



**Ingeniería de concepto, básica y de detalle para el diseño y construcción de robots de competencia**

Fajardo Sarmiento, Emilia Nathaly

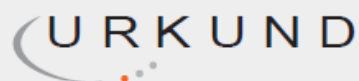
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica, Automatización  
y Control

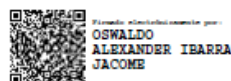
Ing. Ibarra Jácome, Oswaldo Alexander, Msc.

16 de marzo del 2021



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS EMILIA FAJARDO.pdf (D98764938)  
**Submitted:** 3/18/2021 1:39:00 PM  
**Submitted By:** oaibarra@espe.edu.ec  
**Significance:** 3 %



### Sources included in the report:

URKUND.docx (D80608532)  
 PROYECTO2\_GRUPO6.pdf (D53820960)  
 TESIS ARDUINO.pdf (D24580162)  
 Trabajo de Titulación Ciza Morales.docx (D87915618)  
 José\_Mieles\_Final.docx (D63758880)  
 1548352684\_153\_\_Informe\_Final\_Proyecto\_GrupoSade.docx (D47225377)  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7205676.pdf>  
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v28n5/art08.pdf>  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16546/1/CD-7210.pdf>  
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/22355/1/AhumadaSalcedoErickYoan.pdf>  
<https://docplayer.es/86882175-Universidad-catolica-de-santiago-de-guayaquil.html>  
<https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1297/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19167/1/UPS%20-%20TTS107.pdf>

### Instances where selected sources appear:

33



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “Ingeniería de concepto, básica y de detalle para el diseño y construcción de robots de competencia” fue realizado por la señorita Fajardo Sarmiento Emilia Nathaly, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de marzo del 2021

Firma:



Verificar autenticidad de la firma por:  
OSWALDO  
ALEXANDER IBARRA  
JÁCOME

.....  
**IBARRA JÁCOME, OSWALDO ALEXANDER**

C. C: 1719535427



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Fajardo Sarmiento Emilia Nathaly**, con cédula de ciudadanía n° 175149457-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Ingeniería de concepto, básica y de detalle para el diseño y construcción de robots de competencia**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 16 de marzo del 2021

Firma

**FAJARDO SARMIENTO EMILIA NATHALY**

C.C.: 175149457-4



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Fajardo Sarmiento Emilia Nathaly**, con cédula de ciudadanía n° 175149457-4, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Ingeniería de concepto, básica y de detalle para el diseño y construcción de robots de competencia**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de marzo del 2021

Firma  


**FAJARDO SARMIENTO EMILIA NATHALY**

C.C.: 175149457-4

### **Dedicatoria**

A mis padres y mi hermana que me acompañaron en este recorrido, me dieron su comprensión y cariño para que pueda cumplir mis sueños; en especial a mi madre Hermosina que ha sido mi gran apoyo y que con todo su amor me acompañó en este camino.

A mi querida tía Esilda que, aunque no esté junto a mí me entendió como nadie más, me dio su amor incondicional y siempre creyó en mí, aunque yo no lo hiciera.

A mi valiente Valentina que desde que nació con su alegría y amor me hizo querer ser mejor y nunca desistir, espero que un día seas una gran persona y logres tus metas y sueños.

Finalmente, a los estudiantes que luchan día a día por lo que quieren, aunque parezcan inalcanzable al principio no decaigan ante los obstáculos.

### **Agradecimiento**

A mis padres Luis y Hermosina que me apoyaron en cada paso, en cada mala noche, en mis tristezas y alegrías, gracias por estar siempre ahí, a mi hermana Lizeth que con su experiencia me ayudó en esta etapa de mi vida; a Amada y Juan Francisco que han sido un apoyo incondicional desde siempre y han sido parte de mis logros y fracasos.

A mi familia que a pesar de estar lejos me apoyó, Humberto, Lourdes que me ayudaron y aconsejaron cuando yo más necesitaba a alguien, a mis tías Magdalena y Esilda que han sido el ejemplo de mujeres fuertes y valientes que siempre quiero seguir.

A mis amigos Liz, Ronnie y Cris que fueron mis compañeros en este viaje lleno de locuras, risas y llantos muchas gracias por no dejar que desistiera en mis momentos más difíciles.

A excelentes profesores que además de ser docentes fueron para mí una inspiración para lograr cosas más grandes, a mi tutor de tesis el Ingeniero Alexander Ibarra que confió en mí y me ayudó en la culminación de mi carrera universitaria.

## Índice de Contenido

<i>Certificación</i> .....	3
<i>Responsabilidad de autoría</i> .....	4
<i>Autorización de publicación</i> .....	5
<i>Dedicatoria</i> .....	6
<i>Agradecimiento</i> .....	7
<i>Índice de Tablas</i> .....	16
<i>Índice de Figuras</i> .....	21
<i>Resumen</i> .....	24
<i>Abstract</i> .....	25
<i>Capítulo I</i> .....	26
<i>Introducción</i> .....	26
<i>Antecedentes</i> .....	26
<i>Justificación e importancia</i> .....	29
<i>Alcance del proyecto</i> .....	31
<i>Objetivos</i> .....	32
Objetivo general.....	32
Objetivos específicos.....	32



<b>Capítulo II</b> .....	<b>33</b>
<b>Fundamentación teórica</b> .....	<b>33</b>
<b>Robótica de competencia</b> .....	<b>33</b>
<b>Concurso ecuatoriano de robótica (CER)</b> .....	<b>34</b>
<b>Categorías del Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER)</b> .....	<b>35</b>
Seguidor de línea:.....	43
Resuelve laberintos:.....	44
Balancín:.....	45
Mini sumo autónomo:.....	46
Batalla Simulada .....	48
<b>Capítulo III</b> .....	<b>49</b>
<b>Desarrollo</b> .....	<b>49</b>
<b>Ingeniería de concepto</b> .....	<b>51</b>
<b>Ingeniería básica</b> .....	<b>53</b>
<b>Ingeniería de detalle</b> .....	<b>54</b>
<b>Ingeniería del robot seguidor de línea categoría destreza</b> .....	<b>55</b>
Ingeniería de concepto del robot seguidor de línea categoría destreza .....	56
Identificar las necesidades del cliente.....	56
Establecer especificaciones objetivo.....	56
Generación de conceptos.....	58

Selección del concepto.....	61
Ingeniería básica del robot seguidor de línea categoría destreza .....	69
Esquema del prototipo.....	69
Características de funcionamiento.....	69
Sistema de control.....	72
Disposición geométrica aproximada .....	85
Lista de materiales.....	86
Presupuesto tentativo .....	86
Ingeniería a detalle del robot seguidor de línea categoría destreza .....	87
Planos eléctricos.....	87
Diagrama de flujo .....	88
Pseudocódigo .....	89
<b>Ingeniería del robot seguidor de línea categoría velocidad.....</b>	<b>90</b>
Ingeniería de concepto del robot seguidor de línea categoría velocista .....	91
Identificar las necesidades del cliente.....	91
Establecer especificaciones objetivo.....	91
Generación de conceptos.....	94
Selección del concepto.....	98
Ingeniería básica del robot seguidor de línea categoría velocista .....	106
Esquema del prototipo.....	106

Características de funcionamiento.....	106
Sistema de control.....	108
Disposición geométrica aproximada .....	119
Lista de materiales.....	119
Presupuesto tentativo .....	120
Ingeniería a detalle del robot seguidor de línea categoría velocista .....	121
Planos eléctricos.....	121
Diagrama de flujo .....	122
Pseudocódigo .....	123
<b>Ingeniería del robot resuelve laberintos .....</b>	<b>124</b>
Ingeniería de concepto del robot resuelve laberintos.....	125
Identificar las necesidades del cliente.....	125
Establecer especificaciones objetivo.....	126
Generación de conceptos.....	128
Selección del concepto.....	131
Ingeniería básica del robot resuelve laberintos.....	140
Esquema del prototipo.....	140
Características de funcionamiento.....	140
Sistema de control.....	145
Disposición geométrica aproximada .....	148

Lista de materiales.....	149
Presupuesto tentativo.....	150
Ingeniería a detalle del robot resuelve laberintos .....	151
Planos eléctricos.....	151
Diagrama de flujo .....	153
Pseudocódigo .....	155
<b>Ingeniería del robot balancín .....</b>	<b>158</b>
Ingeniería de concepto del robot balancín .....	159
Identificar las necesidades del cliente.....	159
Establecer especificaciones objetivo.....	159
Generación de conceptos.....	162
Selección del concepto.....	164
Ingeniería básica del robot balancín .....	167
Esquema del prototipo.....	167
Características de funcionamiento.....	167
Sistema de control.....	169
Disposición geométrica aproximada .....	178
Lista de materiales.....	179
Presupuesto tentativo .....	180
Ingeniería a detalle del robot balancín .....	181

Planos eléctricos.....	181
Diagrama de flujo .....	182
Pseudocódigo .....	183
<b>Ingeniería del robot mini sumo .....</b>	<b>184</b>
Ingeniería de concepto del robot mini sumo .....	185
Identificar las necesidades del cliente.....	185
Establecer especificaciones objetivo.....	185
Generación de conceptos.....	187
Selección del concepto.....	190
Ingeniería básica del robot mini sumo.....	194
Esquema del prototipo.....	194
Características de funcionamiento.....	194
Sistema de control.....	195
Disposición geométrica aproximada .....	197
Lista de materiales.....	197
Presupuesto tentativo .....	198
Ingeniería a detalle del robot mini sumo .....	199
Planos eléctricos.....	199
Diagrama de flujo .....	200
Pseudocódigo .....	202

<b>Guía metodología para la utilización de software robot arena 2 .....</b>	<b>204</b>
Introducción .....	204
Instalación .....	204
Requisitos mínimos del sistema .....	205
Entorno del software .....	206
EXHIBITION .....	207
TEAM HQ .....	207
MULTIPLAYER .....	208
BARRA DE TAREAS .....	208
Creación de un nuevo equipo .....	210
Creación de nuevo robot.....	212
Creación de robot para competir en CER 2019 categoría batalla simulada. ....	223
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>234</b>
<b>Pruebas .....</b>	<b>234</b>
<b>Pruebas y resultados robot seguidor de línea categoría destreza.....</b>	<b>234</b>
<b>Pruebas y resultados: Robot seguidor de líneas categoría velocista .....</b>	<b>236</b>
<b>Pruebas y resultados: Robot resuelve laberintos.....</b>	<b>238</b>
<b>Pruebas y resultados: Robot balancín.....</b>	<b>243</b>
<b>Pruebas y resultados: Robot mini sumo .....</b>	<b>245</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>249</b>

<b>Recomendaciones.....</b>	<b>250</b>
<b>Trabajos Futuros.....</b>	<b>250</b>
<b><i>Fuentes Bibliográficas .....</i></b>	<b>251</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Información sobre categorías disponibles en el Concurso Ecuatoriano de Robótica 2019 .....	36
<b>Tabla 2</b> Sistemas de locomoción disponibles para robots.....	49
<b>Tabla 3</b> Configuraciones para ruedas .....	50
<b>Tabla 4</b> <i>Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría destreza</i> .....	55
<b>Tabla 5</b> <i>Necesidades en un prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza</i> .....	56
<b>Tabla 6</b> Métrica para especificaciones del robot seguidor de línea categoría destreza.....	57
<b>Tabla 7</b> Métricas de robots comerciales del robot seguidor de línea categoría destreza.....	57
<b>Tabla 8</b> Valores establecidos de métricas del robot seguidor de línea categoría destreza .....	58
<b>Tabla 9</b> Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot seguidor de línea categoría destreza.....	59
<b>Tabla 10</b> Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente del robot seguidor de línea categoría destreza .....	60
<b>Tabla 11</b> Ponderación de hardware disponible para robot seguidor de línea categoría destreza .....	61
<b>Tabla 12</b> Ponderación de microcontroladores disponibles para robot seguidor de línea categoría destreza.....	62
<b>Tabla 13</b> Ponderación sensores disponibles para prototipo de seguidor de línea categoría destreza.....	63
<b>Tabla 14</b> Combinación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza.....	64
<b>Tabla 15</b> Características concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza.....	65



<b>Tabla 16</b>	Desarrollo concepto uno del robot seguidor de línea categoría destreza.....	65
<b>Tabla 17</b>	Características concepto dos del robot seguidor de línea categoría destreza .....	65
<b>Tabla 18</b>	Desarrollo concepto dos del robot seguidor de línea categoría destreza .....	66
<b>Tabla 19</b>	Evaluación de conceptos del robot seguidor de línea categoría destreza.....	66
<b>Tabla 20</b>	Comparación de respuesta de controladores .....	84
<b>Tabla 21</b>	Comparación de parámetros de controladores con valores marginales e ideales.....	85
<b>Tabla 22</b>	Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza.....	86
<b>Tabla 23</b>	Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza .	86
<b>Tabla 24</b>	Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría velocidad .....	90
<b>Tabla 25</b>	Necesidades en un prototipo seguidor de línea categoría velocista .....	91
<b>Tabla 26</b>	Métrica para especificaciones del robot seguidor de línea categoría velocista .....	92
<b>Tabla 27</b>	Métricas de robots comerciales del robot seguidor de línea categoría velocista .....	93
<b>Tabla 28</b>	Valores establecidos de métricas del robot seguidor de línea categoría velocista .....	94
<b>Tabla 29</b>	Chasis y ruedas disponibles comercialmente para robot seguidor de línea categoría velocista .....	95
<b>Tabla 30</b>	Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente para robot seguidor de línea categoría velocista .....	96
<b>Tabla 31</b>	Ponderación de hardware disponible para robot seguidor de línea categoría velocista .....	98
<b>Tabla 32</b>	Ponderación de microcontroladores disponibles para robot seguidor de línea categoría velocista .....	99
<b>Tabla 33</b>	Ponderación de sensores disponibles para para robot seguidor de línea categoría velocista .....	100

<b>Tabla 34</b> Combinación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	101
<b>Tabla 35</b> Características concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	102
<b>Tabla 36</b> Desarrollo concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	102
<b>Tabla 37</b> Características concepto dos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	103
<b>Tabla 38</b> Desarrollo concepto dos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	103
<b>Tabla 39</b> Evaluación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	104
<b>Tabla 40</b> Comparación de parámetros de controladores con valores marginales e ideales.....	118
<b>Tabla 41</b> Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	119
<b>Tabla 42</b> Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista .....	120
<b>Tabla 43</b> Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría velocidad .....	124
<b>Tabla 44</b> Necesidades en un prototipo de robot resuelve laberintos .....	125
<b>Tabla 45</b> Métrica para especificaciones del robot resuelve laberintos .....	126
<b>Tabla 46</b> Métricas de robots comerciales del robot resuelve laberintos .....	127
<b>Tabla 47</b> Valores establecidos de métricas del robot resuelve laberintos .....	128
<b>Tabla 48</b> Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot resuelve laberintos.....	129

<b>Tabla 49</b> Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente del robot resuelve laberintos .....	130
<b>Tabla 50</b> Ponderación de hardware disponible para robot resuelve laberintos .....	131
<b>Tabla 51</b> Ponderación de microcontroladores disponibles para robot resuelve laberintos .....	132
<b>Tabla 52</b> Ponderación de sensores disponibles para prototipo de resuelve laberintos .....	133
<b>Tabla 53</b> Combinación de conceptos para prototipo de robot resuelve laberintos.....	135
<b>Tabla 54</b> Características concepto uno para prototipo de robot resuelve laberintos.....	135
<b>Tabla 55</b> Desarrollo concepto uno del robot de robot resuelve laberintos .....	136
<b>Tabla 56</b> Características concepto dos del de robot resuelve laberintos.....	136
<b>Tabla 57</b> Desarrollo concepto dos del robot resuelve laberintos.....	136
<b>Tabla 58</b> Evaluación de conceptos del robot resuelve laberintos .....	137
<b>Tabla 59</b> Condiciones de sensores para robot resuelve laberintos .....	146
<b>Tabla 60</b> Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot resuelve laberintos .....	149
<b>Tabla 61</b> Presupuesto tentativo para prototipo de robot resuelve laberintos .....	150
<b>Tabla 62</b> Declaración de la misión de un robot balancín.....	158
<b>Tabla 63</b> Necesidades en un prototipo de robot balancín .....	159
<b>Tabla 64</b> Métrica para especificaciones del robot balancín .....	160
<b>Tabla 65</b> Métricas de robots comerciales del robot balancín .....	161
<b>Tabla 66</b> Valores establecidos de métricas del robot balancín .....	162
<b>Tabla 67</b> Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot balancín .....	163
<b>Tabla 68</b> Microcontrolador y sensor adecuado para robot balancín .....	164
<b>Tabla 69</b> Ponderación de hardware disponible para robot balancín .....	165
<b>Tabla 70</b> Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot balancín.....	179
<b>Tabla 71</b> Presupuesto tentativo para prototipo de robot balancín.....	180

<b>Tabla 72</b>	Declaración de la misión de robot mini sumo .....	184
<b>Tabla 73</b>	Necesidades en un prototipo de un robot mini sumo .....	185
<b>Tabla 74</b>	Métrica para especificaciones del robot mini sumo .....	186
<b>Tabla 75</b>	Métricas de robots comerciales del robot mini sumo .....	186
<b>Tabla 76</b>	Valores establecidos de métricas del robot mini sumo .....	187
<b>Tabla 77</b>	Chasis y ruedas disponibles comercialmente para robot mini sumo .....	188
<b>Tabla 78</b>	Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente para robot mini sumo .	189
<b>Tabla 79</b>	Ponderación de hardware disponible para robot mini sumo .....	190
<b>Tabla 80</b>	Ponderación de microcontroladores disponibles para robot mini sumo .....	191
<b>Tabla 81</b>	Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot mini sumo .....	197
<b>Tabla 82</b>	Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor mini sumo .....	198

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Robot seguidor de línea (Carrillo Romero, 2007)</i> .....	43
<b>Figura 2</b> <i>Mini Robots resuelve laberintos (Rodríguez, y otros, 2014)</i> .....	45
<b>Figura 3</b> <i>Robot balancín (Borja Conde, 2018)</i> .....	46
<b>Figura 4</b> <i>Robot Mini sumo (Święcki, Szymelewicz, Matusiewicz, &amp; Grądzki, 2020)</i> .....	47
<b>Figura 5</b> <i>Programa Robot Arena 2 (Amazon, s.f.)</i> .....	48
<b>Figura 6</b> Robot móvil en configuración Ackerman.....	50
<b>Figura 7</b> Robot móvil en configuración triciclo clásico .....	50
<b>Figura 8</b> Robot móvil en configuración tracción diferencial.....	50
<b>Figura 9</b> Robot móvil en configuración síncrona .....	50
<b>Figura 10</b> Movimiento de un robot seguidor de línea (Portales Rioseco, y otros, 2015) .....	69
<b>Figura 11</b> Arreglo de sensores de un robot seguidor de línea.....	70
<b>Figura 12</b> Condiciones para que el prototipo realice un giro horario.....	70
<b>Figura 13</b> Condiciones para que el prototipo realice un giro anti horario .....	71
<b>Figura 14</b> Condiciones para que el prototipo mantenga velocidad constante.....	72
<b>Figura 15</b> Robot seguidor en una curva de 30°.....	72
<b>Figura 16</b> Curva de respuesta a escalón unitario (Ogata, 2003).....	73
<b>Figura 17</b> Curva de respuesta a escalón unitario.....	75
<b>Figura 18</b> Respuesta del sistema con un control P .....	76
<b>Figura 19</b> Respuesta del sistema con un control I .....	78
<b>Figura 20</b> Respuesta del sistema con un control PI .....	79
<b>Figura 21</b> Respuesta del sistema con un control PD.....	81
<b>Figura 22</b> Respuesta del sistema con un control PID.....	82

<b>Figura 23</b> Prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza A) Vista superior B)Vista isométrica .....	85
<b>Figura 24</b> Ubicación de los sensores y motores robot seguidor de líneas.....	106
<b>Figura 25</b> Curva de respuesta a escalón unitario (Ogata, 2003).....	108
<b>Figura 26</b> Curva de respuesta a escalón unitario.....	110
<b>Figura 27</b> Respuesta del sistema con un control P .....	111
<b>Figura 28</b> Respuesta del sistema con un control I .....	113
<b>Figura 29</b> Respuesta del sistema con un control PI .....	114
<b>Figura 30</b> Respuesta del sistema con un control PD.....	116
<b>Figura 31</b> Respuesta del sistema con un control PID.....	117
<b>Figura 32</b> Prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista A) Vista superior B)Vista isométrica .....	119
<b>Figura 33</b> Ubicación de sensores en robot resuelve laberintos.....	138
<b>Figura 34</b> Combinaciones y bifurcaciones en laberintos A) Callejón sin salida B) Pared derecha e izquierda C) Pared frontal D) Pared izquierda E) Pared derecha F) Pared frontal y derecha G) Pared frontal e izquierda .....	141
<b>Figura 35</b> Resolución de laberinto con algoritmo de la mano derecha .....	142
<b>Figura 36</b> Resolución de laberinto con algoritmo de recorrido recursivo .....	142
<b>Figura 37</b> Resolución de laberinto con algoritmo de Tarry.....	143
<b>Figura 38</b> Resolución de laberinto con algoritmo de Pledge .....	143
<b>Figura 39</b> Resolución de laberinto con algoritmo de Lee .....	144
<b>Figura 40</b> Sensores de robot resuelve laberintos .....	145
<b>Figura 41</b> Sistema de péndulo invertido .....	168
<b>Figura 42</b> Diagrama de cuerpo libre sistema de péndulo invertido .....	169

<b>Figura 43</b> Curva de respuesta a escalón unitario.....	172
<b>Figura 44</b> Respuesta del sistema con un control P .....	173
<b>Figura 45</b> Respuesta del sistema con un control I .....	174
<b>Figura 46</b> Respuesta del sistema con un control PI .....	175
<b>Figura 47</b> Respuesta del sistema con un control PD.....	176
<b>Figura 48</b> Respuesta del sistema con un control PID.....	177
<b>Figura 49</b> Prototipo de robot balancín A) Vista superior B)Vista isométrica.....	179
<b>Figura 50</b> Dhoyo con robots mini sumo.....	194
<b>Figura 51</b> Ubicación de sensores en robot mini sumo.....	195
<b>Figura 52</b> Prototipo de robot mini sumo A) Vista superior B)Vista isométrica .....	197

## Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo crear una guía técnica detallada y especializada para diseño y construcción de robots de competencia, en el ámbito de la eléctrica, electrónica y control por lo que es un aporte significativo para el club de robótica ESPE Matriz y entusiastas de la robótica de competencia. Además, diseñar algoritmos de control adecuados para los prototipos de las categorías antes mencionadas que cumplan con objetivos de control puntuales. En una primera instancia, se procedió a realizar la ingeniería de concepto obteniendo propuestas para el diseño de los prototipos de robots en los que se incluye chasis, controlador y sensores. Seguidamente, se analizó de manera cuantitativa cada propuesta para así obtener la más adecuada según la categoría; a partir de eso se desarrolló la ingeniería básica donde se detalló el funcionamiento del robot, posibles algoritmos de control y diseños finales. Finalmente, se realizó la ingeniería a detalle donde se explicó la programación con diagramas de flujo y pseudocódigos. Una vez concluido el trabajo, se realizaron pruebas y emulaciones para los prototipos comprobando así su correcta programación y funcionamiento.

