráfica para el Modo automático, cuando el prototipo tiene un obstáculo a menos de 20 [cm] de proximidad. La ventana auxiliar permite pasar al modo

manual y, físicamente y prototipo no se mueve, ya que se ha enviado la cadena para que se detenga.

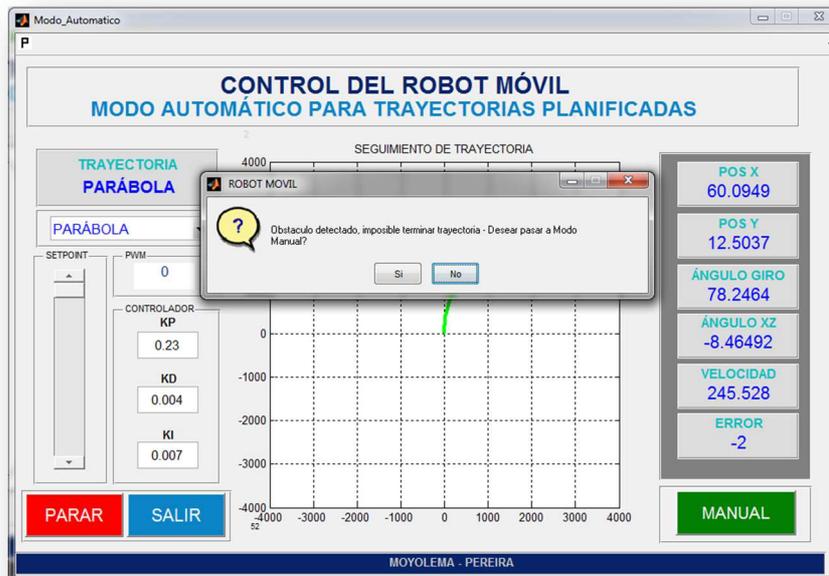


Figura 149 Detección de obstáculos en tiempo real

Capítulo 5.- Análisis Económico y Financiero

En este capítulo, se describe el análisis económico y financiero del prototipo de Robot Móvil “ROMOV”, para lo cual se divide en dos casos de estudio, caso A presenta un análisis para la construcción del prototipo desde cero y el caso B muestra un estudio similar si se adquiere una plataforma de robótica móvil comercial. Después de realizar el análisis se decide cuál de las dos opciones es más económico, óptimo y viable.

5.1 Inversión Inicial del Prototipo – Caso A

5.1.1 Costos Directos

En el análisis de costos directos se toman en cuenta los gastos por materiales, mano de obra, equipos o maquinarias utilizados y transporte, los mismos que se detallan a continuación:

5.1.1.1 Diseño e Ingeniería

Tabla 71 Detalle de gastos de Diseño e Ingeniería

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Subtotal
1	Autor	Horas	450	\$ 3,00	\$ 1.350,00
2	Asesores Profesionales	Horas	25	\$ 20,00	\$ 500,00
3	Asesores Especiales	Horas	20	\$ 30,00	\$ 600,00
				TOTAL	\$ 2.450,00

5.1.1.2 Materiales

Tabla 72 Descripción de Gastos de Elementos Mecánicos

Costos de Elementos Mecánicos - ROMOV			
Elemento	Cantidad	Costo individual	Costo total
Motor DC	1	\$ 352,46	\$ 352,46
Servomotor	1	\$ 332,00	\$ 332,00
Ruedas	4	\$ 10,00	\$ 40,00
Cadena de Rodillos	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Piñones	2	\$ 25,00	\$ 50,00
Bocines	2	\$ 10,00	\$ 20,00
Manzana Eje	1	\$ 5,00	\$ 5,00
Eje de Tracción	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Mecanismo Ackerman			
Dirección	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Estructura	1	\$ 70,00	\$ 70,00
Soportes de elementos electrónicos			
	2	\$ 10,00	\$ 20,00
Pernos M6	8	\$ 0,15	\$ 1,20
Tornillos M6	9	\$ 0,10	\$ 0,90
Tuercas M6	21	\$ 0,10	\$ 2,10
Tornillos M4	20	\$ 0,10	\$ 2,00
Tuercas M4	20	\$ 0,10	\$ 2,00
Disco Encoder	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Eje principal	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Carcasa	1	\$ 60,00	\$ 60,00
TOTAL			\$ 1.067,66

Tabla 73 Descripción de Gastos de Elementos Electrónicos

Costos de Elementos Electrónicos ROMOV			
Elemento	Cantidad	Costo individual	Costo total
Bateria LiPo 2650mA - 3 celdas	2	\$ 30,00	\$ 60,00
Bateria LiPo 2500mA - 4 celdas	2	\$ 35,00	\$ 70,00
Placa de Relés	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Convertor Elevador DC - DC	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Convertor Reductor DC - DC (12v - 5v)	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Acelerómetro con acondicionamiento	1	\$ 17,00	\$ 17,00
Encoder con acondicionamiento	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Potenciómetro Rotatorio	1	\$ 0,25	\$ 0,25
Sensor ultrasónico HC-SR04	4	\$ 9,80	\$ 39,20
Arduino MEGA	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Shield XBEE	1	\$ 15,00	\$ 15,00
XBEE	2	\$ 40,00	\$ 80,00
Adaptador XBEE - CPU	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Motor Driver VNH 5019	1	\$ 35,00	\$ 35,00
Borneras	32	\$ 0,15	\$ 4,80
Fusible + portafusible	3	\$ 0,50	\$ 1,50
Conectores Macho - Hembra	26	\$ 0,23	\$ 5,98
Switch Panel	1	\$ 0,50	\$ 0,50
Cable 22 AWG	10	\$ 0,35	\$ 3,50
		TOTAL	\$ 507,73

Tabla 74 Costo total de los materiales

Materiales	Valor
Mecánicos	\$ 1.067,66
Electrónicos	\$ 507,73
TOTAL	\$ 1.575,39

El costo total por materiales para el prototipo de Robot Móvil se presenta en la Tabla 74.

5.1.1.3 Maquinaria y Equipos Utilizados

Tabla 75 Descripción de los Costos de Maquinaria y Equipos

Maquina/Equipo	Costo/Hora	Horas Equipo	Costo Total
Torno	\$ 15,00	10	\$ 150,00
Fresadora	\$ 12,00	6	\$ 72,00
Soldadora	\$ 10,00	2	\$ 20,00
Dobladora	\$ 5,00	1	\$ 5,00
Moladora	\$ 5,00	2	\$ 10,00
Taladro de Banco	\$ 5,00	5	\$ 25,00
Caladora	\$ 5,00	2	\$ 10,00
Esmeril	\$ 5,00	2	\$ 10,00
Compresor	\$ 3,00	4	\$ 12,00
Otros Equipos			\$ 50,00
TOTAL			\$ 364,00

5.1.1.4 Costos de Mano de Obra

Tabla 76 Descripción Mano de Obra

No.	Trabajador	Salario/Hora	Horas	Costo
1	Técnico en Torno	\$ 5,00	10	\$ 50,00
2	Técnico en Metalmecánica	\$ 5,00	12	\$ 60,00
3	Técnico en Fresadora	\$ 5,00	6	\$ 30,00
4	Técnico Soldador	\$ 6,00	2	\$ 12,00
TOTAL				\$ 152,00

5.1.2 Costos Indirectos

Tabla 77 Descripción de los Gastos Generales

Descripción	Valor
Gastos Administrativos	\$ 75,00
Materiales de Oficina	\$ 50,00
Transporte	\$ 80,00
Tecnología de Información	\$ 60,00
Alquiler de Taller	\$ 50,00
Servicios Básicos	\$ 75,00
Otros	\$ 50,00
TOTAL	\$ 440,00