### Palabras Clave:

- **PROTOTIPO**
- **COMPETENCIA**
- **ALGORITMO**
- **CONTROLADOR**
- **SENSORES**



### **Abstract**

The present project aims to create a detailed and specialized technical guide for the design and construction of competition robots, in the field of electrical, electronics and control, making it a significant contribution to the ESPE Matriz robotics club and enthusiasts of the competition robotics. In addition, design suitable control algorithms for the prototypes of the aforementioned categories that meet specific control objectives. In the first instance, the concept engineering was carried out, obtaining proposals for the design of the robot prototypes that include the chassis, controller and sensors. Next, each proposal was quantitatively analyzed in order to obtain the most appropriate one according to the category; From that, the basic engineering was developed where the operation of the robot, possible control algorithms and final designs were detailed. Finally, the detailed engineering was carried out where the programming with flow diagrams and pseudocodes was explained. Once the work was finished, tests and emulations were carried out for the prototypes, thus checking their correct programming and operation.

#### **Keywords:**

- **PROTOTYPE**
- **COMPETENCE**
- **ALGORITHM**
- **CONTROLLER**
- **SENSORS**

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

Debido al avance de la tecnología en la actualidad los niños y jóvenes se ven cada vez más involucrados en la innovación y creación de nuevas herramientas que les permiten fortalecer conocimientos como la programación y creación de robots; diversos estudios demuestran que la robótica genera un alto grado de interés en los estudiantes y la participación en clases además promueve el interés por las carreras de matemáticas y ciencias (García & Reyes, 2012).

Las competencias de robótica se vienen realizando desde 1992 en varias partes del mundo, en el Ecuador desde el 2005 se ha realizado el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER) que tiene como objetivo fomentar y promover el desarrollo de la robótica de competición, ciencia y tecnología en el país y ha convocado cada año a centros tecnológicos, instituciones de educación superior y escuelas politécnicas; este proyecto fue desarrollado por la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia (CEDIA) (Aliaga & Carhuarica, 2018).

El Concurso Ecuatoriano de Robótica se ha venido desarrollando en instituciones de educación superior y escuelas politécnicas del país que cuentan con clubs propios de robótica convocando a casi 1000 estudiantes cada año para competir en más de 20 categorías con prototipos propios; convirtiéndose así en el evento más importante de competencias de robótica en el país.

La robótica de competencia ha ganado espacio en nuestro país en los últimos años y cada vez más instituciones se proponen participar para fomentar el desarrollo en los estudiantes impulsando su imaginación, despertando inquietudes, desarrollando la creatividad, la innovación, la toma de decisiones, la solución de problemas y el trabajo en equipo (Guasmayan & Gonzalez, 2019).

Existen muchas publicaciones en las que se implementan robots de competencia, pero estas publicaciones son complejas y no proporcionan información detallada que permita a los estudiantes tener una visión clara de lo que incluye un prototipo de esta magnitud para tener las mejores facultades en las competencias.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Matriz fue fundado el club de robótica en 2007, luego de un período el club fue cerrado y gracias a las gestiones de estudiantes y profesores fue reabierto en 2018; para que los estudiantes puedan implementar sus ideas y sean partícipes en proyectos de investigación que fortalezcan sus valores académicos y personales, este club cuenta con una interdisciplinaridad de estudiantes que en un ambiente de colaboración les permite desarrollar los prototipos para diversas categorías y competir en el CER.

A lo largo de los años los integrantes del club de robótica ESPE Matriz han desarrollado sus prototipos con investigaciones propias para el diseño y construcción de los mismos, además contando con apoyo de docentes en la institución, debido a la variedad de niveles en conocimientos por parte de los integrantes se realizan grupos colaborativos para brindar apoyo en diferentes áreas para la creación de los prototipos para esto se comparten conocimientos y experiencias en previas competencias (Ribeiro, 1996).

Para la creación de prototipos el club de robótica ESPE Matriz se basa en diseños probados con anterioridad por estudiantes del club y cada año mejoran sus características; antes de cada CER realizan una competencia interna para seleccionar los prototipos que tengan un mejor desempeño de acuerdo a su categoría.

A pesar de los diversos esfuerzos realizados por el Club de Robótica ESPE Matriz al momento no se cuenta con una base teórica estandarizada disponible sobre prototipos robóticos para competencia en diversas categorías que les sirva de base para poder desarrollar y mejorar los prototipos de manera clara y ordenada por los miembros del Club (siempre cambiantes).

La información con la que cuentan los integrantes del club de robótica ESPE Matriz es compartida principalmente por voz mediante líderes que son personas con más tiempo en el club y experiencia (de niveles avanzados) que guían a cada grupo en la categoría escogida para desarrollar los prototipos, vislumbrándose un serio problema al transmitir información sobre planos, programas y estructuras de los prototipos debido a que las personas que conforman esos grupos son variantes semestre tras semestre lo que retrasa el avance obtenido en algún prototipo haciendo que cada semestre prácticamente se parta desde cero en el desarrollo de dichos robots de competencia.

El club de robótica ESPE Matriz convoca cada semestre a los estudiantes para integrarse al club y así participar en diversos eventos siendo el principal objetivo tener grandes resultados en la competición más grande de robótica del Ecuador el cual es el CER que año a año se realiza en el País, aun cuando el club trabaja de manera constante para elaborar los prototipos, cada año no se obtienen los resultados esperados en las competiciones por la variabilidad y descoordinación en el desarrollo de sus prototipos sumando a que no existe una información base del desarrollo de prototipos para las diversas categorías.

### **Justificación e importancia**

De acuerdo al Objetivo 1 del Plan nacional de desarrollo presentado en 2017 para el caso de la educación el acceso a los diferentes niveles (inicial, básica, bachillerato y superior) debe garantizarse de manera inclusiva, participativa y pertinente, se destaca además la importancia de la profesionalización de la ciudadanía para lo cual es prioritario fortalecer la educación técnica y tecnológica, en conjunto con la aprobación de la Ley Orgánica de Educación Superior (LOES), se replanteó la educación superior como bien público y motor del desarrollo, es decir que muchos de los recursos del país deben ser destinados al desarrollo e implementación de tecnologías para todos los niveles de educación (Mideros Mora & Carvajal Aquirre, 2017).

El uso de las tecnologías en la educación permite acceder a contenidos educativos, así como a mejorar el planteamiento para el desarrollo de habilidades y competencias que requieren los estudiantes, por esto la robótica educativa es un recurso eficaz para el trabajo interdisciplinario y enriquecer los procesos de enseñanza y aprendizaje (Mendoza, Alarcón, & Monroy, 2020).

En la actualidad la robótica con un enfoque pedagógico se convierte en una estrategia de enseñanza generando un ambiente de aprendizaje donde el estudiante desempeña un papel fundamental y el trabajo colaborativo se ve fortalecido al diseñar y simular fenómenos, por medio de la construcción de robots, por esto cada año las instituciones procuran que sus estudiantes se interesen en la ciencia y tecnología a través de clubs, concursos y eventos.

El club de robótica ESPE Matriz desde 2007 participa en concursos de robótica con prototipos que han sido diseñados y construidos por sus integrantes pero muchas veces la información que han utilizado no es confiable y se producen errores alargando así el tiempo de diseño y pruebas, por esto es importante que el club disponga de bases técnicas adecuadas que

les permitan diseñar e implementar robots de competencia que sobresalgan de manera positiva en todas las categorías de los concursos de robótica acrecentando el nombre de la institución y su prestigio en el ámbito de ciencia y tecnología; estas bases deben ser una guía clara para los estudiantes que empiezan su incursión en la robótica y así puedan realizar un prototipo de robot de competencia (Moreno, Muñoz, Serracín, & Quintero, 2012).

Los concursos de robótica en el país además de incentivar el interés en la ciencia y en la tecnología tienen el propósito de generar un ambiente colaborativo, los estudiantes pueden aprender a trabajar en un grupo interdisciplinario y desarrollar razonamiento crítico al igual que la solución de problemas; además se pretende incentivar a una sana competencia entre equipos de trabajo permitiendo mejorar sus estrategias y relaciones interpersonales (Berenguel Soria, Rodríguez Díaz, Moreno Úbeda, Guzmán Sánchez, & González Sánchez, 2012).

Un trabajo como el propuesto especializado en robots de competencia y su análisis desde un punto de vista de ingeniería será de gran valor para estudiantes y profesores ya que proporcionará información valiosa para implementar y mejorar prototipos incrementando así las posibilidades de ganar competencias y los estudiantes se verán cada vez más motivados para proyectos de innovación e investigación.

El presente proyecto se implementará para cumplir a cabalidad la misión del club de robótica ESPE Matriz donde se especifica que: está comprometido en fomentar la creatividad, la innovación tecnológica y la investigación en el área de automática y robótica, brindando para el efecto las herramientas y apoyo académico/científico adecuado con eficacia, calidad, calidez, valores éticos y morales para conseguir en cada uno de sus integrantes la excelencia académica en el desarrollo de ideas, proyectos y prototipos los cuales participarán en concursos y eventos locales, nacionales, e internacionales; mejorando las bases de información del club los integrantes perfeccionarán sus prototipos y podrán participar en más competencias logrando así

nuevos y mejores resultados para gloria de los estudiantes y de la Institución a la cual nos debemos la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Brenji, Mariño, & Huy, 2010) (Lau & Pereira, 1996).

### **Alcance del proyecto**

Se pretende realizar una guía metodológica de información que sea utilizada como apoyo didáctico para que los estudiantes logren comprender la ingeniería detrás de un prototipo de robot para competencias en torneos de robótica además permitirá al lector a pesar de no tener experiencia previa en el diseño o construcción de robots, realizar un prototipo básico de robot de competencia. Esta guía metodológica se realizará presentando la ingeniería de concepto, básica y de detalle de prototipos robóticos en las categorías que a continuación se indican:

- **Seguidor de línea:** es una máquina móvil que puede detectar y seguir la línea dibujada en el piso. Se realizarán el diseño eléctrico, electrónico y de control apropiados para que el robot seguidor de línea logre moverse en plataformas mecánicas previamente probadas (Vera Arenas & Proaño, 2016).
- **Resuelve laberintos:** consiste en un robot capaz de salir de un laberinto en el menor tiempo posible, sin la intervención de una persona. Se realizarán el diseño eléctrico, electrónico y de control en plataformas mecánicas previamente probadas y el robot resuelva el laberinto además se incluirán recomendaciones para su implementación (Torres Cueva, 2019).
- **Balancín:** este robot es básicamente un péndulo invertido sobre dos ruedas, el balancín es un sistema inestable por naturaleza. Se realizarán el diseño eléctrico, electrónico y de control en plataformas mecánicas previamente probadas y sus ventajas en las competencias (Caiza, 2016).

- **Mini sumo:** este robot móvil de competencia tiene la finalidad de derrotar a su contrincante detectándolo con sensores y posteriormente atacándolo. Se realizarán el diseño eléctrico, electrónico y de control en plataformas mecánicas previamente probadas que decidirán estrategias de combate durante la detección y posterior ataque al oponente (Mieles Medina, 2020).
- **Batalla simulada:** La batalla de robots simulada consiste en un enfrentamiento de dos robots simulados por computadora en software dedicado mismo que tiene la posibilidad de diseñar su propio robot completo. En la base técnica se detallarán la utilización del programa, las posibilidades que esta ofrece para simular batallas; es decir un manual y un ejemplo de aplicación para una batalla simulada con las mejores opciones antes estudiadas.

## Objetivos

### Objetivo general

Crear una guía técnica especializada para diseño y construcción de robots de competencia: robot seguidor de línea, robot resuelve laberintos, robot balancín, robot mini sumo y batalla simulada en el ámbito de la eléctrica, electrónica y control.

### Objetivos específicos

- Desarrollar la ingeniería de concepto, básica y a detalle utilizando diseños, planos, esquemas, diagramas y estudios apropiados que permitan realizar un prototipo básico de robot de competencia en las categorías especificadas.
- Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de los robots de las categorías indicadas explicando la ingeniería detrás de los robots de competencia.
- Plantear un manual detallado sobre el manejo del programa para la categoría de batalla simulada.



## Capítulo II

### Fundamentación teórica

#### Robótica de competencia

Aunque la robótica en sus inicios fue implementada para la industria o con la finalidad de facilitar el trabajo humano; en los últimos años debido al creciente uso de la tecnología se han concentrado esfuerzos para acercar la robótica al público en general además de atraer estudiantes para que se vean interesados cada vez más en formarse en áreas técnicas y campos de ingeniería, por esto en la última década se viven realizando por parte de diferentes organizaciones concursos y competiciones de robots educativos las que incluyen tanto robots móviles como humanoides; en estas competencias con varias categorías se busca diseñar y construir prototipos de robots que cumplan con determinados retos y especificaciones, resolviendo una necesidad creada por los organizadores de cada concurso; en estos concursos se cuenta con reglamentos establecidos acordes a las intenciones de quien lo organice además cuentan con jueces que evalúan tanto los prototipos como las soluciones a los retos y de acuerdo al reglamento se manifestará ganadores por categoría (Bernal Hernández, 2017).

La robótica de competencia empezó su desarrollo entre los años 1970 a 1980 debido a su gran acogida y a su creciente desarrollo se abre paso cada vez más en varias instituciones; uno de los eventos más importantes a nivel internacional es la competencia organizada desde 1992 por American Association for Artificial Intelligence (AAAI) donde se evalúan la navegación autónoma de robots, la manipulación robótica y la interacción hombre-robot.

Al paso de los años se han diversificado las categorías en los diferentes concursos de robótica atrayendo cada vez más a los estudiantes y aficionados que se ven interesados en competencias que incluyen drones, robots basados en LEGO y simulación de batalla; aunque estas nuevas categorías han sido más atractivas en los últimos 5 años no se deja de lado las

categorías llamadas “clásicas” que se han dividido en algunas subcategorías como baile de bípedos, carrera de bípedos, seguidores de línea de velocidad o seguidores de línea de destreza, un importante evento es el Concurso de robots humanoides organizado por el Comité Español de Automática (CEAbot) que incluye lucha de robots humanoides o navegación con robots desde el 2006 (Gil Vázquez, Jara, Puente Méndez, Candelas, & Torres, 2012).

La robótica de competencia pretende desarrollar el talento y mejorar conocimientos dentro del ámbito de la tecnología, además favorece el desarrollo de competencias que son esenciales para el éxito personal y profesional en el siglo XXI, como: la autonomía, la resolución de problemas, la responsabilidad, la creatividad, el trabajo en equipo, la autoestima, el interés por la investigación y el desarrollo de un espíritu competitivo.

En este tipo de competencias no se pretende desarrollar rivalidad entre los participantes, permite fomentar el compañerismo, intercambiar conocimientos en robótica, marcar claves evolutivas en la robótica, conocer nuevas personas calificadas e interesadas en la tecnología.

### **Concurso ecuatoriano de robótica (CER)**

En todo el mundo se han desarrollado concursos de robótica para fomentar el desarrollo tecnológico; en el 2002 con la creación del Consorcio Nacional para el Desarrollo de Internet Avanzado (CEDIA) en el Ecuador se pretende promover la exploración y resultados de proyectos innovadores que vinculan a instituciones ecuatorianas; para ello, se busca relacionar a investigadores, docentes y estudiantes mediante proyectos, concursos e iniciativas de desarrollo científico. Generando de esta manera un círculo de crecimiento constante entre las instituciones académicas.

Esta institución desde el 2005 ha realizado el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER) que tiene como objetivo fomentar y promover el desarrollo de la robótica de competición en el país; se convoca cada año a centros tecnológicos, instituciones de educación superior y escuelas politécnicas a participar en varias categorías convirtiéndose en el evento más importante en el país de robótica de competencia.

El Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER) se ha venido desarrollando en instituciones de educación superior y escuelas politécnicas del país que cuentan con clubs propios de robótica convocando a casi 1000 estudiantes cada año que compiten en más de 30 categorías con prototipos que han sido creados por ellos mismos que les permite explorar las nuevas tendencias de la robótica además comparten conocimientos y experiencias que les ayudarán a crecer profesional y personalmente.

Cada año este concurso además de los eventos de batallas y competencias ofrecen talleres para los participantes en los que se promueve el uso educativo de la tecnología y las nuevas aplicaciones que esta ofrece; además conferencias con expositores nacionales e internacionales que complementan la experiencia en este gran evento.

### **Categorías del Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER)**

Luego del primer Concurso Ecuatoriano de Robótica las categorías que se ofrecen en el Concurso Ecuatoriano de Robótica son variadas para que los concursantes participen en tantas como deseen, a continuación, se presentan las categorías disponibles en el CER 2019.

**Tabla 1**

*Información sobre categorías disponibles en el Concurso Ecuatoriano de Robótica 2019*

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>	<b>Seguridad</b>
<b>Batalla Robots</b>	Es un robot construido con materiales resistentes que le permiten soportar las presiones mecánicas de un combate agresivo.	No hay restricciones de dimensiones. Los robots son pesados en 7 categorías desde 0,5 lb hasta 120lb.	El robot deberá poseer una llave "ON/OFF" que lleve a condiciones de paro total al prototipo.
<b>Categorías: 120 lb, 30 lb, 12 lb, 3 lb y 1 lb</b>			
<b>Seguidor de línea velocidad JR programado</b>	Es un robot que recorrerá una pista de color negro en un fondo blanco, existen categorías para utilizar turbina o no utilizarla los participantes deben ser menores de 17 años.	No existen limitaciones.	Los robots no pueden tener partes en movimiento, antes de la señal de salida.
<b>Seguidor de línea destreza</b>	Es un robot que recorrerá una pista de color negro en un fondo blanco que contará con curvas cerradas, discontinuidades y desvíos.	No existen limitaciones.	Los robots no pueden tener partes en movimiento, antes de la señal de salida.

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>	<b>Seguridad</b>
<b>Seguidor de línea JR básico</b>	Es un robot que recorrerá una pista de color negro en un fondo blanco, con un algoritmo de control diseñado en base a dispositivos no programables, los participantes deben ser menores de 17 años.	No podrán exceder dimensiones de: 20 cm de ancho, 25 cm de largo de base. La altura del robot no está limitada. El peso máximo no está limitado.	El accionamiento del prototipo será en forma manual una vez que lo indique el juez.
<b>Robot Resuelve laberintos</b>	Es un robot con la capacidad de cruzar un laberinto en el menor tiempo posible	No podrán exceder dimensiones de: 15 cm de largo, 15 cm de ancho y 15 cm de altura, peso máximo ilimitado.	El accionamiento del prototipo será de forma manual o inalámbrica una vez que lo indique el juez.
<b>Robot balancín</b>	Estos robots poseen uno o dos puntos de apoyo que les permite mantener el equilibrio al menos por 10 segundos sin ningún tipo de apoyo externo.	Este robot debe poder entrar en un área de 1m x 1m x1m. El peso máximo es de 3kg.	Deben tener un mecanismo de parada (paro de emergencia) para que el robot termine su funcionamiento.
<b>Robot mega sumo autónomo</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente de manera autónoma en 3 asaltos e intentará expulsarlo del Dhoyo .	No podrán exceder dimensiones de: ancho 20cm, largo 20cm, sin restricción de alto y un peso máximo de 3000gr.	El prototipo debe ser diseñado para entrar en acción 5 segundos después de que el concursante presione un interruptor de inicio.

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>	<b>Seguridad</b>
<b>Robot mini sumo autónomo</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente de manera autónoma en 3 asaltos e intentará expulsarlo del Dhoyo .	No podrán exceder dimensiones de: ancho 10cm, largo 10cm, sin restricción de alto y un peso máximo de 500gr.	El prototipo entrar en acción 5 segundos después de que el concursante presione un interruptor de inicio.
<b>Robot micro sumo autónomo</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente de manera autónoma en 3 asaltos intentará expulsarlo del Dhoyo .	No podrán exceder dimensiones de: ancho 5cm, largo 5cm, alto 5cm y un peso máximo de 100gr.	El prototipo debe entrar en acción 5 segundos después de que el concursante presione un interruptor de inicio.
<b>Robot mega sumo RC</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente y se puede controlar a distancia, en 3 asaltos intentará expulsarlo del Dhoyo .	No podrán exceder dimensiones de: ancho 20cm, largo 20cm, sin restricción en alto y un peso máximo de 3000gr.	El prototipo debe entrar en acción 5 segundos después de que se presione un interruptor de inicio, no se puede usar controladores de 75Mhz.
<b>Robot mini sumo RC</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente y se puede controlar a distancia, en 3 asaltos intentará expulsarlo del Dhoyo .	No podrán exceder dimensiones de: ancho 10cm, largo 10cm, sin restricción en alto y un peso máximo de 500gr.	El prototipo debe entrar en acción 5 segundos después de que el concursante presione un interruptor de inicio, controladores 75Mhz están prohibidos.

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>	<b>Seguridad</b>
<b>Robot mini sumo JR</b>	Es un robot que se enfrenta a su oponente de manera autónoma en 3 asaltos intentará expulsarlo del Dhoyo; sus participantes no deben ser mayores a 17 años.	No podrán exceder dimensiones de: ancho 10cm, largo 10cm, sin restricción en alto y un peso máximo de 500gr.	El prototipo debe ser diseñado para entrar en acción 5 segundos después de que el concursante presione un interruptor de inicio.
<b>Drones velocidad</b>	Los drones serán pilotados en un área de vuelo que cuenta con pits y pista completando 3 vueltas. Durante estas rondas, se tomará en cuenta la vuelta más rápida.	Las hélices máximo podrán tener 6 pulgadas. Sin restricción de peso.	Ningún piloto podrá entrar a la pista mientras haya drones en operación dentro de la misma. Solamente podrán hacerlo cuando el juez lo ordene.
<b>Drones de destreza</b>	Los robots participantes tendrán que volar siguiendo una trayectoria sin tocar los postes ni bordes de los aros que estarán colocados en la pista.	No podrán exceder dimensiones de: 100 cm largo, 100 cm ancho, 50 cm altura, su peso no deberá sobrepasar un valor máximo de 2,5 Kg.	Ningún piloto podrá entrar a la pista mientras haya drones en operación dentro de la misma. Solamente podrán hacerlo cuando el juez lo ordene.
<b>Carrera de bípedos</b>	El robot debe poseer una estructura bípeda (humanoide) y debe mantener el equilibrio al caminar. El robot no deberá arrastrar los pies .	La altura máxima del robot es de 60 cm	El robot no deberá portar armas u objetos que puedan lesionar a las personas o la pista.

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>	<b>Seguridad</b>
<b>Carrera de insectos sin obstáculos</b>	Los robots insectos deberán presentar patas como articulaciones para recorrer una distancia de 2m en el menor tiempo posible. La pista no tendrá ningún obstáculo.	No podrán exceder dimensiones de: 20 cm de largo, 20 cm de ancho, sin restricción de peso o altura.	No aplica.
<b>Carrera de insectos con obstáculos</b>	Los robots insectos recorren una distancia de 2m; en el menor tiempo posible. La pista podrá presentar diferencias en la altura de hasta 0,5 cm. La pista tendrá obstáculos inferiores a 3 cm.	No podrán exceder dimensiones de: 20 cm de largo, 20 cm de ancho, sin restricción de peso o altura.	No aplica
<b>Pelea de humanoides</b>	El robot debe poseer una estructura humanoide y debe mantener el equilibrio al caminar, buscará derrotar a su rival a través de una estrategia de pelea que incluya modos de defensa y ataques con el cuerpo o las extremidades.	Altura máxima de 60cm.	El robot no deberá portar armas u objetos que ´ puedan lesionar a las personas o la pista de competición.



<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>
<b>Robot bailarín</b>	Un robot humanoide o varios robots se moverán al ritmo de la música proporcionada por el comité organizador del concurso.	No podrán exceder dimensiones de: 50 cm de largo, 50cm de ancho sin restricción de altura.
<b>Robot soccer</b>	Consiste en el enfrentamiento de dos equipos de tres robots cada uno, uno será el arquero y los otros dos jugadores intentarán meter el balón en el arco del oponente en un partido con dos tiempos de 7 minutos.	No podrán exceder dimensiones de: 10 cm largo, 10 cm ancho sin restricción de peso o altura; o cilíndrico con 10 cm de diámetro.
<b>Robot trepador</b>	Un robot trepador tendrá como objetivo trepar un muro en el menor tiempo posible, se permite el uso de imanes o electroimanes para la adherencia del robot a la pista.	No podrán exceder dimensión de: longitud 30 cm sin restricción de peso o altura
<b>Robot transformer</b>	El diseño del robot le permite cambiar de forma y debe ser totalmente autónomo, se permite el uso de robots humanoides implementado un algoritmo de control.	No existe restricción de peso o dimensiones

<b>Categoría</b>	<b>Información general</b>	<b>Dimensiones y peso</b>
<b>Creatividad LEGO</b>	Cada delegación inscrita portará su kit LEGO y por lo menos dos computadores portátiles, creará un prototipo durante el tiempo de competencia que realice acciones y/o funciones previamente descritas por el jurado calificador.	No aplica.
<b>Programación industrial</b>	Los participantes resolverán una serie de desafíos en un tiempo determinado utilizando las herramientas de programación que brinda el software Labview, contando con un tiempo de 5-10 minutos.	No aplica.
<b>Impacto tecnológico</b>	Se receptorán cualquier tipo de proyecto sobre la temática propuesta por la IES organizadora. Los proyectos pueden ser tesis o proyecto de pregrado, el proyecto deberá estar totalmente terminado y funcionando.	No aplica.
<b>Batalla simulada</b>	Una batalla simulada consiste en un enfrentamiento de dos robots simulados por computadora, con la finalidad de inhabilitar las funciones de movilidad o destruir a su oponente.	Las dimensiones serán las restringidas por el programa, el peso máximo será de 799kg.

A continuación, se explicará a fondo los prototipos elegidos para el análisis de esta investigación:

**Seguidor de línea:**

Un seguidor de línea es un robot con la capacidad de desplazarse sobre una trayectoria dada mediante el seguimiento completamente autónomo de una ruta indicada visualmente (existen variantes como robots que siguen rutas con información no visual sino magnética), generalmente en forma de una línea negra sobre un fondo blanco o viceversa existen algunas variaciones para este tipo de robot de competencia en los que se incluye: seguidor de velocidad y seguidor de destreza de acuerdo a la categoría elegida pueden o no usar turbina (Gómez & Gómez, 2017).

Para el funcionamiento de un seguidor de línea se implementa un controlador en el que se incorpora un algoritmo definido por el diseñador del robot. Dicho controlador se basa en las lecturas de uno o más sensores que permiten determinar la trayectoria del robot (si sigue la ruta diseñada) para ejecutar las acciones necesarias como: ajustar la velocidad de rotación de los motores que están acoplados a las ruedas del robot para así mantenerlo sobre la ruta (Carrillo Romero, 2007)

**Figura 1**

*Robot seguidor de línea (Carrillo Romero, 2007)*



Las partes principales que conforman a un robot seguidor de línea son: estructura base o carcasa, sensores, controlador, motores, llantas y otros componentes electrónicos; casi siempre son diseñados utilizando elementos que faciliten su movimiento y no agreguen peso

innecesario en el prototipo ya que esto puede representar una desventaja obteniendo así un modelo que sea ligero, compacto y de bajo consumo de energía.

No existe restricción en las dimensiones o peso de los prototipos ya que dependerán del diseño y programación de cada competidor, la recomendación para el prototipo es que la batería previamente haya sido cargada y las llantas utilizadas posean la fricción necesaria para que el prototipo no se resbale en la pista y pierda la línea guía.

Existen gran variedad de materiales para el diseño de los robots seguidores de línea como: plástico, aluminio, aleaciones de latón y en algunas ocasiones se puede llegar a utilizar madera. Es necesario poner atención a la resistencia, peso y capacidades mecánicas del material a utilizar ya que el prototipo está obligado a permanecer dentro de la pista y seguir la trayectoria marcada durante toda la carrera. Si el robot se sale de la pista completamente o permanece inmóvil durante 5 segundos, la participación se dará por terminada inmediatamente.

### **Resuelve laberintos:**

Estos robots tienen la capacidad de cruzar un laberinto previamente diseñado por los organizadores y tiene como finalidad salir del laberinto en el menor tiempo posible.

El robot deberá iniciar en la posición de “salida” e iniciar su recorrido a la orden de “arranque”, el prototipo debe ser de tipo autónomo, es decir, no podrá tener enlaces alámbricos o inalámbricos hacia algún dispositivo externo ni de control remoto además es necesario que cuente con un interruptor de encendido visible.

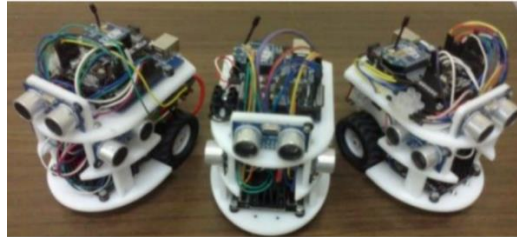
El robot deberá estar preparado para trabajar bajo condiciones de luz variadas además deberá tener dimensiones que le permitan recorrer el laberinto y no se limite su movilidad (ROBOMATRIX).

El número y tipo de sensores utilizado en cada prototipo dependerá del criterio del diseñador ya que en el reglamento no existen especificaciones, la recomendación para el

prototipo es que la batería este cargada y las llantas/ruedas utilizadas posean la fricción necesaria para que el prototipo no se resbale y que los algoritmos de control para toma de decisiones hayan sido probados con anterioridad (Rodríguez, y otros, 2014).

## Figura 2

*Mini Robots resuelve laberintos (Rodríguez, y otros, 2014)*



Las partes principales que conforman a un robot resuelve laberintos son: estructura base o carcasa, sensores, controlador, motores, llantas y otros componentes electrónicos; en su diseño se debe tomar en consideración que las dimensiones deben facilitar el recorrido dentro del laberinto, además se debe analizar la ubicación adecuada para los componentes con el fin de ocupar el menor espacio posible.

Existen gran variedad de materiales para el diseño de los robots resuelve laberintos como: plástico, aluminio o madera, lo más importante es que la estructura sea resistente en el caso de una colisión.

### **Balancín:**

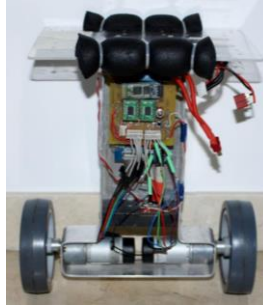
Un robot balancín es un robot dinámicamente inestable que deberá balancearse verticalmente mediante un algoritmo de control y su propia energía, pero caerá si se elimina la fuente de energía; poseen uno o dos puntos de apoyo que les permite mantener el equilibrio al menos por 10 segundos sin ningún tipo de apoyo externo (ROBOUAQ).

Estos robots deben ser totalmente autónomos no comerciales, una vez que comience el recorrido no podrá ser tocado por un operador además deberán cruzar un área establecida

atravesando pequeños obstáculos que pueden ser conos, rampas de subida o bajada y algunas superficies irregulares que serán colocados por cada concursante de acuerdo a su criterio.

### **Figura 3**

*Robot balancín (Borja Conde, 2018)*



El número y tipo de sensores utilizado en cada prototipo dependerá del criterio del diseñador ya que en el reglamento no existen especificaciones, la recomendación para el prototipo es que la batería este cargada y no se permiten el uso de motores de combustión interna o externa, además las llantas/ruedas utilizadas posean la fricción necesaria para que el prototipo no se resbale y mantenga el equilibrio.

Las partes principales que conforman a un robot balance o balancín son: estructura base o carcaza, sensores, controlador, motores, llantas y otros componentes electrónicos.

Existen gran variedad de materiales para el diseño de los robots balance como: plástico, aluminio, aleaciones de metales o madera, lo más importante es que la estructura sea resistente y permita colocar todos los elementos.

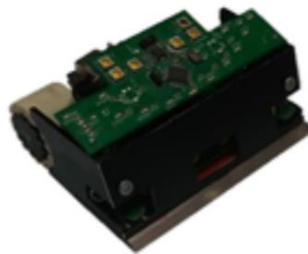
### **Mini sumo autónomo:**

Un robot mini sumo debe ser totalmente autónomo y se enfrentará a su oponente en un área de combate llamado Dhoyo con la finalidad de expulsarlo del Dhoyo en un combate (RUNIBOT, 2019).

El robot deberá ser de tipo autónomo, no debiendo estar conectado a ningún aparato externo como ordenadores, fuentes de alimentación o algún otro dispositivo además no se permitirá competir a robots que sean exactamente iguales entre sí, en caso de existir esta condición, se considerarán como robots comerciales (Asociación Mexicana de Mecatrónica).

#### **Figura 4**

*Robot Mini sumo (Świącki, Szymelewicz, Matusiewicz, & Grądzki, 2020)*



Se debe tener una garantía de seguridad en la que se incluye una llave ON/OFF externa o un pulsador de emergencia visible y de fácil acceso que lleve al robot a un estado de paro total, además deberá contar con luces indicadoras que permitan conocer su estado de funcionamiento. El robot debe entrar en acción 5 segundos después de que sea presionado el interruptor de inicio.

El número y tipo de sensores utilizado en cada prototipo dependerá del criterio del diseñador ya que en el reglamento no existen especificaciones, la recomendación para el prototipo es que la batería este cargada para que logre completar los asaltos, además las llantas/ruedas utilizadas posean la fricción necesaria para que el prototipo no se resbale en el Dhoyo.

Las partes principales que conforman a un robot mini sumo son: estructura base o carcasa, sensores, controlador, motores, llantas y otros componentes electrónicos que deberán estar protegidos ante los impactos del oponente.

Existen gran variedad de materiales para el diseño de los robots mini sumo como: aluminio y aleaciones de metales o madera, lo más importante es que la estructura sea resistente y les permiten soportar las presiones mecánicas de un combate además deben estar diseñados de tal manera que siempre tenga un frente y una espalda.

### **Batalla Simulada**

Una batalla simulada consiste en un enfrentamiento de dos robots simulados por computadora. Durante la batalla los robots buscan inhabilitar las funciones de movilidad o destruir total o parcialmente a su oponente, en esta categoría los robots deben ser implementados en un área autorizada por la organización, la organización decidirá el tiempo límite para que cada participante diseñe, programe y luche contra su oponente (XI).

Las dimensiones serán las restringidas por el programa y el peso máximo aceptado será de 799kg, podrá utilizar cualquiera tipo y cantidad de armas cumpliendo con la restricción de peso. El sistema de control y la plataforma mecánica utilizada será de libre elección por parte del participante, el orden de los contendientes será de manera aleatoria, luego de los asaltos se almacenarán sus puntuaciones para que sean sumados y se declare al ganador.

### **Figura 5**

*Programa Robot Arena 2 (Amazon, s.f.)*





## Capítulo III

### Desarrollo

La robótica de competencia al ser un área interdisciplinaria toma en cuenta muchos factores a nivel de hardware, como: sistemas de locomoción, sensores, actuadores, ruedas, etc. (Barrientos Sotelo, García Sánchez, & Silva Ortigoza, 2007).

Además de esto es necesario desarrollar la parte de software que mediante un algoritmo de control permitirá cumplir con la tarea para la cual el robot fue construido. Para las categorías seguidor de línea, resuelve laberintos, balancín y mini sumo es indispensable la elección de un buen sistema de locomoción, existen muchas opciones.

**Tabla 2**

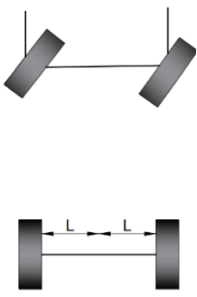
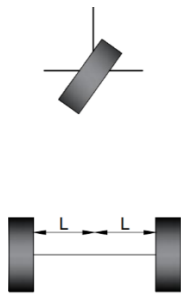
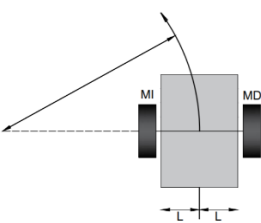
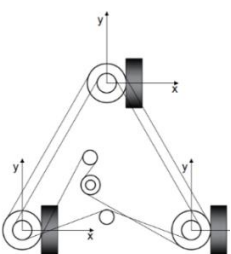
*Sistemas de locomoción disponibles para robots*

	<b>Patas</b>	<b>Orugas</b>	<b>Ruedas</b>
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usan extremidades</li> <li>• Utilizados en misiones de búsqueda (Ollero Baturone, 2001).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usa pistas de movimiento de deslizamiento (Gonzalez, Rodríguez, &amp; Guzmán, 2015).</li> <li>• Utilizado en armamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizados en robots exploradores y zoomórficos (Silva Ortigoza, y otros, 2007).</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena estabilidad</li> <li>• No causan desgaste en la superficie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor velocidad</li> <li>• Buena estabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena estabilidad</li> <li>• No causan desgaste</li> <li>• Bajo consumo de energía</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de energía alto</li> <li>• Poca estabilidad en superficies irregulares</li> <li>• Alta inversión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de energía alto</li> <li>• Pueden causar desgaste en la superficie</li> <li>• Alta inversión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para equilibrar su peso es necesario un análisis en el número de ruedas</li> </ul>

Se debe elegir una configuración específica dependiendo de la categoría en la que se participa.

**Tabla 3**

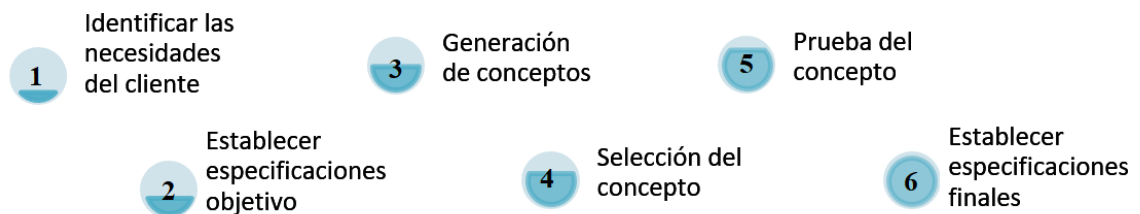
*Configuraciones para ruedas*

<b>Configuración Ackerman</b>	<b>Configuración Triciclo clásico</b>	<b>Configuración Tracción diferencial</b>	<b>Configuración Tracción síncrona</b>
Diseño de cuatro ruedas; la rueda delantera interior es más firme que la rueda delantera exterior ya que gira un ángulo ligeramente superior al exterior, no puede girar sobre su centro de gravedad.	Diseño con una rueda delantera y dos atrás; entre más pequeña sea la distancia entre la rueda trasera y delantera menor será su tiempo de giro, no puede girar sobre su centro de gravedad.	Se utilizan dos ruedas paralelas entre sí, el robot puede moverse en línea recta, girar sobre sí mismo o trazar curvas; para mantener su equilibrio requiere uno o dos puntos de apoyo adicionales.	Diseño de tres ruedas de forma triangular, para cambiar de dirección todas las ruedas giran alrededor de un eje vertical pero su chasis siempre apuntará a la misma dirección del inicio (Reyes Cortés, 2011).
<p><b>Figura 6</b> <i>Robot móvil en configuración Ackerman</i></p> 	<p><b>Figura 7</b> <i>Robot móvil en configuración triciclo clásico</i></p> 	<p><b>Figura 8</b> <i>Robot móvil en configuración tracción diferencial</i></p> 	<p><b>Figura 9</b> <i>Robot móvil en configuración síncrona</i></p> 

## Ingeniería de concepto

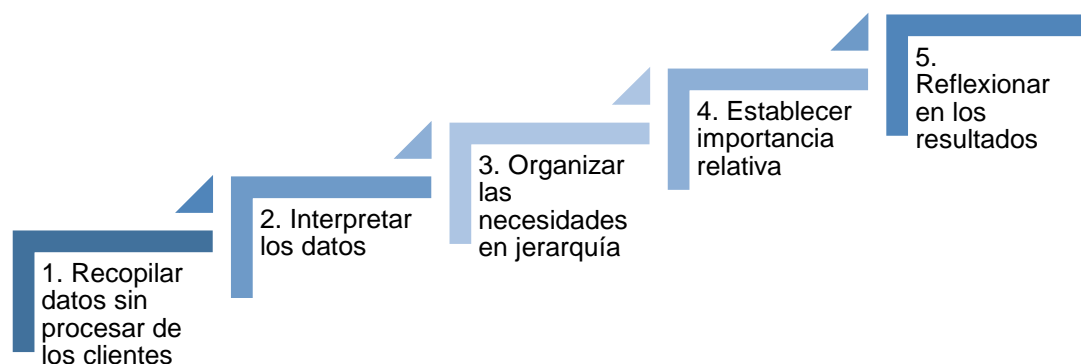
La ingeniería de concepto es la fase donde se identifican las necesidades de los usuarios, con esto se generan y evalúan posibles conceptos del producto para su posterior desarrollo (Ulrich & Eppinger, 2013).

Un concepto es una descripción de la forma, función y características del producto; además cuenta con un conjunto de especificaciones propias y una justificación económica del proyecto. El proceso de desarrollo de producto incluye las siguientes actividades:



- Identificar las necesidades del cliente

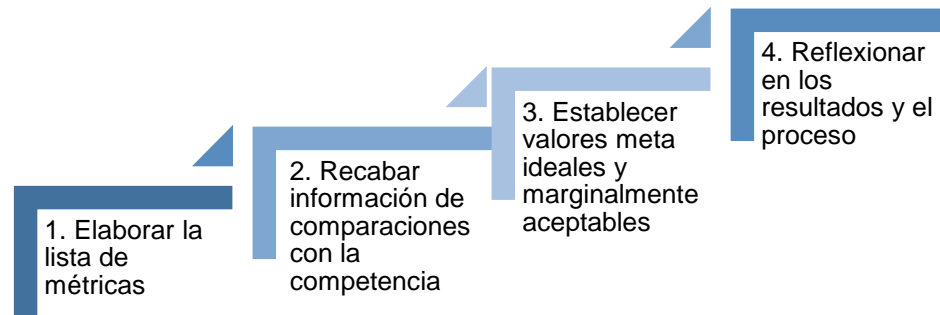
En esta actividad se proporciona una base de datos que justificará las especificaciones del producto. Para una identificación adecuada se recomienda seguir los siguientes pasos:



Como resultado obtendremos un conjunto de enunciados de las necesidades del cliente; organizados en una lista jerárquica con valores de importancia a cada necesidad.

- Establecer especificaciones objetivo

Las especificaciones dan una descripción precisa de lo que el producto tiene que hacer, se los puede llamar “requisitos del producto” o “características ingenieriles” estas características son variables de diseño como: viscosidad, velocidad, temperatura, etc. Para establecer las especificaciones objetivo se recomienda realizar:



El resultado de esta etapa es una lista de especificaciones objetivo. Cada una de las especificaciones consta de una métrica, además valores marginales e ideales que deberán cumplir.

- Generación de conceptos

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología y forma del producto, por lo general se expresa como un bosquejo o como un modelo tridimensional aproximado acompañado por una breve descripción conceptual.

La meta de la generación de conceptos es explorar en su totalidad el universo de conceptos de producto que puedan satisfacer de una manera u otra las necesidades del cliente.

- Selección del concepto

La selección del concepto es la actividad en la que se evaluará los conceptos con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios; es importante comparar los puntos fuertes y débiles de los conceptos para eliminar varios conceptos e identificar el mejor.

- Prueba del concepto

Uno o más conceptos se prueban para verificar que cumple con los requerimientos para el cliente para en el caso de ser necesario corregir cualquier defecto.

Para esto se pueden utilizar encuestas en una población definida comunicando todo el concepto con sus características.

- Establecer especificaciones finales

Luego de elegir el concepto final las especificaciones objetivo se revisan para convertirlas en valores definidos y más precisos tomando en cuenta limitaciones identificadas por medio de modelado técnico y relaciones entre costo y operación.

### **Ingeniería básica**

La ingeniería básica es la segunda fase del proyecto; es donde se establece subsistemas e interfaces principales del concepto ya escogido, refinar el diseño ya escogido y realizar una ingeniería preliminar de componentes con una lista de cantidades para su armado.

Es necesario además un bosquejo en 3D del diseño definitivo para conocer de manera aproximada la ubicación de los elementos; el área de manufactura debe realizar un análisis de comprar versus fabricar además buscar proveedores para los elementos.

**Ingeniería de detalle**

Es la fase culminante del proyecto antes de su ejecución; es esta etapa ya se realizan cálculos necesarios para la geometría de piezas, planos, diagramas de flujo y/o programación.

Ya que los conceptos han sido aprobados y pasaron algunos filtros para su diseño se deben diseñar todos y cada uno de los elementos del proyecto; el objetivo principal de esta fase es definir con precisión la ejecución del proyecto generando la documentación necesaria que permitirá llevar el proyecto a la práctica, ya sea bajo la dirección de los mismos proyectistas o por otro equipo de ingeniería distinto.

## Ingeniería del robot seguidor de línea categoría destreza

Para comenzar con la ingeniería del robot seguidor de línea es necesario establecer las restricciones y objetivos generales para el prototipo.

**Tabla 4**

*Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>Declaración de la misión: prototipo de robot seguidor de línea para competencias</b>	
<b>Descripción del producto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robot que puede desplazarse de manera autónoma sobre una ruta indicada visualmente, generalmente en forma de una línea negra sobre un fondo blanco o viceversa.</li> </ul>
<b>Propuesta de valor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipo sencillo de implementar</li> <li>• Diseño apto para competencias nacionales e internacionales</li> </ul>
<b>Objetivos clave de negocio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brindar una guía técnica a personas con diferentes niveles de conocimiento en robótica para el desarrollo de prototipos</li> <li>• Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de un robot seguidor de línea</li> </ul>
<b>Mercado primario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE</li> </ul>
<b>Mercados secundarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Universidad que cuenten con un club de robótica propio</li> <li>• Escuelas y colegios</li> </ul>
<b>Suposiciones y restricciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallos mecánicos en pistas con poca fricción</li> <li>• Desconexión de elementos eléctricos y/o electrónicos por movimientos bruscos</li> <li>• Problemas con tiempo de respuesta de sensores y/o microcontrolador.</li> <li>• Presupuesto limitado para la compra de los materiales</li> </ul>
<b>Involucrados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE</li> <li>• Docentes y estudiantes de escuelas y colegios</li> </ul>

## Ingeniería de concepto del robot seguidor de línea categoría destreza

### Identificar las necesidades del cliente

Las competencias de robótica se enfocan en estudiantes que crean sus propios prototipos, por esto es necesario conocer las características mínimas que se requieren; para esto se analizó el reglamento del último Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER 2019) obteniendo características técnicas y físicas que debe tener el prototipo. Además, se realizó una consulta a estudiantes que participaron en las competencias.

**Tabla 5**

*Necesidades en un prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza*

Número	Necesidad
1	Robot totalmente autónomo
2	La alimentación debe ser con baterías de cualquier tipo de corriente continua
3	Los sensores pueden operar con cualquier intensidad de luz
4	El robot deberá recorrer toda la pista de manera autónoma pasando por los obstáculos
5	Las ruedas del robot no se deben deslizar en la pista
6	La batería del robot debe durar lo suficiente para la competencia
7	Poco peso
8	Tamaño compacto
9	El robot debe ser resistente a golpes

### Establecer especificaciones objetivo

- **Métricas**

Para conocer de mejor manera que especificaciones debemos tener en nuestro prototipo es necesario realizar una lista de métricas basadas en las necesidades



**Tabla 6***Métrica para especificaciones del robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa
<b>5</b>	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s
<b>6</b>	9	Resistencia al impacto	2	Pa

- **Recabar información de comparaciones con la competencia**

**Tabla 7***Métricas de robots comerciales del robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Dynamo</b>	<b>Dynabot II</b>	<b>Robot Talos</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo	5	5	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	8000	1000	2600
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	1	0,9	0,67
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1	0,08
<b>5</b>	4,8	Velocidad máxima de desplazamiento	5	m/s	0,5	1	0,7
<b>6</b>	9	Resistencia	2	MPa	0,05	0,12	0,07

- **Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables**

Luego de conocer algunos de los robots seguidores de línea comerciales se establecen los valores para nuestro prototipo.