5.1.3 Presupuesto Total

Tabla 78 Descripción del Presupuesto Total

Descripción	Subtotal
<u>Costos Directos</u>	
Tabla 71	\$ 2.450,00
Tabla 74	\$ 1.575,39
Tabla 75	\$ 364,00
Tabla 76	\$ 152,00
<u>Costos Indirectos</u>	
Tabla 77	\$ 440,00
SUBTOTAL	\$ 4.981,39
Imprevistos (3,5%)	\$ 174,35
COSTO TOTAL	\$ 5.155,74

5.2 Inversión de la Plataforma Comercial – Caso B

La Tabla 79 presenta el valor inicial que se debe destinar para adquirir una plataforma comercial (Ver Anexo L).

Tabla 79 Costo Plataforma Comercial

Plataforma comercial	Costo
Pioneer 3-AT Mobile Robot Base	\$ 6495.00

5.3 Análisis Económico

En el análisis económico se estudia los ingresos y egresos que presenta el proyecto, y se realiza una comparativa entre el presente prototipo y una plataforma comercial (Tabla 79) con características semejantes al nuestro.

5.1.1 Ingresos económicos

La Tabla 80 nos brinda la idea clara del uso que los estudiantes darán al equipo, y en términos monetarios cuanto representa como ingreso o

recuperación de la inversión. El análisis de los ingresos es válido tanto para el uso del prototipo construido como para la plataforma comercial.

Tabla 80 Ingresos Económico Primer Periodo

ANÁLISIS ECONÓMICO DE INGRESOS				
Servicios	Número de alumnos	Costo crédito por Práctica	Número de Prácticas	Total
Uso del ROMOV				
Total Semestral	50	\$5	2	\$500
Total Anual	100	\$5	2	\$1000
TOTAL INGRESOS MENSUAL	\$ 83,33			
TOTAL INGRESOS ANUAL	\$ 1000,00			

5.1.2 Egresos

5.1.2.1 Depreciación

La Tabla 81 nos muestra el valor que tiene la construcción del prototipo, y la depreciación tanto mensual como anual del mismo, estableciendo como parámetro una vida útil de un periodo de 10 años.

Tabla 81 Tabla de Depreciación ROMOV

Depreciación	
Valor inicial	\$5.155,74
Valor residual	\$515,57
Variación	\$4.640,17
Número Años	10
Depreciación anual	\$464,02
Depreciación mensual	\$38,67

De igual manera, en la Tabla 82 se muestra el mismo análisis de depreciación para la plataforma Pioneer.

Tabla 82 Tabla de Depreciación Robot Pioneer

Depreciación	
Valor inicial	\$6495,00
Valor residual	\$649,50
Variación	\$5845,50
Número Años	10
Depreciación anual	\$584,55
Depreciación mensual	\$48,71

5.1.2.2 Costos de Mantenimiento

La Tabla 83 describe los costos de mantenimiento tanto correctivo y preventivo que requieren el prototipo ROMOV y los mismos costos aplicarían a la plataforma PIONEER durante dos semestres de estudio, o un año calendario.

Tabla 83 Costo de Mantenimiento

Costos de Mantenimiento (anual)	
Mantenimiento correctivo	\$200,00
Mantenimiento preventivo	\$50,00
Total	\$250,00

5.1.3 Beneficio

La Tabla 84 muestra el resultado obtenido entre la sustracción del ingreso anual con respecto a los costos de mantenimiento y la depreciación, para el prototipo ROMOV.

Tabla 84 Beneficio General ROMOV

Beneficio general	
Mantenimiento correctivo	\$ 200,00
Mantenimiento preventivo	\$ 50,00
Total mantenimiento	\$ 250,00
Depreciación anual	\$ 464,02
Depreciación mensual	\$ 38,67
Ingreso anual	\$ 1.000,00
Beneficio anual	\$ 285,98

Mientras que en la Tabla 85 se muestra el beneficio general que genera la plataforma PIONEER.