**Tabla 8**

*Valores establecidos de métricas del robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
1	1	Capacidad de autonomía	5	Sub.	4	5
2	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	800	8000
3	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	1,5	0,5
4	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1
6	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s	0,5	1,5
7	9	Resistencia al impacto	2	Pa	0,05	0,12

### **Generación de conceptos**

Para generar conceptos es necesario analizar las características y disponibilidad de los elementos que serán utilizados en el prototipo; para esto se realizará un análisis de la parte estructural (chasis) y microcontroladores disponibles.

- **Chasis y ruedas**

Para la parte estructural se utilizarán plataformas probadas disponibles comercialmente ya que este proyecto se enfoca en el diseño eléctrico, electrónico y de control.

Tabla 9

*Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot seguidor de línea categoría destreza*

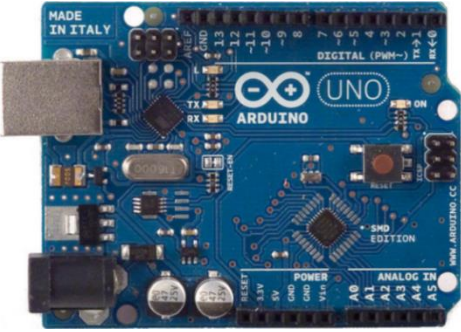





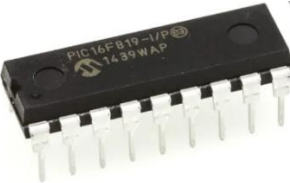
	<b>MODELO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
	Chasis de 4 ruedas	Acrílico transparente de 4mm 4 ruedas
	Chasis de 2 ruedas	Acrílico de 5mm 2 ruedas
	Chasis de 3 ruedas	Acrílico de 3mm color café 2 ruedas y 1 rueda de giro libre
	Chasis circular de 2 ruedas	Acrílico de 3mm varios colores 2 ruedas

- **Microcontrolador y sensores**

Con base en el estado del arte y a información obtenida por parte de participantes en competencias de robótica se analizarán algunos microcontroladores y sensores adecuados para un prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza.

Tabla 10

Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente del robot seguidor de línea categoría destreza

MICROCONTROLADOR	SENSOR
<p data-bbox="440 741 623 768"><b>ARDUINO UNO</b></p> 	<p data-bbox="919 342 1240 369">Sensor infrarrojo QRD1114</p> 
	<p data-bbox="927 657 1232 684">Sensor infrarrojo IR FC-51</p> 
	<p data-bbox="902 951 1256 978">Sensor infrarrojo IR TCRT5000</p> 
	<p data-bbox="829 1171 1330 1199">Sensor de reflectancia analógico (QTR-6A)</p> 
	<p data-bbox="841 1381 1318 1409">Sensor de reflectancia digital (QTR-6RC)</p> 
	<p data-bbox="464 1593 597 1621"><b>PIC 16F819</b></p> 

**ATMEGA324PA****Sensor de reflectancia analógico (QTR-8A)****Selección del concepto**

- **Ponderación de conceptos**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

**Tabla 11**

*Ponderación de hardware disponible para robot seguidor de línea categoría destreza*

Chasis y ruedas	Peso	Chasis de 4 ruedas		Chasis de 3 ruedas		Chasis de 2 ruedas		Chasis circular de 2 ruedas	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Velocidad</b>	40%	3	1.2	4	1.6	5	2	5	2
<b>Peso</b>	25%	1	0.25	3	0.75	4	1	5	1.25
<b>Estética</b>	5%	1	0.05	3	0.15	5	0.25	4	0.2
<b>Facilidad de ensamble</b>	5%	2	0.10	4	0.20	5	0.25	5	0.25
<b>Equilibrio</b>	10%	5	0.5	3	0.3	2	0.2	1	0.1
<b>Resistente a caídas</b>	5%	3	0.15	2	0.10	4	0.2	2	0.1
<b>Resistente a movimiento</b>	10%	4	0.4	3	0.3	5	0.5	3	0.3
<b>TOTAL</b>	100%		2.65		3.4		<b>4.4</b>		<b>4.2</b>

Tabla 12

*Ponderación de microcontroladores disponibles para robot seguidor de línea categoría destreza*

Microcontrolador	Peso	ARDUINO UNO		PIC 16F819		ATMEGA324PA	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Costo</b>	15%	4	0,6	5	0,75	4	0,6
<b>Peso</b>	5%	4	0,2	5	0,25	5	0,25
<b>Estética</b>	5%	4	0,2	5	0,25	4	0,2
<b>Facilidad de instalación</b>	15%	5	0,75	4	0,6	4	0,6
<b>Costo por programación</b>	10%	5	0,5	3	0,3	3	0,3
<b>Velocidad de procesamiento</b>	20%	5	1	4	0,8	5	1
<b>Facilidad de programación</b>	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4
<b>Memoria suficiente</b>	10%	5	0,5	3	0,3	5	0,5
<b>Consumo</b>	10%	4	0,4	3	0,3	2	0,2
<b>TOTAL</b>	100%	<b>4,55</b>		3,95		4,05	

Tabla 13

*Ponderación sensores disponibles para prototipo de seguidor de línea categoría destreza*

Criterios de selección	Peso	Sensor infrarrojo QRD1114		Sensor infrarrojo IR FC-51		Sensor infrarrojo IR TCRT5000		Sensor de reflectancia analógico QTR-6A		Sensor de reflectancia digital (QTR-6RC)	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Costo</b>	5%	5	0,25	4	0,2	4	0,2	3	0,15	2	0,1
<b>Peso</b>	5%	3	0,15	3	0,15	5	0,25	5	0,25	5	0,25
<b>Estética</b>	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6	5	0,75	5	0,75
<b>Facilidad de instalación</b>	5%	3	0,15	4	0,2	5	0,25	5	0,25	5	0,25
<b>Área</b>	10%	3	0,3	4	0,4	4	0,4	4	0,4	4	0,4
<b>Precisión</b>	5%	3	0,15	4	0,2	3	0,15	5	0,25	5	0,25
<b>Consumo</b>	10%	3	0,3	4	0,4	5	0,5	5	0,5	5	0,5
<b>Fiabilidad</b>	5%	4	0,2	4	0,2	3	0,15	4	0,2	4	0,2
<b>Sensibilidad</b>	15%	3	0,45	4	0,6	4	0,6	5	0,75	5	0,75
<b>Facilidad de manejo de datos de salida</b>	10%	3	0,3	4	0,4	4	0,4	5	0,5	5	0,5
<b>Resolución</b>	5%	3	0,15	4	0,2	4	0,2	5	0,25	4	0,2
<b>SUMA TOTAL</b>	100%	3,3		3,95		4,1		4,75		4,65	

En la Tabla 11 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, la mejor opción para un prototipo de seguidor de línea categoría destreza es un chasis de 2 ruedas, posee las siguientes características:

- Velocidad
- Poco peso
- Es sencillo para armar y desarmar
- Resistente a movimiento y caídas

En la Tabla 13 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, hay dos opciones para detectar las líneas: sensor de reflectancia analógico QTR-6A y sensor de reflectancia digital (QTR-6RC) ya que tienen las mejores características:

- Facilidad de instalación
- Precisión
- Sensibilidad
- Resolución
- **Combinación de conceptos**

**Tabla 14**

*Combinación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis rectangular 2 ruedas</b>	Sensor de reflectancia analógico QTR-6A
	Sensor de reflectancia digital QTR-6RC



A través de la Tabla 14 y las diferentes soluciones presentadas para el prototipo se puede combinar dichas soluciones y crear dos conceptos que serán representados para su análisis y posteriormente seleccionar el mejor concepto para el desarrollo.

- **Concepto uno**

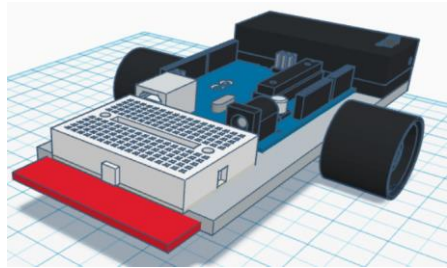
**Tabla 15**

*Características concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza*

CHASIS Y RUEDAS	SENSOR
Chasis rectangular 2 ruedas	Sensor de reflectancia analógico QTR-6A

**Tabla 16**

*Desarrollo concepto uno del robot seguidor de línea categoría destreza*

CONCEPTO UNO	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo contará con un arreglo de sensores con salida analógica para detectar la línea, su movimiento se realizará con 2 motores DC. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	

- **Concepto dos**

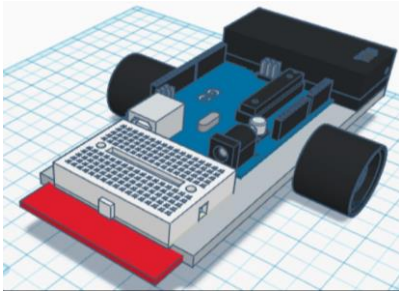
**Tabla 17**

*Características concepto dos del robot seguidor de línea categoría destreza*

CHASIS Y RUEDAS	SENSOR
Chasis rectangular 2 ruedas	Sensor de reflectancia digital QTR-6RC

Tabla 18

*Desarrollo concepto dos del robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>CONCEPTO DOS</b>	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo contará con un arreglo de sensores con salida digital para detectar la línea, su movimiento se realizará con 2 motores DC. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	

- **Evaluación del concepto**

Los parámetros o criterios que se toman en cuenta en la selección de conceptos fueron costo, peso, estética, facilidad de programación, equilibrio, precisión, consumo, fiabilidad, sensibilidad y por último la resistencia a movimientos.

Dichos parámetros se incluyeron en la tabla comparativa, asignándole un valor entre 0 (mal desempeño) y 5 (buen desempeño) de acuerdo al peso de cada criterio. Por último, fueron sumados estos valores para obtener un total se aceptarán valores en el desde 4.2 hasta 5 para ser considerados para su implementación.

Tabla 19

*Evaluación de conceptos del robot seguidor de línea categoría destreza*

<b>Sensores</b>	<b>Peso</b>	<b>Concepto 1</b>		<b>Concepto 2</b>	
		Calificación	Valor parcial	Calificación	Valor parcial
<b>Costo</b>	10%	5	0.50	3	0.30
<b>Peso</b>	10%	4	0.40	4	0.40
<b>Estética</b>	5%	4	0.20	4	0.20
<b>Facilidad de programación</b>	10%	5	0.50	5	0.50
<b>Equilibrio</b>	5%	4	0.20	4	0.20
<b>Precisión</b>	10%	4	0.40	5	0.50
<b>Consumo</b>	5%	4	0.20	3	0.15
<b>Fiabilidad</b>	10%	4	0.40	5	0.50
<b>Sensibilidad</b>	20%	4	0.80	4	0.80
<b>Resistencia a movimientos</b>	15%	4	0.60	4	0.60
<b>SUMA TOTAL</b>	100%	<b>4.2</b>		4.15	

De acuerdo a la Tabla 19 el concepto número uno alcanzó la suma más alta, a pesar de que las dos opciones de sensores son recomendadas para este tipo de prototipo debido al criterio costo se utilizará el sensor de reflectancia analógico QTR-6A (Arduino UNO posee 6 PINES analógicos ).

Se puede entonces concluir que el concepto número uno es el más viable a desarrollar debido a que cumple con las necesidades de un robot seguidor de línea categoría destreza.

- **Especificaciones finales**

---

**Características**


---

**CHASIS**


- Acrílico color negro
- Grosor 5mm
- 2 Ruedas

**CONTROLADO ARDUINO UNO**

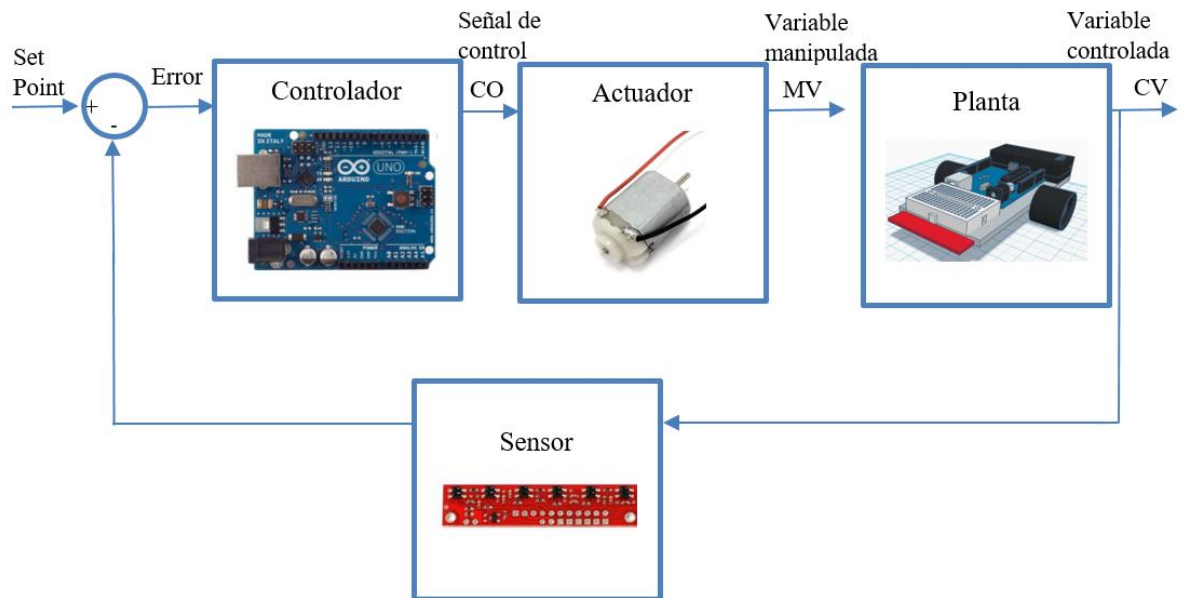

- Microcontrolador principal: Atmega328P  
DIP28 desmontable
- 14 pines digitales de entrada / salida (6 salidas PWM).
- 6 entradas analógicas
- Conector de alimentación (7-12VCD)
- Memoria 32 KB

**SENSOR DE REFLECTANCIA  
ANALÓGICO QTR-6A**


- Voltaje de funcionamiento: 3.3V-5,0 V
  - Consumo de corriente: 100 mA
  - Formato de salida: Voltaje análogo
  - Distancia óptima de detección: 3 mm
-

## Ingeniería básica del robot seguidor de línea categoría destreza

### Esquema del prototipo



### Características de funcionamiento

El movimiento de un prototipo de seguidor de línea normalmente es de un lado a otro para que los sensores lean la ruta o línea sobre el fondo.

**Figura 10**

*Movimiento de un robot seguidor de línea (Portales Rioseco, y otros, 2015)*

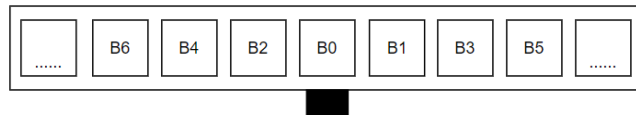


El objetivo en las competencias de robots seguidores de línea es que el robot siempre esté en el centro de la línea para lograr esto el diseñador utiliza un número par o impar de

sensores y dependiendo de ese número se conocerá la ubicación del robot; es necesario conocer los giros que puede realizar un robot seguidor de línea.

**Figura 11**

*Arreglo de sensores de un robot seguidor de línea*

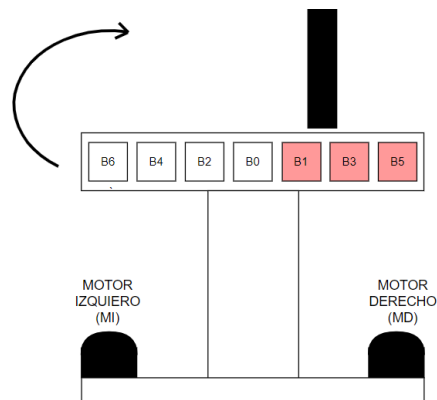


- **Caso 1 Giro horario**

En este caso los sensores de la parte derecha se encienden, en la Figura 11 se puede ver la ubicación de los sensores y si se encienden B1, B3 y/o B5 es una indicación de que se debe realizar un giro horario.

**Figura 12**

*Condiciones para que el prototipo realice un giro horario*



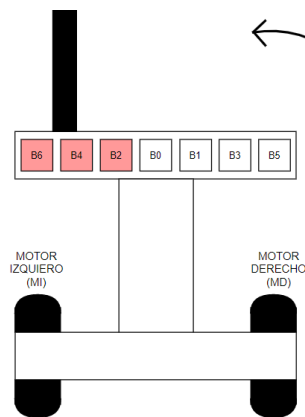
Para que el prototipo realice un giro horario es necesario bajar la velocidad del motor derecho y aumentar la del motor izquierdo; cuando se acerque cada vez más a los sensores del centro se debe disminuir la velocidad del motor izquierdo y aumentar la velocidad del motor derecho hasta adquirir una velocidad constante.

- **Caso 2 Giro anti horario**

En este caso los sensores de la parte izquierda se encienden, en la Figura 11 se puede ver la ubicación de los sensores y si se encienden B2, B4 y/o B6 es una indicación de que se debe realizar un giro horario.

**Figura 13**

*Condiciones para que el prototipo realice un giro anti horario*



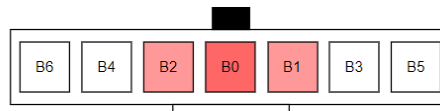
Para que el prototipo realice un giro anti horario es necesario bajar la velocidad del motor izquierdo y aumentar la del motor derecho; cuando se acerque cada vez más a los sensores del centro se debe disminuir la velocidad del motor derecho y aumentar la velocidad del motor izquierdo hasta adquirir una velocidad constante.

- **Caso 3 Velocidad continua**

Este es un caso puntual para prototipos en la categoría velocista ya que no existirá en la pista secciones con curvas muy cerradas o líneas entrecortadas, se utiliza la velocidad continua en tramos cortos; los sensores que detectan la línea son los centrales, dependiendo del diseño de los sensores serán 1, 2 o máximo 3.

**Figura 14**

*Condiciones para que el prototipo mantenga velocidad constante*



### **Sistema de control**

El diseño final del robot seguidor de línea categoría destreza utiliza dos ruedas paralelas entre sí es decir con una configuración de tracción diferencial que le permitirá cruzar curvas cerradas con ángulos hasta de 30°, discontinuidades, líneas cruzadas y desvíos.

**Figura 15**

*Robot seguidor en una curva de 30°*

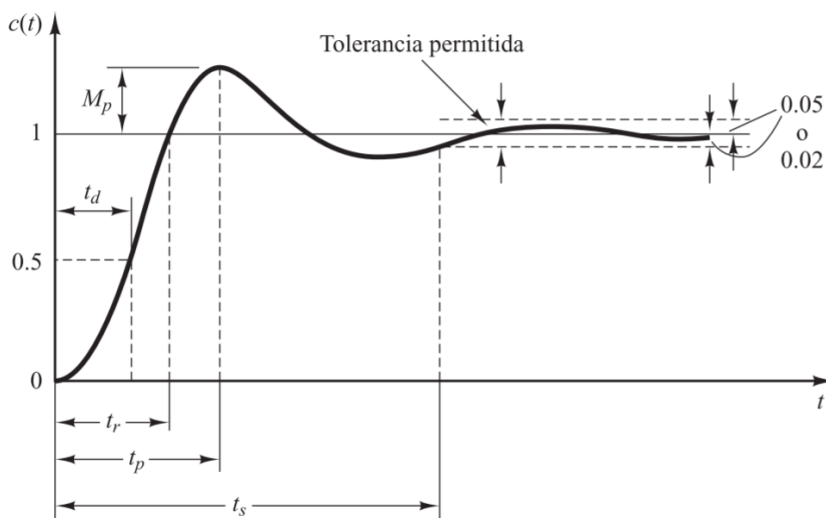


Un robot seguidor de línea es un sistema de respuesta rápida que requiere de gran estabilidad para evitar perder su línea de referencia; es necesario controlar las velocidades de los motores (derecho e izquierdo independientes) utilizando algoritmos de control.



Figura 16

Curva de respuesta a escalón unitario (Ogata, 2003)



$M_p$  (Overshoot o Sobreimpulso) cantidad de voltaje de salida que excede su valor objetivo, se puede expresar en porcentaje.

$t_s$  (Setting time o tiempo de establecimiento) tiempo requerido para que las oscilaciones amortiguadas alcancen y permanezcan dentro del  $\pm 2\%$  o  $\pm 5\%$  del valor deseado.

- **Objetivo de control**

Parámetros	Valor
$t_s$	$50ms \leq t_s \leq 500ms$
$M_p$	$5\% \leq M_p \leq 8\%$
$e_{ss}$	2%

Al ser un robot para competencias lo que deseamos es que la respuesta del robot seguidor de línea sea rápida además se requiere gran estabilidad (Tapeiro Santa, 2019).

Para conocer el comportamiento del robot y aplicar un adecuado algoritmo de control son necesarias las ecuaciones que modelan o rigen al motor derecho e izquierdo; estas

ecuaciones vienen determinadas por el voltaje aplicado y la velocidad angular que produce el voltaje (salida) y pueden ser determinadas por los datos del motor.

$$G(s) = \frac{k_t * r_2}{(Ls + R) * (J_{eq}s + b_{eq}) + k_t k_v r_2} \quad (1)$$

Donde:

- $k_t$  constante del motor.
- $k_v$  constante de velocidad del motor.
- $r_2$  máxima eficiencia
- $L$  inductancia del motor.
- $b_{eq} (\tau * J)$  resistencia equivalente en primario (rozamiento primario\*inercia rotor)
- $R$  resistencia bobinado (Azcon, 2003).
- $J_{eq}$  Inercia equivalente en primario

De acuerdo a las especificaciones técnicas del motor 1741U006CXR FAULHABER (FAULHABER):

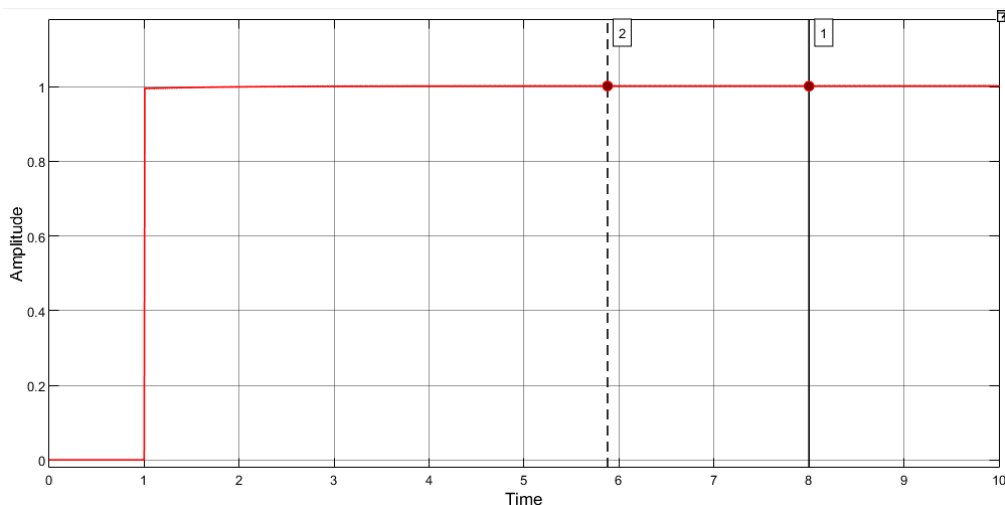
Parámetros	Valor
$\nu$	7100 RPM
$k_t$	0,00733 Nm/A
$k_v$	0,00733 V/rad/ seg
$r_2$	0,72
$L$	35 x 10-8 H
$b_{eq}$	7,74 x 10-8
$R$	1,3 $\Omega$
$J_{eq}$	1,26 x 10-6

Con los parámetros la función de transferencia del motor DC queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{0,0052776}{4,41x10^{-13}s^2 + 1,638x10^{-6}s + 3,87x10^{-5}} \quad (2)$$

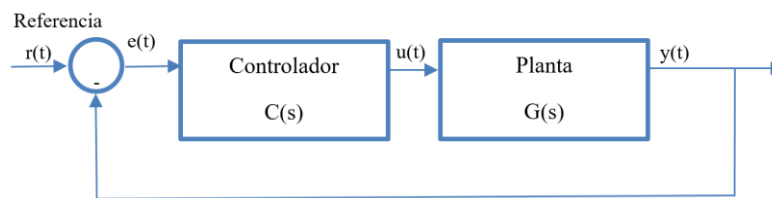
Figura 17

Curva de respuesta a escalón unitario



De la Figura 17 obtenemos algunos datos que serán comparados con las señales de salida con algoritmos de control.

Parámetros	Respuesta a escalón unitario
Tiempo de subida $T_r$ seg	5,87
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8
Sobreimpulso $M_p$ %	0



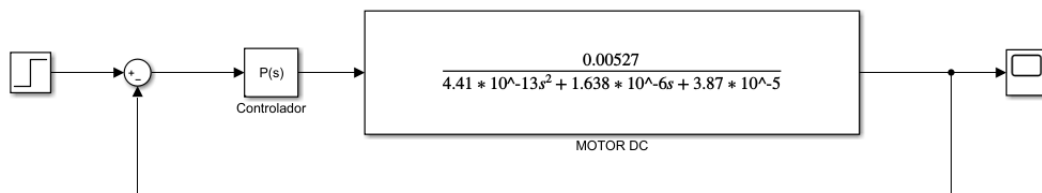
Con la ecuación (2) se desarrollarán algoritmos de control y analizar sus respuestas

- **Algoritmo de control proporcional (P)**

Con este algoritmo se realiza un control suave (variaciones pequeñas). Existe una relación proporcional entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ .

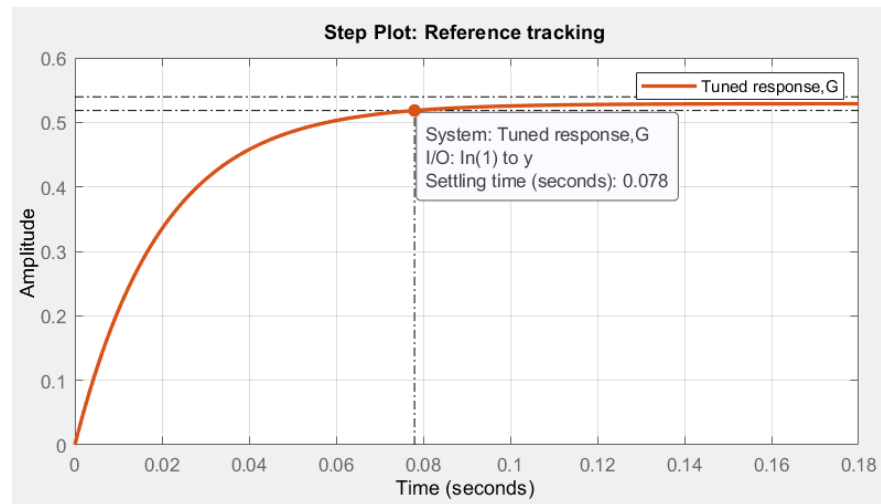
$$u(t) = K_p * e(t) \quad (3)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (4)$$



**Figura 18**

*Respuesta del sistema con un control P*



Obteniendo la ecuación para un controlador P

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,0082 \quad (5)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	5,87	0,0438	99%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8	0,078	99%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	0	-

Se observa ver que se cumple con la restricción del tiempo de establecimiento, pero no tenemos sobreimpulso por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control integral (I)**

Con un algoritmo integral lo que hacemos es acumular errores del pasado utilizando la ecuación guardándolo en la memoria mientras transcurre el tiempo y cada vez que se realiza una integral permite tener una respuesta más a la referencia.

$$u(t) = K_i * \int_0^t e(t) d(t) \quad (6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

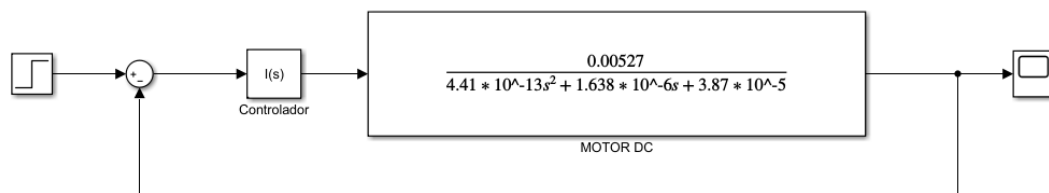
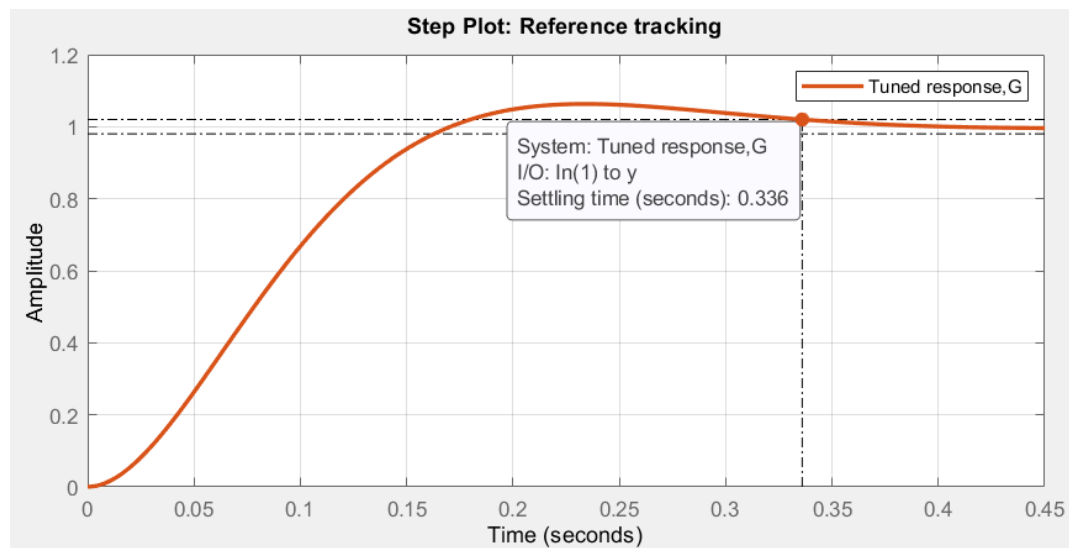


Figura 19

Respuesta del sistema con un control I



Obteniendo la ecuación para un controlador I

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{0,099}{s} \quad (8)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ , seg	5,87	0,11	98%
Tiempo de establecimiento $t_s$ , seg	8	0,336	96%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	6,32	-

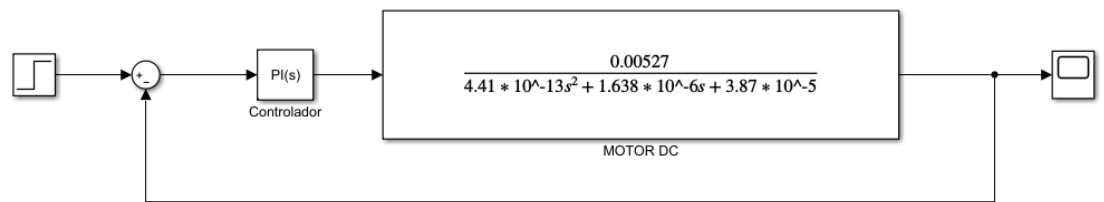
Se observa que se cumple con la restricción del tiempo de establecimiento, pero tenemos un sobreimpulso muy alto por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional integral (PI)**

Es una combinación de algoritmos para intentar disminuir el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento.

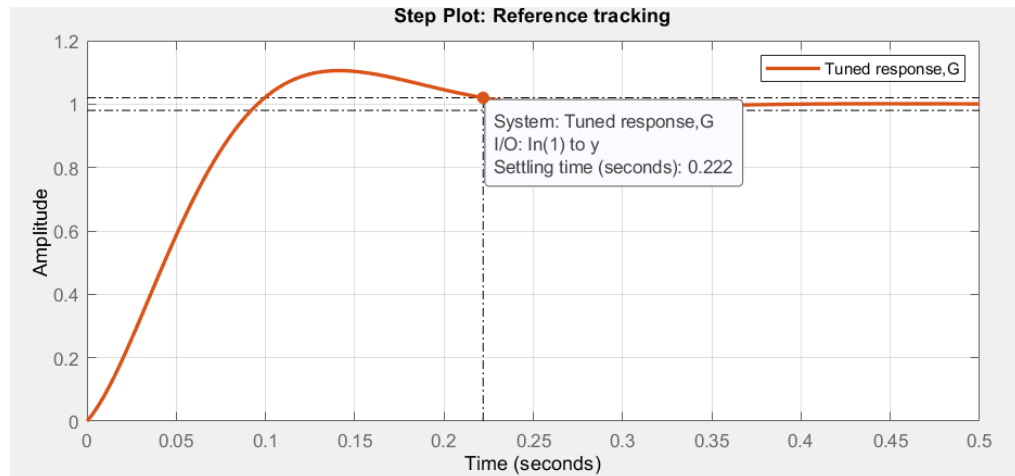
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt \quad (9)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (10)$$



**Figura 20**

*Respuesta del sistema con un control PI*



Obteniendo la ecuación para un controlador PI

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,0019 \left( 1 + \frac{1}{0,00978s} \right) \quad (11)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ , seg	5,87	0,06	99%
Tiempo de establecimiento $t_s$ , seg	8	0,22	97%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	10,6%	-

Se observa que el tiempo de establecimiento mejora considerablemente, pero tenemos un sobreimpulso muy alto por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional derivativo (PD)**

Es una combinación de algoritmos para intentar disminuir el sobreimpulso y mejorar su estabilidad.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_p T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (13)$$

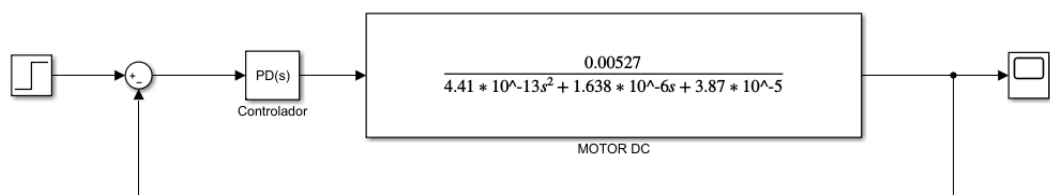
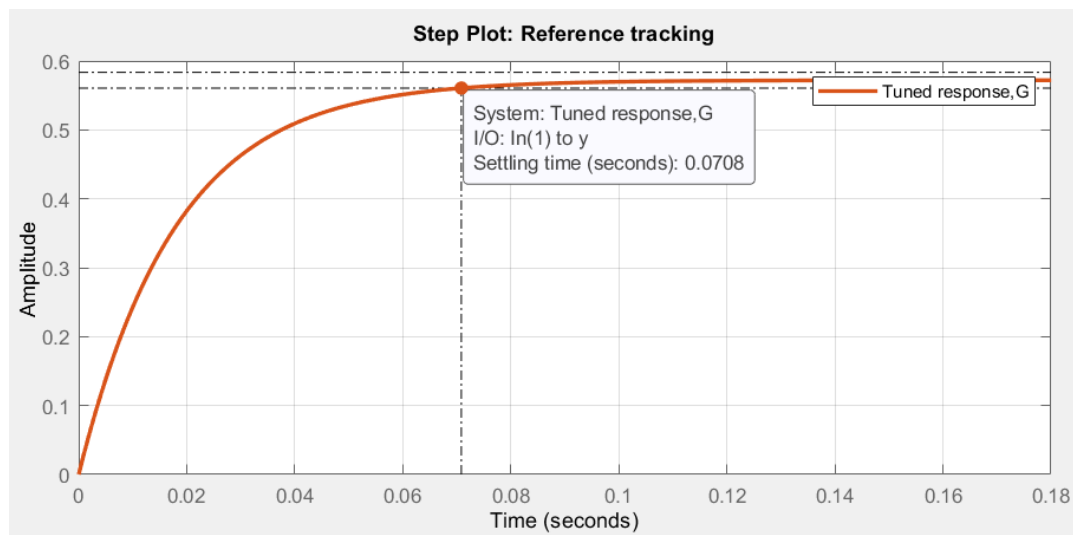




Figura 21

Respuesta del sistema con un control PD



Obteniendo la ecuación para un controlador PD

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,009 \quad (14)$$

El parámetro de  $T_d = 0$  para obtener esta respuesta

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	5,87	0,03	99%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8	0,07	99%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	0	-

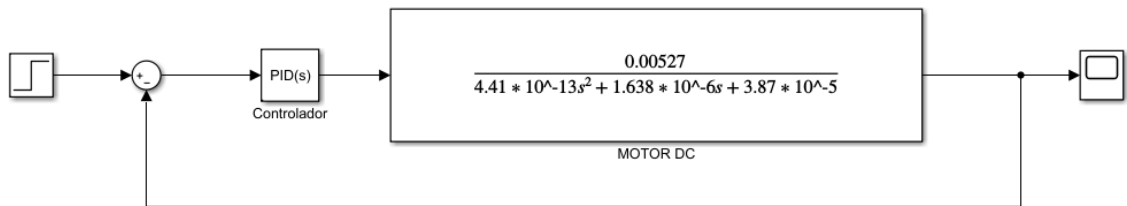
Se observa que el tiempo de establecimiento ha mejorado considerablemente, no tenemos sobreimpulso y tenemos un error en estado estacionario muy alto (casi del 50%) por lo que no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional integral derivativo (PID)**

El algoritmo principal de este controlador se compone de control proporcional (depende del error actual), control integral (se enfoca en los errores pasados) y el control derivativo (permite predecir errores a futuro).

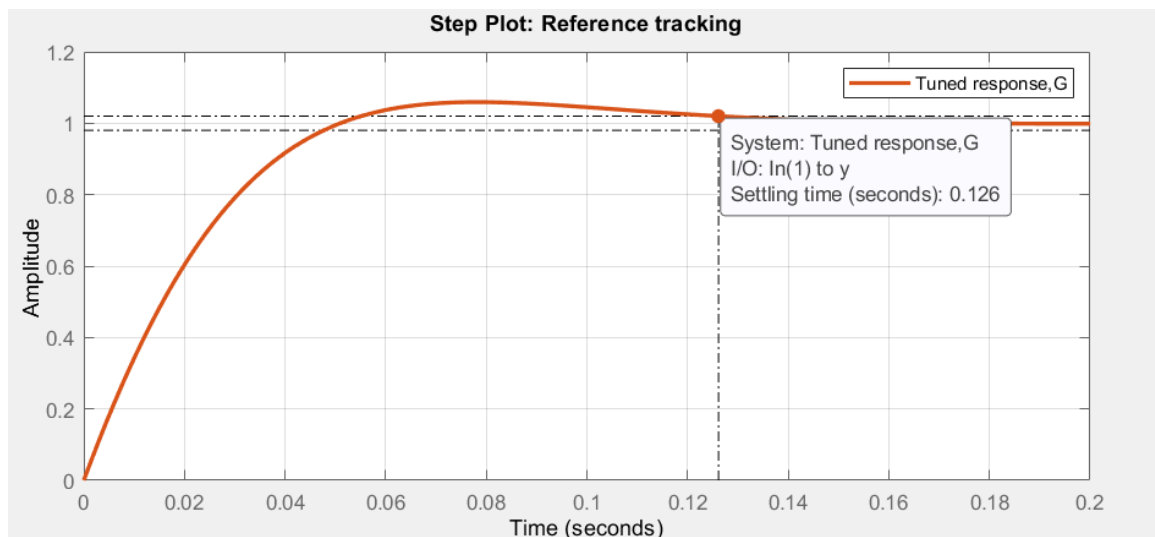
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt + K_p T_d * \frac{d e(t)}{dt} \quad (15)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (16)$$



**Figura 22**

*Respuesta del sistema con un control PID*



Obteniendo la ecuación para un controlador PID

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,011 \left( 1 + \frac{1}{0,022s} \right) \quad (17)$$

Para obtener esta respuesta  $T_d = 0$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	5,87	0,035	99%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8	0,126	98%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	5,93%	-

En la Figura 222, al utilizar un algoritmo proporcional integral derivativo se observa que no hay un error en estado estacionario ya que la señal de respuesta se estabiliza en el valor deseado, el tiempo de establecimiento es corto; además tenemos un sobreimpulso casi del 6% lo que provocará pequeñas oscilaciones en el robot que son necesarias para la lectura constante de la línea, por lo tanto es el algoritmo más recomendable.

Tabla 20

Comparación de respuesta de controladores

Parámetros	Control Proporcional	Control Integral	Control proporcional integral	Control proporcional derivativo	Control proporcional integral derivativo
Tiempo de subida $T_r$ , seg	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Tiempo de establecimiento $t_s$ , seg	Disminuye	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Sobreimpulso $M_p$ %	Nulo	Aumenta	Aumenta	Nulo	Disminuye

En la tabla 20 se observa algunos de los parámetros más importantes de los controladores aplicados en la planta; en nuestro diseño la prioridad es que exista un bajo sobreimpulso (no puede ser nulo) por lo que el control proporcional y control proporcional derivativo no son algoritmos recomendables en este tipo de prototipo de robot, además es necesario que el tiempo de establecimiento sea corto por lo que el control integral tampoco es un algoritmo que se debería aplicar a este tipo de prototipo .

Tabla 21

Comparación de parámetros de controladores con valores marginales e ideales

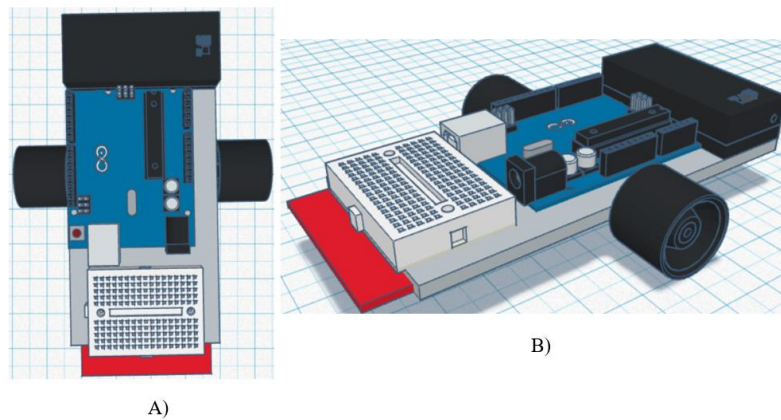
Parámetros	Control proporcional integral	Control proporcional integral derivativo	Valor marginal	Valor ideal
Tiempo de subida $T_r$ seg	0,06	0,035	0,10	0,05
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	0,22	0,126	0,5	0,05
Sobreimpulso $M_p$ %	10,6%	5,93%	8%	5%

De acuerdo a los parámetros en la tabla 21 el algoritmo que cumple mejor con los objetivos de control es un **control proporcional integral derivativo** ya que posee un corto tiempo de establecimiento y un sobreimpulso bajo para el robot seguidor de línea categoría destreza.

### Disposición geométrica aproximada

Figura 23

Prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza A) Vista superior B) Vista isométrica



## Lista de materiales

**Tabla 22**

*Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza*

ELEMENTO	CANTIDAD
Modulo L298N Puente H	1
Diodos	8
Pulsador	1
Arreglo de sensores analógicos	1
Ruedas	2
Batería 5V	1
Controlador Arduino UNO	1
Mini regleta	1
Motores DC	2

## Presupuesto tentativo

**Tabla 23**

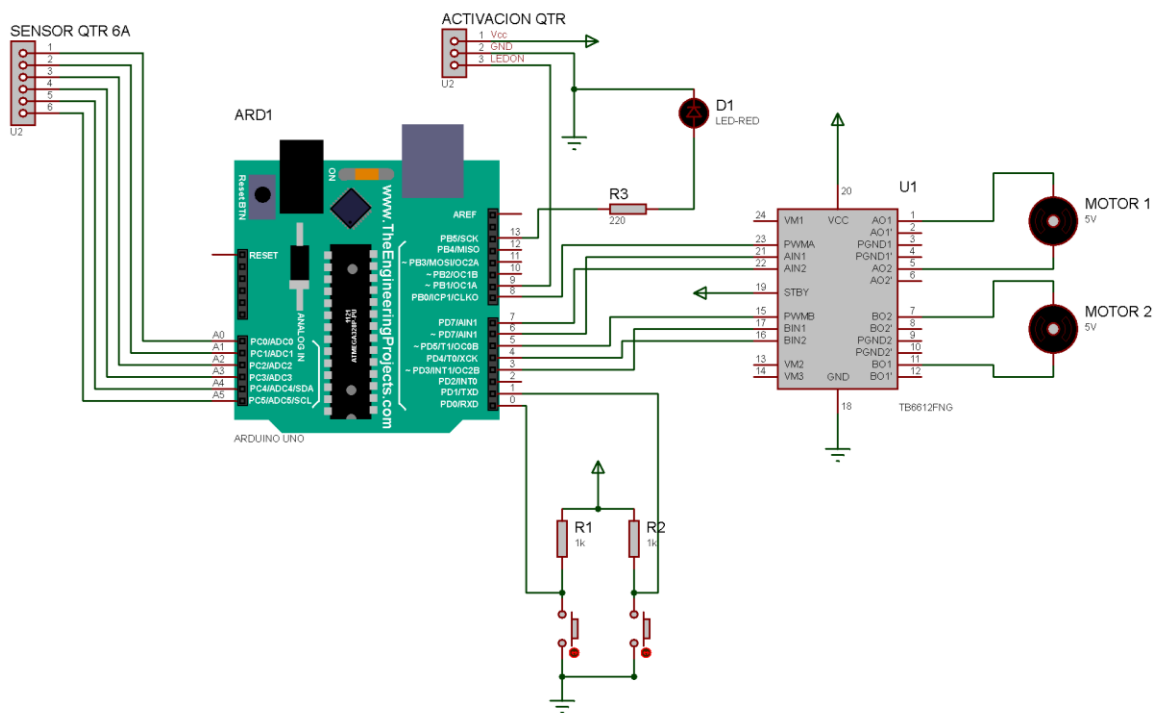
*Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza*

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Módulo L298N Puente H	3	3
8	Diodos	0,1	0,8
1	Pulsador	0,1	0,1
1	Arreglo de sensores analógicos	14	14
1	Chasis seguidor de línea (incluye motores y ruedas)	12	12
1	Batería 5V	6	6
1	Controlador Arduino UNO	40	40
1	Mini regleta	3	3
1	Metro de cable	1	1
<b>Total</b>			<b>US \$79,9</b>