Tabla 85 Beneficio General PIONEER

Beneficio general	
Mantenimiento correctivo	\$ 200,00
Mantenimiento preventivo	\$ 50,00
Total mantenimiento	\$ 250,00
Depreciación anual	\$ 584,55
Depreciación mensual	\$ 48,71
Ingreso anual	\$ 1.000,00
Beneficio anual	\$ 167,45

5.1 Evaluación del proyecto

Los métodos de evaluación de proyectos toman en cuenta el valor del capital, activos y ganancias a lo largo del tiempo, se usa métodos matemáticos financieros, los mismos que si son aplicados correctamente nos brindan la capacidad de decidir si el proyecto es viable y rentable.

5.1.1 VAN (Valor Actual Neto)

Es un proceso que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La Tabla 86 indica el cálculo del VAN para el prototipo ROMOV, mientras que la

Tabla 87 indica para la plataforma PIONEER.

Tabla 86 Cálculo del VAN prototipo ROMOV

CALCULO DEL VAN					
0	1	2	3	4	5
AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
-5.156	750,00	850,00	960,00	1081,00	1227,41
15,00%	652,17	642,72	631,22	618,07	610,24
	652,17	1294,90	1926,11	2544,18	3154,42

6	7	8	9	10
AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
1389,93	1570,32	1770,55	1992,81	2239,52
600,90	590,34	578,80	566,48	553,58
3755,32	4345,66	4924,46	5490,94	6044,51

Tabla 87 Cálculo de VAN plataforma PIONEER

CALCULO DEL VAN					
0	1	2	3	4	5
AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
-6.495	750,00	850,00	960,00	1081,00	1227,41
15,00%	652,17	642,72	631,22	618,07	610,24
	652,17	1294,90	1926,11	2544,18	3154,42

6	7	8	9	10
AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
1389,93	1570,32	1770,55	1992,81	2239,52
600,90	590,34	578,80	566,48	553,58
3755,32	4345,66	4924,46	5490,94	6044,51

5.1.2 TIR (Tasa Interna de Retorno)

El TIR viene a ser la tasa de interés en la que el VAN sería cero. Si el TIR es alto, esto determina que el proyecto es rentable, lo que da lugar a suponer un retorno de la inversión. Esta “Tasa” se calcula bajo método iterativo variando los valores de la tasa en el año 0.

5.1.3 Beneficio Costo y Rentabilidad

En la Tabla 88 se observan los valores de VAN, TIR, Beneficio – Costo y rentabilidad para el prototipo ROMOV. Mientras que en la Tabla 89, se observan los mismo aspectos para la plataforma PIONEER.

En ambos casos, se puede ver que todos los valores que tenemos son positivos de modo que podemos afirmar que para ambos el proyecto es rentable, y la construcción del prototipo o la adquisición de la plataforma genera beneficio costo.

Tabla 88 VAN, TIR, Beneficio Costo y Rentabilidad prototipo ROMOV

VAN	888,77
TIR	18,55%
B/C	\$ 1,17
RENTABILIDAD	17%

Tabla 89 VAN, TIR, Beneficio Costo y Rentabilidad plataforma PIONEER

VAN	-450,49
TIR	13,48%
B/C	\$ 0,86
RENTABILIDAD	-6%

Sin embargo, los valores tanto del VAN, TIR, Beneficio – Costo y Rentabilidad, son mayores para el prototipo ROMOV. Por lo cual, al visualizar ambas tablas se asevera que el diseño y la construcción del prototipo permite obtener un robot con las cualidades necesarias para ser una plataforma versátil para el uso en el Laboratorio de Robótica y a su vez, genera mayor beneficio costo y una mayor rentabilidad de modo que conlleva ahorro, con respecto a la adquisición de un robot comercial, ya que este no alcanza a recuperar su inversión a los 10 años.

Capítulo 6.- Conclusiones y Recomendaciones

Realizado el diseño total del prototipo, las pruebas y la validación del mismo; así como los resultados obtenidos en el proyecto. Las conclusiones obtenidas y las recomendaciones se detallan en este capítulo, para poder tomar esto como punto de partida para realizar las posibles mejoras del robot móvil.