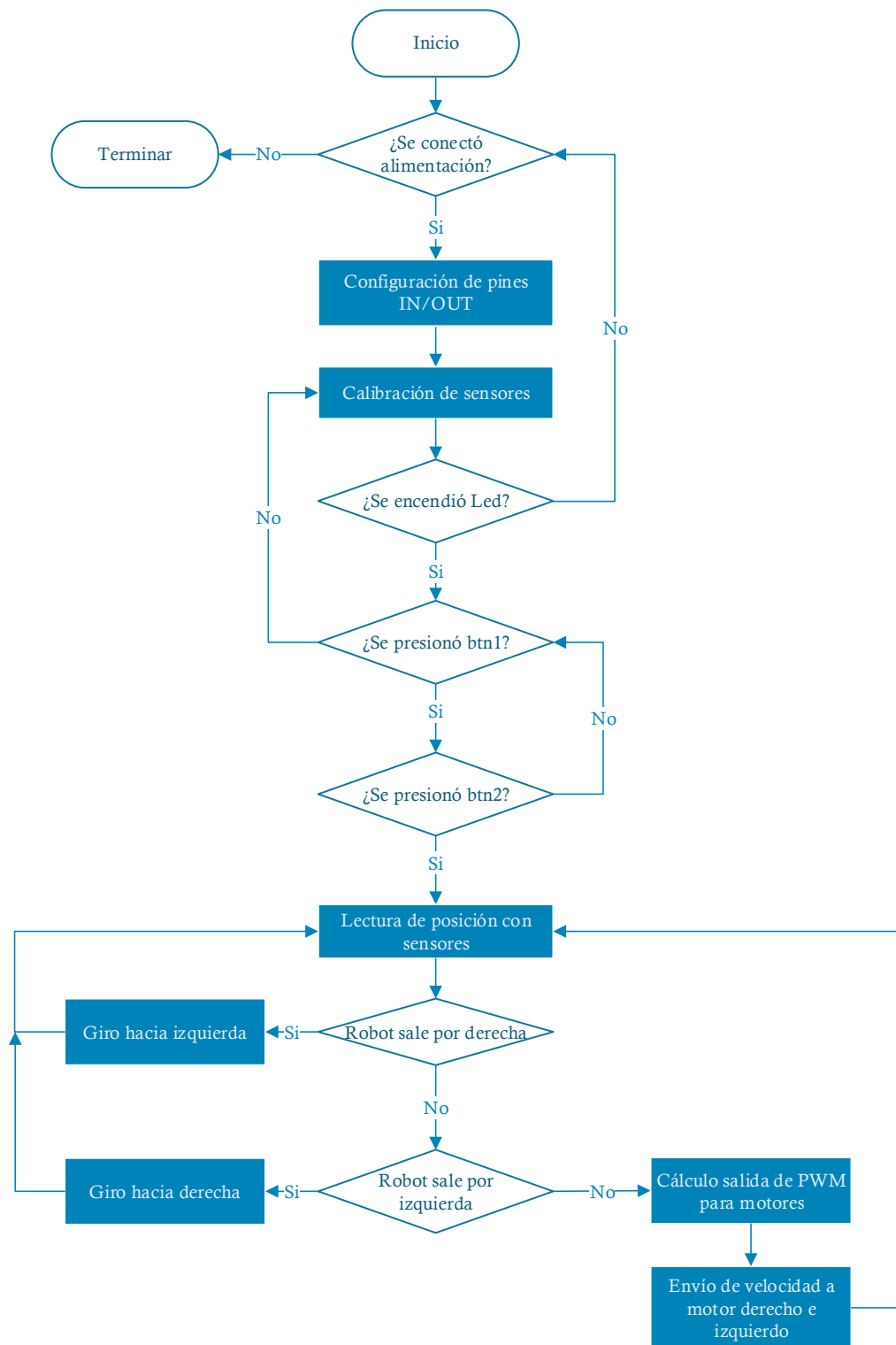
## Ingeniería a detalle del robot seguidor de línea categoría destreza

### Planos eléctricos

El diseño se realizó en software dedicado que es utilizado para elaborar diseños de circuitos electrónicos que permite ver una emulación virtual sobre su funcionamiento determinando así posibles problemas al realizar el diseño en una baquelita de fibra de vidrio.



## Diagrama de flujo





**Pseudocódigo**

PROGRAMA DESTREZA

MIENTRAS calibración

Led=1

FINMIENTRAS

Si botón1= 1 &amp; botón2=1 entonces

Leer posición

Proporcional =posición - 2500

Si proporcional &lt; -2500

Giro a la derecha

Si proporcional &gt; 2500

Giro a la izquierda

Sino cálculo de integral, derivativo

$$\text{salida\_pwm} = (\text{proporcional} * \text{KP}) + (\text{derivativo} * \text{KD}$$

$$)+(\text{integral} * \text{Ki})$$

$$\text{pwmd} = \text{veloc} - \text{salida\_pwm}$$

$$\text{pwmi} = \text{veloc} + \text{salida\_pwm}$$

FinSi

Sino

Led=1

Pausa 1 seg

Led=0

FinSi

FINPROGRAMA

## Ingeniería del robot seguidor de línea categoría velocidad

Para comenzar con la ingeniería del robot seguidor de línea categoría velocidad es necesario establecer las restricciones y objetivos generales para el prototipo.

**Tabla 24**

*Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría velocidad*

<b>Declaración de la misión: prototipo de robot seguidor de línea para competencias</b>	
<b>Descripción del producto</b>	Robot que puede desplazarse de manera autónoma sobre una ruta indicada visualmente en el menor tiempo posible, generalmente en forma de una línea negra sobre un fondo blanco o viceversa.
<b>Propuesta de valor</b>	Prototipo sencillo de implementar Diseño apto para competencias nacionales e internacionales
<b>Objetivos clave de negocio</b>	Brindar una guía técnica a personas con diferentes niveles de conocimiento en robótica para el desarrollo de prototipos Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de un robot seguidor de línea categoría velocidad
<b>Mercado primario</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
<b>Mercados secundarios</b>	Universidad que cuenten con un club de robótica propio Escuelas y colegios
<b>Suposiciones y restricciones</b>	Fallos mecánicos en pistas con poca fricción Desconexión de elementos eléctricos y/o electrónicos por movimientos bruscos Problemas con tiempo de respuesta de sensores y/o microcontrolador. Presupuesto limitado para la compra de los materiales
<b>Involucrados</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Docentes y estudiantes de escuelas y colegios

## Ingeniería de concepto del robot seguidor de línea categoría velocista

### Identificar las necesidades del cliente

La categoría robot seguidor de línea velocista tiene algunas necesidades específicas para las competencias, se realizó una consulta a estudiantes que participaron en las competencias.

**Tabla 25**

*Necesidades en un prototipo seguidor de línea categoría velocista*

Número	Necesidad
1	Robot totalmente autónomo
2	La alimentación debe ser con baterías de cualquier tipo de corriente continua
3	Los sensores pueden operar con cualquier intensidad de luz
4	El robot deberá recorrer toda la pista de manera autónoma en el menor tiempo posible
5	Las ruedas del robot no se deben deslizar en la pista
6	La batería del robot debe durar lo suficiente para la competencia
7	Poco peso
8	Tamaño compacto
9	El robot debe ser resistente a golpes y movimientos bruscos
10	La lectura de sensores debe ser ajustable
11	Costo accesible para estudiantes

### Establecer especificaciones objetivo

- **Métricas**

Para conocer de mejor manera que especificaciones debemos tener en nuestro prototipo es necesario realizar una lista de métricas basadas en las necesidades

Tabla 26

*Métrica para especificaciones del robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa
<b>5</b>	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s
<b>6</b>	9	Resistencia al impacto	3	Pa
<b>7</b>	10	Tiempo de lectura por sensor	4	seg
<b>8</b>	11	Costo por prototipo	3	US\$

- **Recabar información de comparaciones con la competencia**

**Tabla 27**

*Métricas de robots comerciales del robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Ebotics Code Drive</b>	<b>KIT Velocista Seguidor de Línea Velotronics</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Sub.	5	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	2600	1800
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	0,8	0,5
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,1	0,1
<b>5</b>	4,8	Velocidad máxima de desplazamiento	5	m/s	0,45	0,55
<b>6</b>	9	Resistencia al impacto	2	MPa	-	0,12
<b>7</b>	10	Tiempo de lectura por sensor	4	Seg	variable	variable
<b>8</b>	11	Costo por prototipo	3	US\$	80	114

- **Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables**

Luego de conocer algunos de los robots comerciales se establecen los valores para nuestro prototipo.

**Tabla 28**

*Valores establecidos de métricas del robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Sub.	4	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	800	2600
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	1	0,5
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1
<b>5</b>	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s	0,5	1,5
<b>6</b>	9	Resistencia al impacto	2	Pa	0,05	0,12
<b>7</b>	10	Tiempo de lectura por sensor	4	Seg	0,1	0,05
<b>8</b>	11	Costo por prototipo	3	US\$	100	80

### **Generación de conceptos**


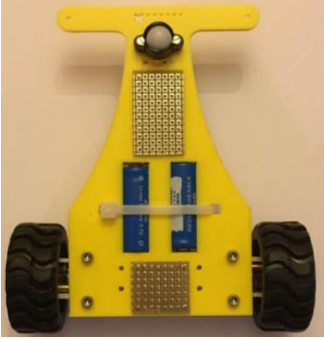
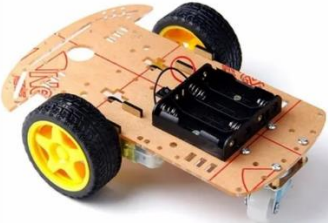
Para generar conceptos es necesario analizar las características y disponibilidad de los elementos que serán utilizados en el prototipo; para esto se realizará un análisis de la parte estructural (chasis) y microcontroladores disponibles.

- **CHASIS Y RUEDAS**

Para la parte estructural se utilizarán plataformas probadas disponibles comercialmente ya que este proyecto se enfoca en el diseño eléctrico, electrónico y de control.

**Tabla 29**

*Chasis y ruedas disponibles comercialmente para robot seguidor de línea categoría velocista*





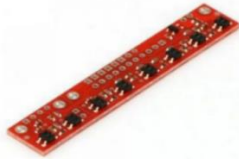

	<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
	Chasis de 4 ruedas	Acrílico transparente de 4mm 4 ruedas
	Chasis de 2 ruedas y rueda de apoyo	Acrílico de 5mm 2 ruedas Apoyo mecánico
	Chasis de 3 ruedas	Acrílico de 3mm color café 2 ruedas y 1 rueda de giro libre

- **MICROCONTROLADOR Y SENSORES**

Con base en el estado del arte y a información obtenida por parte de participantes en competencias de robótica se analizarán algunos microcontroladores y sensores adecuados para un prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista.

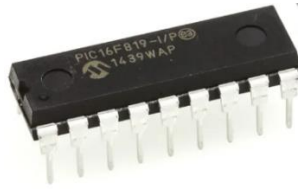
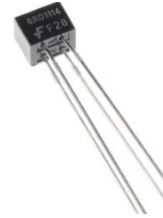
**Tabla 30**

*Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente para robot seguidor de línea categoría velocista*

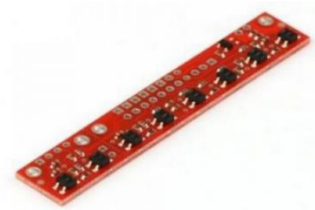
Microcontrolador	Sensor
	Sensor infrarrojo QRD1114 
<b>ARDUINO NANO</b> 	Sensor infrarrojo IR FC-51 
	Sensor infrarrojo IR TCRT5000 
	Sensor de reflectancia analógico (QTR-8A) 
	Sensor de reflectancia digital (QTR-8RC) 



---

**PIC 16F819****Sensor infrarrojo QRD1114**

---

**Sensor de reflectancia analógico (QTR-8A)****ATMEGA324PA**

---

**Sensor de reflectancia digital (QTR-8RC)**

---

**Matriz para seguidor de línea SparkFun**

## Selección del concepto

- **Ponderación de conceptos**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

**Tabla 31**

*Ponderación de hardware disponible para robot seguidor de línea categoría velocista*

Criterios de selección	Chasis y Peso ruedas	Chasis de 4 ruedas		Chasis de 3 ruedas		Chasis de 2 ruedas	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Velocidad</b>	20%	3	0.6	3	0.6	4	0.8
<b>Forma aerodinámica</b>	15%	3	0.45	3	0.45	5	0.75
<b>Peso</b>	20%	2	0.4	1	0.2	5	1
<b>Estética</b>	5%	2	0.1	3	0.15	5	0.25
<b>Facilidad de ensamble y desensamble</b>	5%	3	0.15	3	0.15	4	0.2
<b>Equilibrio</b>	5%	4	0.2	3	0.15	4	0.2
<b>Resistente a caídas</b>	5%	4	0.2	3	0.15	4	0.2
<b>Costo</b>	15%	2	0.3	3	0.45	3	0.45
<b>Resistente a movimiento</b>	10%	4	0.4	4	0.4	5	0.5
<b>TOTAL</b>	100%	2.8		2.7		<b>4.35</b>	

Tabla 32

*Ponderación de microcontroladores disponibles para robot seguidor de línea categoría velocista*

Microcontrolador	Peso	ARDUINO NANO		PIC 16F819		ATMEGA324PA	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Costo</b>	15%	4	0,6	5	0,75	4	0,6
<b>Peso</b>	5%	4	0,2	5	0,25	5	0,25
<b>Estética</b>	5%	4	0,2	5	0,25	4	0,2
<b>Facilidad de instalación</b>	15%	5	0,75	4	0,6	4	0,6
<b>Costo por programación</b>	10%	5	0,5	3	0,3	3	0,3
<b>Velocidad de procesamiento</b>	20%	5	1	4	0,8	5	1
<b>Facilidad de programación</b>	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4
<b>Memoria suficiente</b>	10%	5	0,5	3	0,3	5	0,5
<b>Consumo</b>	10%	4	0,4	3	0,3	2	0,2
<b>TOTAL</b>	100%	<b>4,55</b>		<b>3,95</b>		<b>4,05</b>	

Tabla 33

*Ponderación de sensores disponibles para para robot seguidor de línea categoría velocista*

Criterios de selección	Peso	Sensor infrarrojo QRD1114		Sensor infrarrojo IR FC-51		Sensor infrarrojo IR TCRT5000		Sensor analógico QTR-8A		Sensor digital QTR-8RC	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Costo</b>	5%	5	0,25	4	0,2	4	0,2	3	0,15	2	0,1
<b>Área</b>	5%	3	0,15	3	0,15	5	0,25	5	0,25	5	0,25
<b>Peso</b>	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6	5	0,75	5	0,75
<b>Estética</b>	5%	3	0,15	4	0,2	5	0,25	5	0,25	5	0,25
<b>Facilidad de instalación</b>	10%	3	0,3	4	0,4	4	0,4	4	0,4	4	0,4
<b>Facilidad de circuito de acondicionamiento</b>	5%	3	0,15	4	0,2	3	0,15	5	0,25	5	0,25
<b>Precisión</b>	10%	3	0,3	4	0,4	5	0,5	5	0,5	5	0,5
<b>Consumo</b>	5%	4	0,2	4	0,2	3	0,15	4	0,2	4	0,2
<b>Fiabilidad</b>	15%	3	0,45	4	0,6	4	0,6	5	0,75	5	0,75
<b>Sensibilidad</b>	10%	3	0,3	4	0,4	4	0,4	5	0,5	5	0,5
<b>Facilidad de manejo de datos de salida</b>	5%	3	0,15	4	0,2	4	0,2	5	0,25	4	0,2
<b>SUMA TOTAL</b>	100%	3,3		3,95		4,1		4,75		4,65	

En la Tabla 31 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, la mejor opción para un prototipo de seguidor de línea categoría velocista es un chasis de 2 ruedas con un apoyo, posee las siguientes características:

- Velocidad
- Poco peso
- Costo accesible
- Es sencillo para armar y desarmar
- Resistente a movimiento y caídas

En la Tabla 33 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, hay dos opciones de sensores: sensor analógico QTR-8A o un sensor digital

- QTR-8RC ya que poseen las mejores características:
- Facilidad de instalación
- Precisión
- Sensibilidad
- Resolución

- **Combinación de conceptos**

**Tabla 34**

*Combinación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis tipo raptor 2 ruedas y apoyo extra</b>	Sensor analógico QTR-8A
	Sensor digital QTR-8RC

A través de la Tabla 34 y las diferentes soluciones presentadas para el prototipo se puede combinar dichas soluciones y crear dos conceptos que serán representados para su análisis y posteriormente seleccionar el mejor concepto para el desarrollo.

- **Concepto uno**

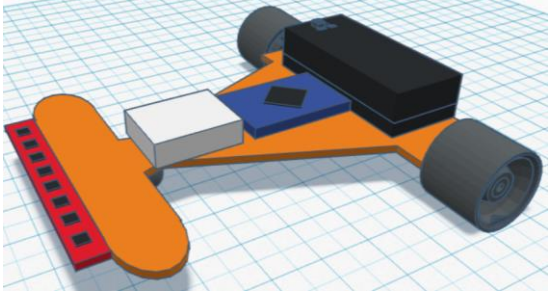
**Tabla 35**

*Características concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis tipo raptor con 2 ruedas y apoyo extra</b>	Sensor analógico QTR-8A

**Tabla 36**

*Desarrollo concepto uno para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>CONCEPTO UNO</b>	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo contará con un arreglo de 8 sensores con salida analógica para detectar la línea, su movimiento se realizará con 2 motores DC. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	

- **Concepto dos**

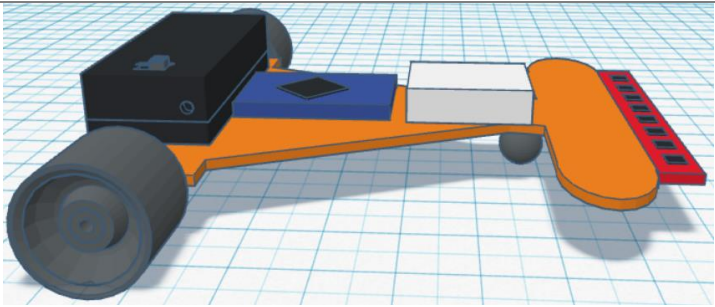
**Tabla 37**

*Características concepto dos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis tipo raptor 2 ruedas y apoyo extra</b>	Sensor digital QTR-8RC

**Tabla 38**

*Desarrollo concepto dos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

<b>CONCEPTO DOS</b>	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo contará con un arreglo de 8 sensores con salida digital para detectar la línea, su movimiento se realizará con 2 motores DC. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	

- **Evaluación del concepto**

Los parámetros o criterios que se toman en cuenta en la selección de conceptos fueron velocidad, peso, estética, facilidad de ensamble y desensamble, equilibrio y por último la resistencia a movimientos y caídas.

Dichos parámetros se incluyeron en la tabla comparativa, asignándole un valor entre 0 (mal desempeño) y 5 (buen desempeño) de acuerdo al peso de cada criterio. Por último, fueron sumados estos valores para obtener un total se aceptarán valores mayores a 4.2 para ser considerados para su implementación

Tabla 39

*Evaluación de conceptos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

Criterios de selección	Sensores		Concepto 1		Concepto 2	
	Peso	Calificación	Valor parcial	Calificación	Valor parcial	
<b>Velocidad</b>	10%	4	0.4	4	0.4	
<b>Costo</b>	5%	4	0.2	5	0.25	
<b>Peso</b>	5%	4	0.2	4	0.2	
<b>Estética</b>	5%	5	0.25	5	0.25	
<b>Facilidad de programación</b>	10%	5	0.5	4	0.4	
<b>Equilibrio</b>	10%	5	0.5	4	0.4	
<b>Diseño aerodinámico</b>	5%	4	0.2	4	0.2	
<b>Precisión</b>	15%	5	0.75	5	0.75	
<b>Consumo</b>	10%	4	0.4	4	0.4	
<b>Fiabilidad</b>	15%	4	0.6	4	0.6	
<b>Cercanía de sensores a la pista</b>	10%	5	0.5	5	0.5	
<b>SUMA TOTAL</b>	100%		4.5		4.35	

De acuerdo a la Tabla 39 el concepto número uno alcanzó la calificación más alta, a pesar de que las dos opciones de sensores son recomendadas para este tipo de prototipo debido al criterio costo se utilizarán el arreglo de 8 sensores analógicos QTR-8A.



Se puede entonces concluir que el concepto número uno es el más viable a desarrollar debido a que cumple con las necesidades de un robot seguidor de línea categoría destreza.

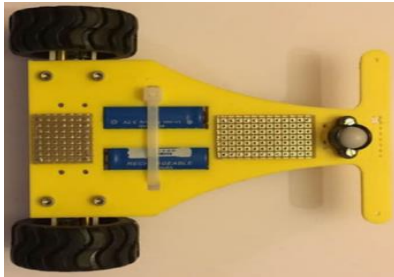
- **Especificaciones finales**

---

**Características**

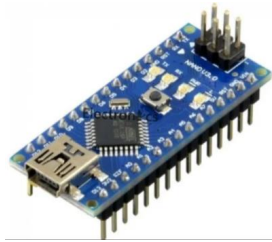
---

**CHASIS**



- Acrílico color amarillo
- Grosor 5mm
- 2 Ruedas y apoyo extra

**CONTROLADOR ARDUINO NANO**



- Microcontrolador principal  
Arduino ATmega328
- 8 pines analógicos de entrada / salida.
- 6 salidas PWM
- Conector de alimentación (7-12VCD)
- Circuito de RESET más resistente. Microcontrolador principal:  
Atmega328P DIP28 desmontable

**SENSOR DE REFLECTANCIA  
ANALÓGICO QTR-8A**

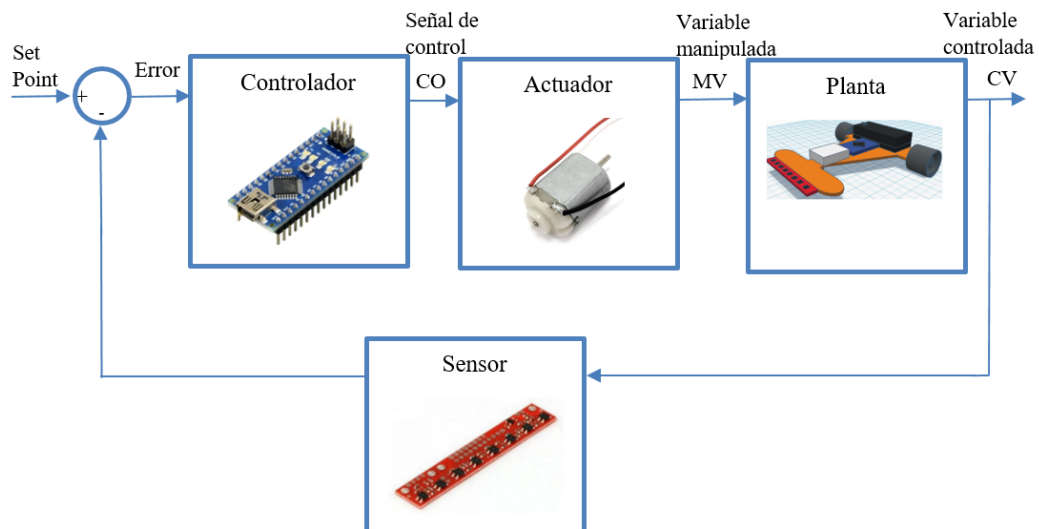


- Voltaje de funcionamiento: 3.3V-5,0 V
  - Consumo de corriente: 100 mA
  - Formato de salida: Voltaje análogo
  - Distancia óptima de detección: 3 mm
-

## Ingeniería básica del robot seguidor de línea categoría velocista

### Esquema del prototipo

Para el prototipo de un robot seguidor de línea se debe realizar un diagrama con sus elementos constitutivos.

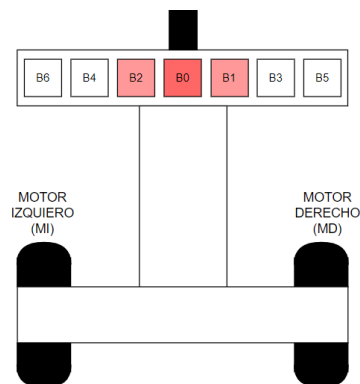


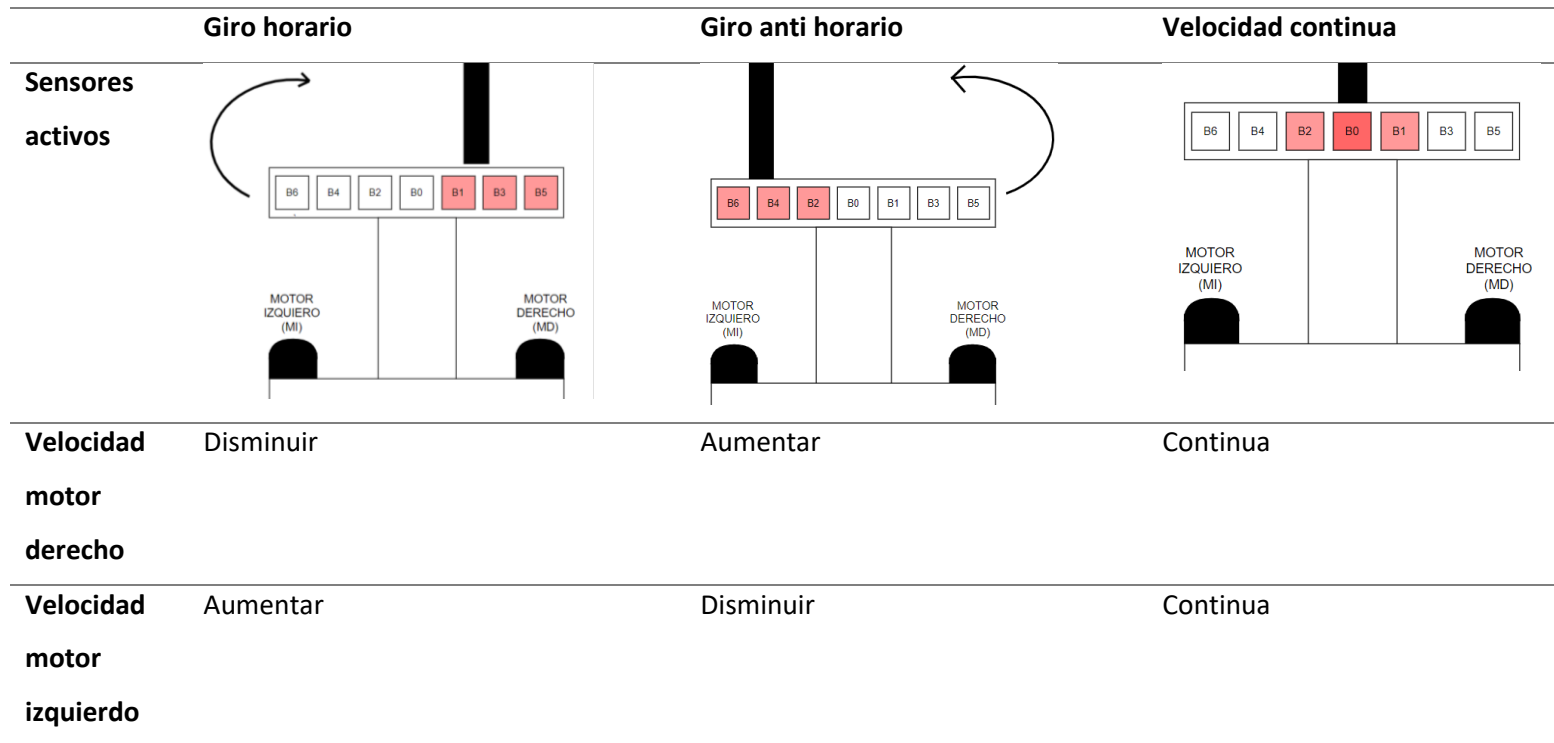
### Características de funcionamiento

El movimiento de un prototipo de seguidor de línea normalmente es de un lado a otro para que los sensores lean la ruta o línea sobre el fondo.

**Figura 24**

*Ubicación de los sensores y motores robot seguidor de líneas*





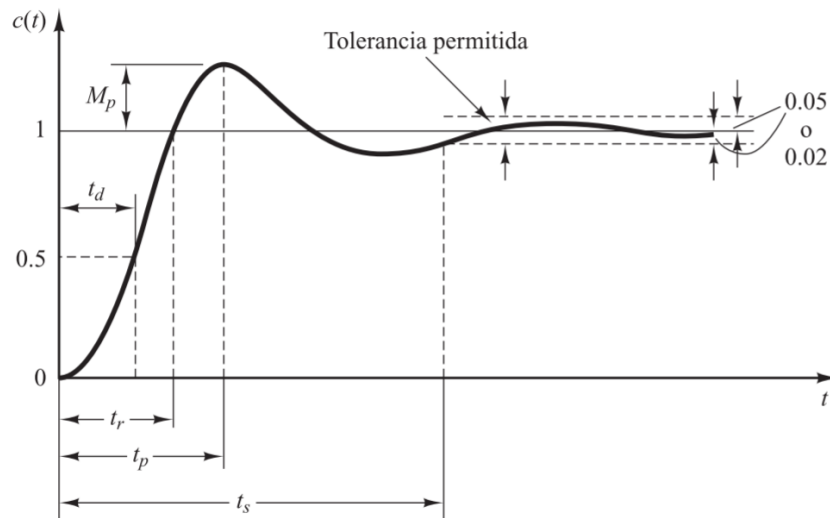
## Sistema de control

El diseño final del robot seguidor de línea categoría velocista utiliza dos ruedas paralelas entre sí es decir con una configuración de tracción diferencial que le permitirá cruzar curvas.

Un robot seguidor de línea es un sistema de respuesta rápida que requiere de gran estabilidad para evitar perder su línea de referencia; es necesario controlar las velocidades de los motores (derecho e izquierdo independientes) utilizando algoritmos de control.

**Figura 25**

*Curva de respuesta a escalón unitario (Ogata, 2003)*



### OBJETIVO DE CONTROL:

Parámetros	Valor
$t_s$	$50ms \leq t_s \leq 80ms$
$M_p$	$5\% \leq M_p \leq 8\%$
$e_{ss}$	2%

Al ser un robot para competencias lo que deseamos es que la respuesta del robot seguidor de línea sea rápida además se requiere gran estabilidad (Tapeiro Santa, 2019).

Para conocer el comportamiento del robot y aplicar un adecuado algoritmo de control se determinará la función de transferencia del motor con los datos del motor.

$$G(s) = \frac{k_t * r_2}{(Ls + R) * (J_{eq}s + b_{eq}) + k_t k_v r_2} \quad (18) \text{ (Tapeiro Santa, 2019)}$$

Donde:

$k_t$  constante del motor.

$k_v$  constante de velocidad del motor.

$r_2$  máxima eficiencia

$L$  inductancia del motor.

$b_{eq} (\tau * J)$  resistencia equivalente en primario (rozamiento primario\*inercia rotor)

$R$  resistencia bobinado.

$J_{eq}$  Inercia equivalente en primario

De acuerdo a las especificaciones técnicas del motor 26N58 216 P.1 (Posrtescap):

Parámetros	Valor
$v$	4600 RPM
$k_t$	0,01230 Nm/A
$k_v$	0,01230 V/rad/ seg
$r_2$	0,79
$L$	$22 \times 10^{-5}$ H
$b_{eq}$	$9,9 \times 10^{-7}$
$R$	2,5 $\Omega$
$J_{eq}$	$1,79 \times 10^{-7}$

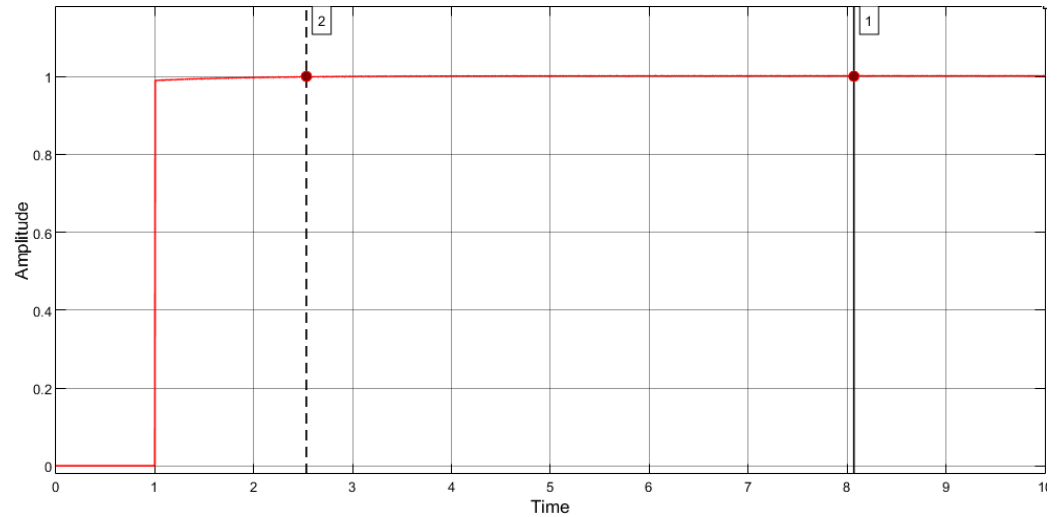
Con los parámetros la función de transferencia del motor DC queda de la siguiente

manera:

$$G(s) = \frac{0,009717}{3,93 \times 10^{-10} s^2 + 4,47 \times 10^{-6} s + 12,19 \times 10^{-5}} \quad (19)$$

**Figura 26**

Curva de respuesta a escalón unitario

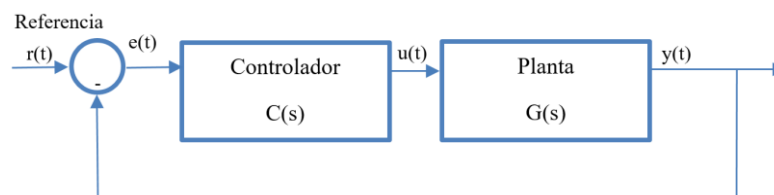


De la

Figura 26 obtenemos algunos datos que serán comparados con las señales de salida con

algoritmos de control.

Parámetros	Respuesta a escalón unitario
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06
Sobreimpulso $M_p$ %	0%



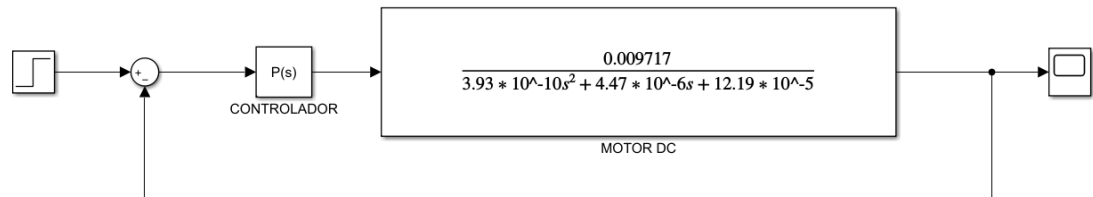
Con la ecuación (19) se desarrollará algoritmos de control y analizar sus respuestas

- **Algoritmo de control proporcional (P)**

Con este algoritmo se realiza un control suave (variaciones pequeñas). Existe una relación proporcional entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ .

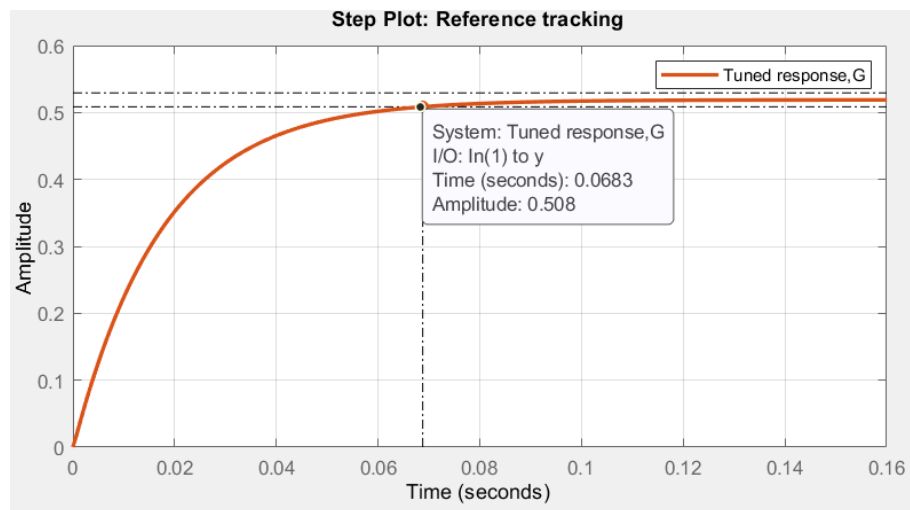
$$u(t) = K_p * e(t) \quad (20)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (21)$$



**Figura 27**

*Respuesta del sistema con un control P*



Obteniendo la ecuación para un controlador P

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,0135 \quad (22)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53	0,038	98%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06	0,068	99%
Sobreimpulso $M_p$ %	0%	0	-

Se observa que se cumple con la restricción del tiempo de establecimiento, pero no tenemos sobreimpulso por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control integral (I)**

Con un algoritmo integral lo que hacemos es acumular errores del pasado utilizando la ecuación guardándolo en la memoria mientras transcurre el tiempo y cada vez que se realiza una integral la respuesta se acerca más a la referencia.

$$u(t) = K_i * \int_0^t e(t) dt \quad (23)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (24)$$

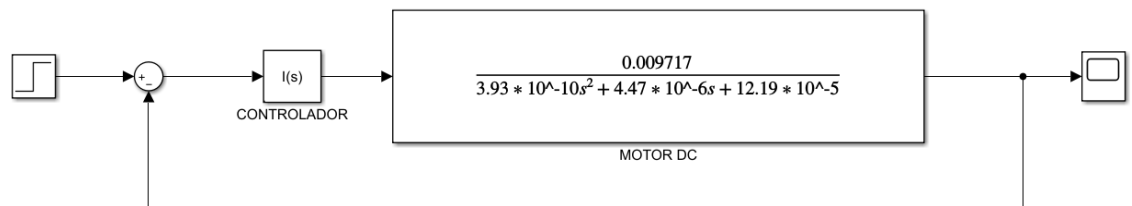
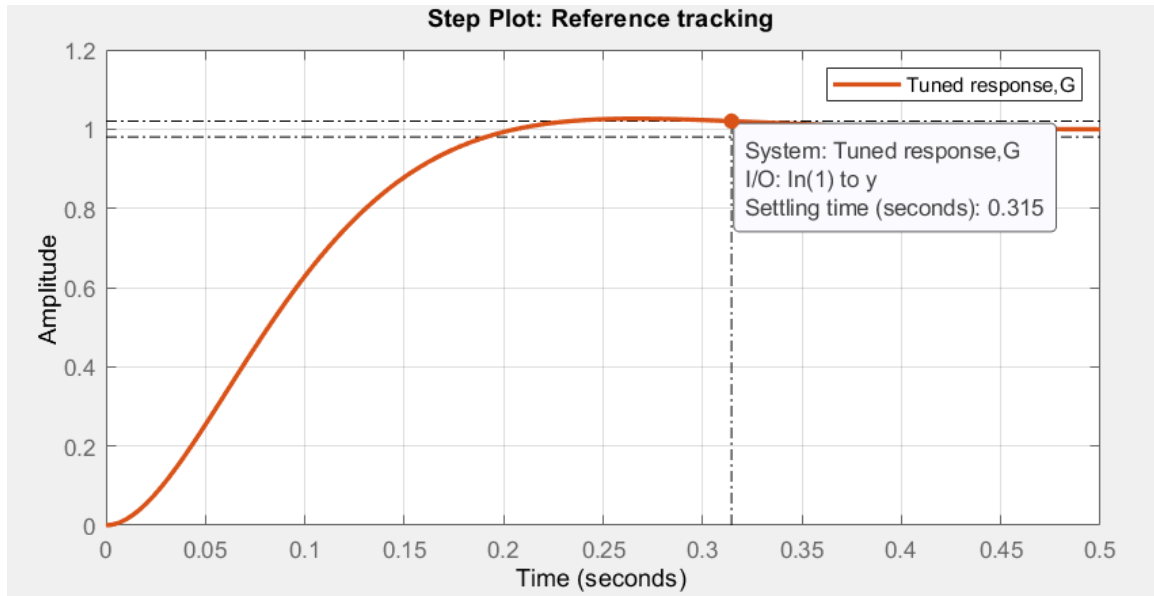




Figura 28

Respuesta del sistema con un control I



Obteniendo la ecuación para un controlador I

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{0,1493}{s} \quad (25)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53	0,128	95%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06	0,315	96%
Sobreimpulso $M_p$ %	0	2,63	-

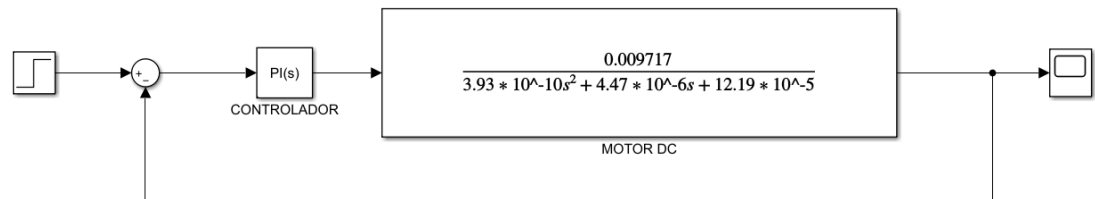
Se observa que se cumple con la restricción del tiempo de establecimiento, pero tenemos un sobreimpulso muy corto por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional integral (PI)**

Es una combinación de algoritmos para ajustar el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento.

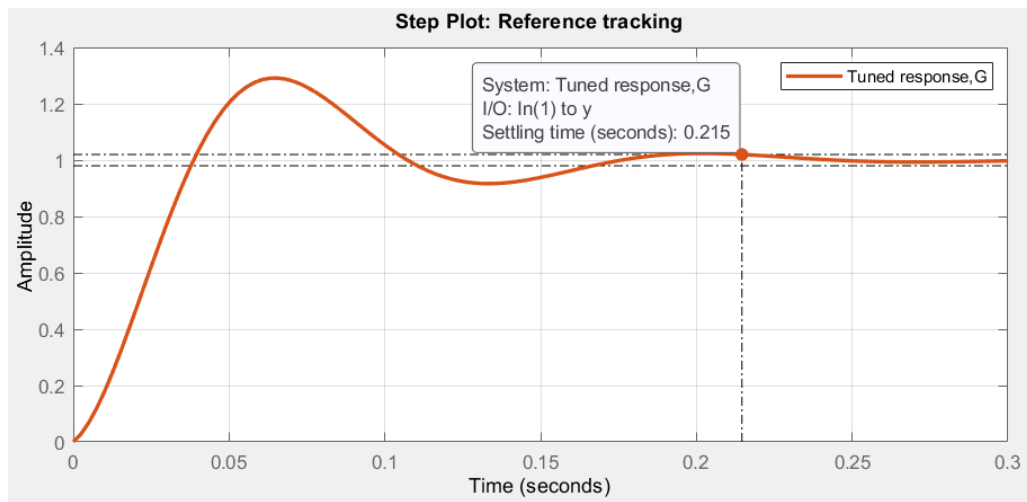
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) d(t) \quad (26)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (27)$$



**Figura 29**

*Respuesta del sistema con un control PI*



Obteniendo la ecuación para un controlador PI

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,00427 \left( 1 + \frac{1}{0,0038s} \right) \quad (28)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53	0,0281	99%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06	0,0215	100%
Sobreimpulso $M_p$ %	0%	29,1	-

Se observa que el tiempo de establecimiento mejora considerablemente, pero tenemos un sobreimpulso muy alto por esto no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional derivativo (PD)**

Es una combinación de algoritmos para intentar disminuir el sobreimpulso y mejorar su estabilidad.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_p T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (29)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (30)$$

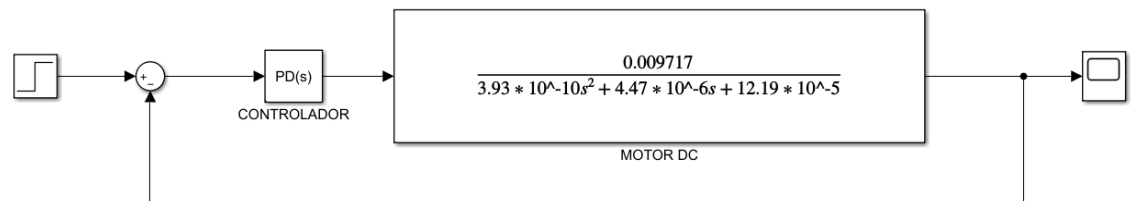
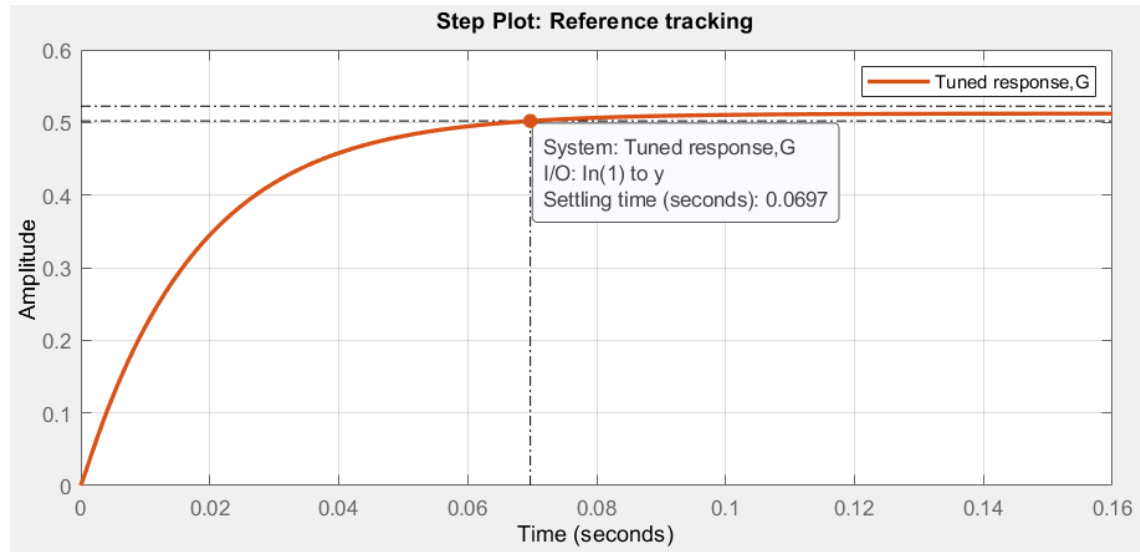


Figura 30

Respuesta del sistema con un control PD



Obteniendo la ecuación para un controlador PD

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,01317 \quad (31)$$

El parámetro de  $T_d = 0$  para obtener esta respuesta

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53	0,039	98%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06	0,068	99%
Sobreimpulso $M_p$ %	0%	0	-

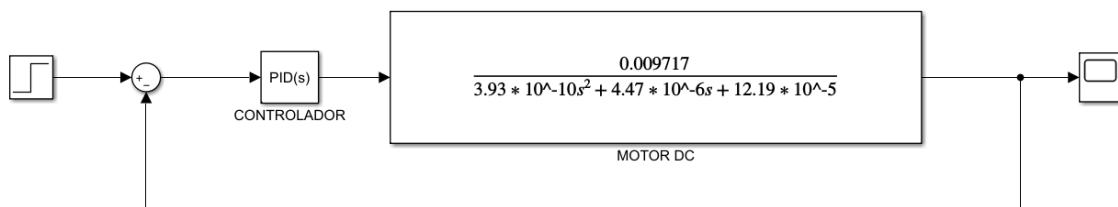
Se observa que el tiempo de establecimiento ha mejorado considerablemente, no tenemos sobreimpulso y tenemos un error en estado estacionario muy alto (casi del 50%) por lo que no es una solución viable.