6.1 Conclusiones

- El prototipo de robot móvil ROMOV V1.0 diseñado y construido es capaz de soportar la carga de 10 kilogramos extra al peso propio del prototipo, gracias al correcto diseño y dimensionamiento de los ejes, plataforma, soportes, eje de tracción y mecanismo Ackerman de la dirección.
- A partir del modelado del comportamiento cinemático, es posible generar los algoritmos de programación necesarios para el trazado de trayectorias como circunferencia, parábola y hélice dentro del software Matlab, mediante una interfaz gráfica HMI.
- La solución implementada mediante el uso de sensores ultrasónicos HC-SR04 satisface la percepción de entorno para la detección de

obstáculos desde 20 centímetros hasta 2 metros de distancia en línea recta, con un error de medición del 2%.

- La alternativa propuesta para sensar la inclinación de la superficie mediante un acelerómetro MMA7361L, cumple con la medición del ángulo de inclinación, el mismo que varía desde cero hasta 30 grados pendiente, con un error del 3.94% en su estimación; de igual manera, los sensores internos implementados, potenciómetro rotatorio y sensor óptico con encoder, permiten estimar la posición del prototipo en función de las señales enviadas al controlador.
- La placa de acondicionamiento del acelerómetro, regulador de voltaje y los dispositivos seleccionados como drivers de motores, conversores de voltaje y placas de relés, permiten que el prototipo sea capaz de interpretar las señales de los sensores y a su vez, enviar las órdenes de control a los actuadores del robot, mediante un Arduino Mega 2560, ya que debido a su velocidad de procesamiento, su arquitectura y hardware compatible con elementos electrónicos permiten que la etapa electrónica del prototipo sea sólida y útil dentro de los parámetros de funcionamiento del prototipo.
- El uso de módulos de comunicación inalámbrica XBEE, permiten tener una comunicación serial full dúplex de hasta 20 metros de distancia entre el prototipo y el computador portátil, para que de esta manera, tener acceso a los datos del robot en tiempo real; evitando el uso de cables.

- Los algoritmos de control, implementados para el trazado de las trayectorias como circunferencia, parábola y hélice, satisfacen la condición de odometría, debido a que en función de las señales de los sensores internos se puede monitorear el cumplimiento de las trayectorias implementadas mediante un HMI de monitoreo y control.
- Las trayectorias definidas tales como circunferencia, parábola y hélice son trazadas sin inconvenientes por el prototipo, a una velocidad máxima controlada de 12.5 metros por minuto, con errores de 2.07%, 2.53% y 2.53% para diferentes velocidades seleccionadas.
- Las interfaces gráficas (HMI), diseñadas tanto para la obtención de la planta del prototipo, el control manual y el control automático del robot, coinciden en la facilidad de uso de las mismas para el usuario; así como también entregan información dinámica del estado del robot (velocidad, posición, ángulo de giro, ángulo de inclinación de la superficie y error de la acción de control) y la trayectoria que se encuentre trazando.
- La construcción e implementación del robot móvil, con tracción posterior y dirección Ackerman, sirve como un prototipo didáctico para pruebas dentro del Laboratorio de Robótica Industrial del DECEM de la Universidad de las Fuerzas Armadas, tanto para aplicaciones de robótica móvil como para poder experimentar

didácticamente las distintas áreas que conforman la Mecatrónica; esto debido a las diferentes pruebas experimentales realizadas.

6.2 Recomendaciones

- Considerando que la configuración Ackerman para la dirección del prototipo, permite evitar el derrape de las ruedas y a su vez desplazarse sobre superficies regulares con inclinación; es importante, en lo posible tratar de trabajar con el prototipo sobre superficies de rozamiento constante, en las cuales se evite el deslizamiento de las ruedas, ya que este inconveniente impide una correcta estimación odométrica acerca de la posición y la trayectoria que el prototipo ha recorrido.
- En el caso de mejorar el prototipo se puede reemplazar el controlador Arduino por un computador a bordo, y realizar una comunicación entre los dos computadores, para lo cual se ha previsto dejar el espacio suficiente dentro del robot y utilizar conectores desmontables (conectores macho-hembra y borneras) para dicho cambio; garantizando de esta manera que el computador embebido en el prototipo no tenga problemas en transmisión y recepción de datos.
- El prototipo final consta de sensores internos que permiten conocer las magnitudes de los elementos asociados al robot, como son la velocidad del eje de tracción y el ángulo que han girado las llantas

delanteras, los cuales generan una estimación odométrica satisfactoria; sin embargo, se podría mejorar el desempeño del prototipo, utilizando sensores ópticos sobre las ruedas del eje de tracción o para tener una mejor estimación utilizando dispositivos electrónicos de alta gama como un GPS.

- El uso del modelo cinemático para la programación de los algoritmos de control, permite tener una estimación odométrica muy acorde a lo establecido en las condiciones del prototipo; pero se puede mejorar su estimación añadiendo el comportamiento dinámico del robot en su modelamiento, con ello se reduciría los errores en las estimaciones odométrica causadas por la dinámica lateral del robot.

Referencias Bibliográficas

- AMAYA, G. A. (2010). *Ambiente Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa en Escenarios Estructurados*. Medellín.
- BOSH, R. (1999). *Manual de la Técnica del automóvil* (Tercera ed.). Reverte S.A.
- BUECHER. (s.f.). Recuperado el 10 de 10 de 2012, de http://bilder.buecher.de/zusatz/15/15093/15093478_lese_1.pdf
- CABRERA, A. B. (2011). *Evolución de la robótica en el mundo*. México DF.
- MONTAÑO, J. J. (2008). *Móvil Escalador Autónomo*. Puebla.
- NORTON, R. (2011). *Diseño de Máquinas*. Pearson.
- OLLERO, A. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: MARCOMBO S.A.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (Agosto de 2011). *Conceptos Básicos Sobre Diseño de Máquinas*. Obtenido de Capítulo 3: <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2011/08/Cap3.pdf>
- VARGAS, J. E. (2007). *Metodología en Proyectos Mecatrónicos Industriales*. Paper, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro.

Anexos

- A. Planos Mecánicos**
- B. Datasheet Arduino Mega 2560**
- C. Datasheet Atmega 2560 (Registro Utilizados)**
- D. Datasheet Sensor Ultrasónico HC-SR04**
- E. Datasheet Acelerómetro MMA7361L**
- F. Datasheet Encoder Óptico**
- G. Datasheet del Módulo de RF XBEE**
- H. Hoja Técnica Motoreductor DC (Tracción)**
- I. Hoja Técnica Servomotor Torxis (Dirección)**
- J. Catalogo Cadena**
- K. Hojas de Procesos**
- L. Lista de Precios de Robot Móviles Comerciales**

ANEXO A

PLANOS MECÁNICOS

ANEXO B
DATASHEET ARDUINO
MEGA 2560

ANEXO C
DATASHEET ATMEGA
2560 (REGISTROS)

ANEXO D

DATASHEET SENSOR
ULTRASÓNICO HC-SR04

ANEXO E
DATASHEET
ACELERÓMETRO
MMA7361L

ANEXO F
DATASHEET ENCODER
ÓPTICO

ANEXO G
DATASHEET MÓDULO DE
RF XBEE

ANEXO H
HOJA TÉCNICA
MOTOREDUCTOR DC
(TRACCIÓN)

ANEXO I
HOJA TÉCNICA
SERVOMOTOR TORXIS
(DIRECCIÓN)

ANEXO J
CATÁLOGO DE CADENA
DE RODILLOS

ANEXO K
HOJAS DE PROCESOS Y
SOLDADURA

ANEXO L

LISTA DE PRECIOS DE
ROBOTS COMERCIALES