- **Algoritmo de control proporcional integral derivativo (PID)**

El algoritmo principal de este controlador se compone de control proporcional (depende del error actual), control integral (se enfoca en los errores pasados) y el control derivativo (permite predecir errores a futuro).

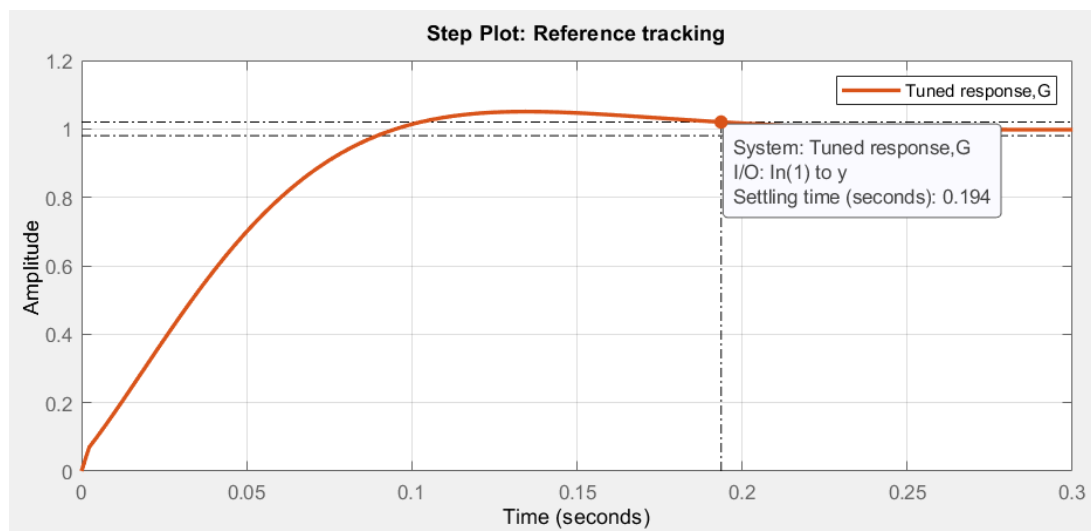
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt + K_p T_d * \frac{d e(t)}{dt} \quad (32)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (33)$$



**Figura 31**

Respuesta del sistema con un control PID



Obteniendo la ecuación para un controlador PID

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 0,0065 \left( 1 + \frac{1}{0,0017s} + 1,3155 \times 10^{-7} s \right) \quad (34)$$

Parámetros	Sistema real	Sistema controlado	Porcentaje de mejora
Tiempo de subida $T_r$ seg	2,53	0,069	97%
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	8,06	0,194	98%
Sobreimpulso $M_p$ %	0%	5,05%	-

En la Figura 31, al utilizar un algoritmo proporcional integral derivativo se observa que no hay un error en estado estacionario ya que la señal de respuesta se estabiliza en el valor deseado, el tiempo de establecimiento es corto; además tenemos un sobreimpulso del 5% lo que provocará pequeñas oscilaciones en el robot que son necesarias para la lectura constante de la línea, por lo tanto es el algoritmo más recomendable.

*Con un control proporcional o proporcional derivativo tenemos un sobreimpulso de 0 que puede limitar el movimiento del robot y no sensar la línea de manera constante por lo que no son algoritmos adecuados para este tipo de categoría.*

**Tabla 40**

*Comparación de parámetros de controladores con valores marginales e ideales*

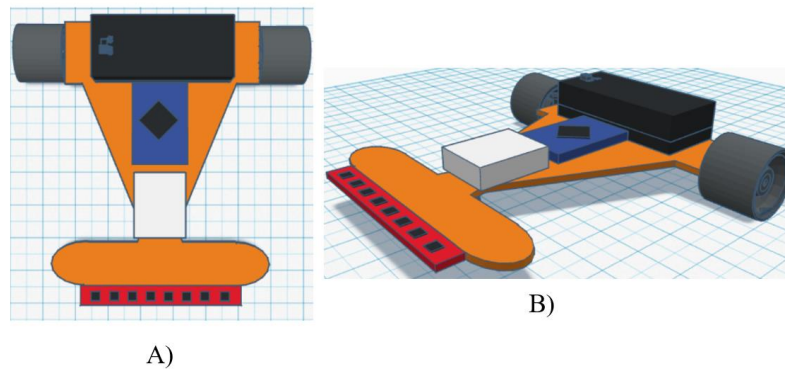
Parámetros	Control integral	Control proporcional integral	Control proporcional integral derivativo	Valor marginal	Valor ideal
Tiempo de subida $T_r$ seg	0,128	0,0281	0,069	0,10	0,05
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	0,315	0,0215	0,194	0,08	0,05
Sobreimpulso $M_p$ %	2,63	29,1	5,05%	8%	5%

De acuerdo a los parámetros en la Tabla 40 el algoritmo que cumple mejor con los objetivos de control es un **control proporcional integral derivativo** ya que posee un corto tiempo de establecimiento y un sobreimpulso bajo para el robot seguidor de línea categoría velocista.

### Disposición geométrica aproximada

**Figura 32**

*Prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista A) Vista superior B) Vista isométrica*



### Lista de materiales

**Tabla 41**

*Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

ELEMENTO	CANTIDAD
Modulo TB6612FNG Puente H	1
Pulsador	2
Resistencias	3
Led	1
Arreglo de sensores analógicos	1
Ruedas	2
Batería 5V	1
Controlador Arduino NANO	1
Mini regleta	1
Motores DC	2

## Presupuesto tentativo

**Tabla 42**

*Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor de línea categoría velocista*

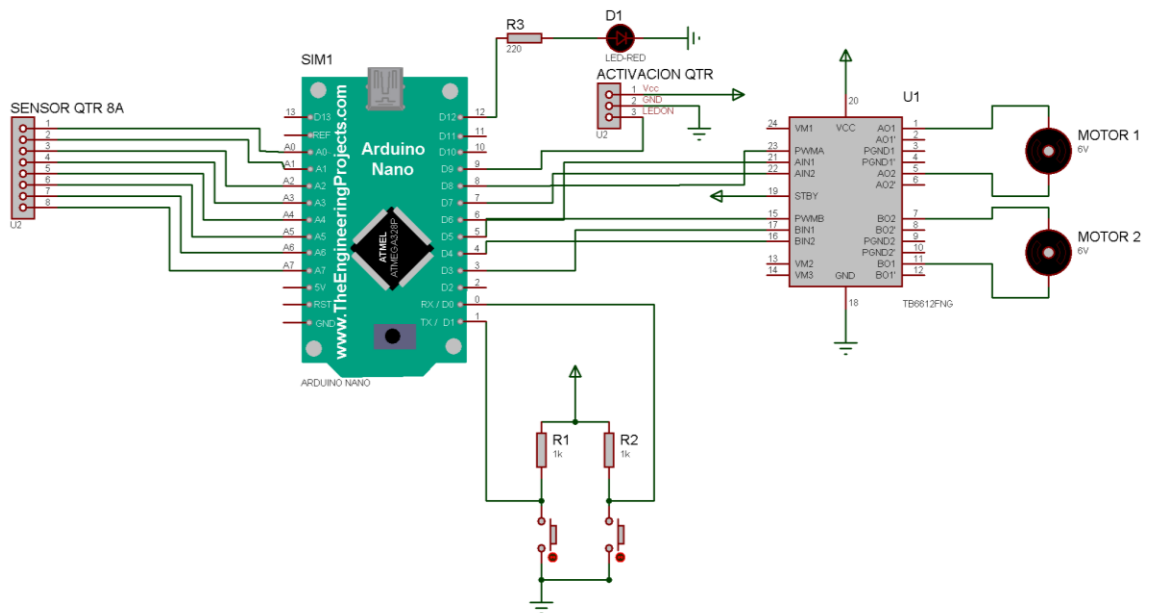
<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
<b>1</b>	Módulo TB6612FNG Puente H	5	5
<b>2</b>	Pulsador	0,1	0,2
<b>3</b>	Resistencias	0,1	0,3
<b>1</b>	Led	0,1	0,1
<b>1</b>	Arreglo de sensores	14	14
<b>1</b>	Chasis seguidor de línea (incluye motores y ruedas)	12	12
<b>1</b>	Batería 5V	6	6
<b>1</b>	Controlador Arduino NANO	12	12
<b>1</b>	Mini regleta	3	3
<b>1</b>	Metro de cable	1	1
<b>Total</b>			US \$53,6

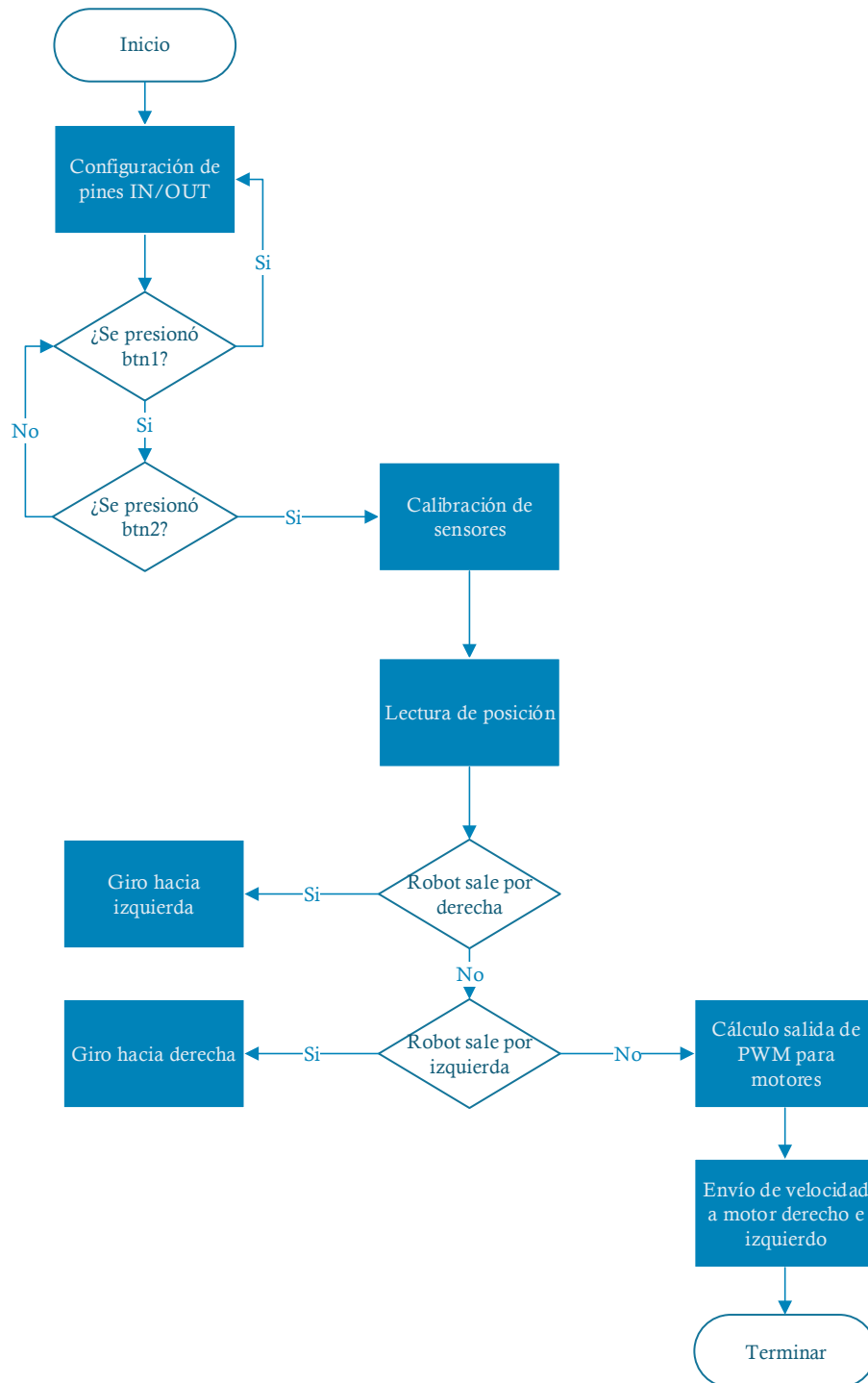


## Ingeniería a detalle del robot seguidor de línea categoría velocista

### Planos eléctricos

El diseño se realizó en software dedicado que es utilizado para elaborar diseños de circuitos electrónicos que permite ver una emulación virtual sobre su funcionamiento determinando así posibles problemas al realizar el diseño en una baquelita de fibra de vidrio.



**Diagrama de flujo**

**Pseudocódigo**

PROGRAMA VELOCISTA

MIENTRAS calibración

Led=1

FINMIENTRAS

Si botón1= 1 &amp; botón2=1 entonces

Leer posición

Proporcional =posición - 3500

Si proporcional &lt; -3500

Giro a la derecha

Si proporcional &gt; 3500

Giro a la izquierda

Sino cálculo de integral, derivativo

 $salida\_pwm = (proporcional * KP) + (derivativo * KD) + (integral * Ki)$  $pwmd = veloc - salida\_pwm$  $pwmi = veloc + salida\_pwm$ 

FinSi

Sino

Led=1

Pausa 1 seg

Led=0

FinSi

FINPROGRAMA

## Ingeniería del robot resuelve laberintos

Para comenzar con la ingeniería del robot resuelve laberintos es necesario establecer las restricciones y objetivos generales para el prototipo.

**Tabla 43**

*Declaración de la misión de robot seguidor de línea categoría velocidad*

<b>Declaración de la misión: prototipo de robot resuelve laberintos</b>	
<b>Descripción del producto</b>	Robot que puede desplazarse de manera autónoma en un laberinto y en el menor tiempo posible logra salir o encontrar el fin.
<b>Propuesta de valor</b>	Prototipo sencillo de implementar Diseño apto para competencias nacionales e internacionales
<b>Objetivos clave de negocio</b>	Brindar una guía técnica a personas con diferentes niveles de conocimiento en robótica para el desarrollo de prototipos Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de un robot resuelve laberintos
<b>Mercado primario</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
<b>Mercados secundarios</b>	Universidad que cuenten con un club de robótica propio Escuelas y colegios
<b>Suposiciones y restricciones</b>	Fallos mecánicos en pistas con poca fricción Desconexión de elementos eléctricos y/o electrónicos por movimientos bruscos Problemas con tiempo de respuesta de sensores y/o microcontrolador. Presupuesto limitado para la compra de los materiales
<b>Involucrados</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Docentes y estudiantes de escuelas y colegios

## Ingeniería de concepto del robot resuelve laberintos

### Identificar las necesidades del cliente

En la categoría resuelve laberintos es importante tomar en cuenta la velocidad y la capacidad de resolver el laberinto, se analizó el reglamento del último Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER 2019) obteniendo características técnicas y físicas que debe tener el prototipo. Además, se realizó una consulta a estudiantes que participaron en anteriores competencias.

**Tabla 44**

*Necesidades en un prototipo de robot resuelve laberintos*

<b>Número</b>	<b>Necesidad</b>
<b>1</b>	Robot totalmente autónomo
<b>2</b>	La alimentación debe ser con baterías de cualquier tipo de corriente continua
<b>3</b>	Dimensiones máximas de 15cm x 15cm x 15cm
<b>4</b>	El robot no puede dejar marcas en el laberinto
<b>5</b>	Las ruedas del robot no se deben deslizar en la pista
<b>6</b>	La batería del robot debe durar lo suficiente para la competencia
<b>7</b>	El robot debe ser resistente a golpes
<b>8</b>	Bajo costo
<b>9</b>	Capacidad de ser veloz en secciones continuas
<b>10</b>	Los elementos electrónicos del robot deben estar fijos con el movimiento

## Establecer especificaciones objetivo

- **Métricas**

**Tabla 45**

*Métrica para especificaciones del robot resuelve laberintos*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
<b>1</b>	1,10	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh
<b>3</b>	3	Dimensiones máximas	3	cm
<b>4</b>	4,5	Adherencia a la pista	4	MPa
<b>5</b>	5,9	Velocidad de desplazamiento	5	m/s
<b>6</b>	7	Resistencia al impacto	2	Pa
<b>7</b>	8	Costo del prototipo	3	US\$

- **Recabar información de comparaciones con la competencia**

**Tabla 46**

*Métricas de robots comerciales del robot resuelve laberintos*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resuelve laberintos con Arduino</b>	<b>SilverLit Robot</b>
<b>1</b>	1,10	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo	4	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	1500	800
<b>3</b>	3	Dimensiones máximas	3	cm	14x14x18	9x11x6
<b>4</b>	4,5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1
<b>5</b>	5,9	Velocidad de desplazamiento	5	m/s	0,3	0,6
<b>6</b>	7	Resistencia al impacto	2	Pa	0,05	0,12
<b>7</b>	8	Costo del prototipo	3	US\$	300	100

- **Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables**

Luego de conocer algunos de los robots resuelve laberintos comerciales se establecen valores aceptables para nuestro prototipo.

Tabla 47

Valores establecidos de métricas del robot resuelve laberintos

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
<b>1</b>	1,10	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo	4	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	800	1500
<b>3</b>	3	Dimensiones máximas	3	cm	15x15x15	9x11x6
<b>4</b>	4,5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1
<b>5</b>	5,9	Velocidad de desplazamiento	5	m/s	0,5	1,5
<b>6</b>	7	Resistencia al impacto	2	Pa	0,05	0,12

### Generación de conceptos

Se analizó conceptos disponibles para el sistema mecánico (chasis y ruedas) y para el sistema electrónico (microcontrolador y sensores).



- **CHASIS Y RUEDAS**

**Tabla 48**


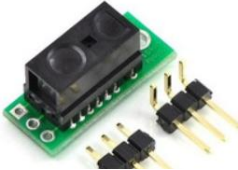



*Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot resuelve laberintos*

	<b>MODELO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
	Chasis de 4 ruedas	Acrílico transparente de 4mm 4 ruedas
	Chasis circular de 3 ruedas	Acrílico de 3mm color café 2 ruedas y 1 rueda de giro libre
	Chasis circular de 2 ruedas	Acrílico de 3mm varios colores 2 ruedas

- MICROCONTROLADOR Y SENSORES**

Tabla 49

*Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente del robot resuelve laberintos*

	ARDUINO UNO	PIC16F877A	ATMEGA324PA
<b>SENSOR ULTRASÓNICO</b> <b>HC-SR04</b> 	✓	✓	✓
<b>SENSOR DE DISTANCIA</b> <b>SHARP DIGITAL</b> <b>GP2Y0D810Z0F</b> 	✓	✓	✓
<b>SENSOR DE DISTANCIA</b> <b>SHARP ANÁLOGO</b> <b>GP2Y0A51SK0F</b> 	✓	✓	✓
<b>SENSOR INFRARROJO CNY70</b> 	✓		
<b>DIODO Y FOTOTRANSITOR</b> 		✓	✓

## Selección del concepto

- **Ponderación de conceptos**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

**Tabla 50**

*Ponderación de hardware disponible para robot resuelve laberintos*

Criterios de selección	Chasis y Peso	Chasis de 4 ruedas		Chasis de 3 ruedas		Chasis de 2 ruedas	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Velocidad</b>	15%	3	0.45	4	0.6	3	0.45
<b>Forma aerodinámica</b>	5%	3	0.15	4	0.2	3	0.15
<b>Peso</b>	10%	2	0.2	4	0.4	5	0.5
<b>Estética</b>	5%	2	0.1	3	0.15	5	0.25
<b>Facilidad de ensamble y desensamble</b>	10%	3	0.3	4	0.4	4	0.4
<b>Equilibrio</b>	20%	5	1	4	0.8	2	0.4
<b>Resistente a caídas</b>	10%	4	0.4	4	0.4	3	0.3
<b>TOTAL</b>	100%	3.4		3.95		3.7	

Tabla 51

*Ponderación de microcontroladores disponibles para robot resuelve laberintos*

Microcontrolador	Peso	ARDUINO UNO		PIC16F877A		ATMEGA324PA	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Costo</b>	15%	3	0.45	5	0.75	4	0.6
<b>Peso</b>	5%	3	0.15	5	0.25	5	0.25
<b>Estética</b>	10%	3	0.3	5	0.5	4	0.4
<b>Facilidad de instalación</b>	10%	5	0.5	4	0.4	4	0.4
<b>Costo por programación</b>	10%	5	0.5	3	0.3	3	0.3
<b>Velocidad de procesamiento</b>	20%	3	0.6	4	0.8	4	0.8
<b>Facilidad de programación</b>	10%	4	0.4	4	0.4	4	0.4
<b>Memoria suficiente</b>	10%	5	0.5	3	0.3	5	0.5
<b>Consumo</b>	10%	4	0.4	3	0.3	2	0.2
<b>TOTAL</b>	100%	3.8		4		3.85	

Tabla 52

*Ponderación de sensores disponibles para prototipo de resuelve laberintos*

Sensores  Criterios de selección	Peso	Sensor ultrasonico HC- SR04		Sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F		Sensor de distancia análogo GP2Y0A51SK0F		Sensor infrarrojo CNY70		Diodo y fototransistor	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
		<b>Costo</b>	5%	5	0.25	2	0.1	3	0.15	4	0.2
<b>Área</b>	5%	3	0.15	4	0.2	4	0.2	5	0.25	5	0.25
<b>Peso</b>	15%	4	0.6	4	0.6	4	0.6	4	0.6	5	0.75
<b>Estética</b>	5%	3	0.15	4	0.2	5	0.25	4	0.2	3	0.15
<b>Facilidad de instalación</b>	10%	4	0.4	5	0.5	5	0.5	3	0.3	3	0.3
<b>Facilidad de circuito de  acondicionamiento</b>	5%	5	0.25	5	0.25	4	0.2	3	0.15	2	0.1
<b>Precisión</b>	10%	3	0.3	4	0.4	5	0.5	4	0.4	4	0.4
<b>Consumo</b>	5%	4	0.2	3	0.15	2	0.1	3	0.15	5	0.25
<b>Fiabilidad</b>	15%	3	0.45	5	0.75	5	0.75	3	0.45	4	0.6
<b>Sensibilidad</b>	15%	4	0.6	5	0.75	5	0.75	4	0.6	3	0.45
<b>Resolución</b>	10%	4	0.4	4	0.4	5	0.5	4	0.4	3	0.3
<b>SUMA TOTAL</b>	100%	3.75		4.3		4.5		3.7		3.8	

En la Tabla 50 de acuerdo a los criterios establecidos y a la comparación realizada, la mejor opción para un prototipo de robot resuelve laberintos es un chasis de 3 ruedas que posee las siguientes características:

- Velocidad
- Poco peso
- Es sencillo para armar y desarmar
- Resistente a movimiento y caídas
- Equilibrio

En la Tabla 51 se analizó los controladores que se pueden utilizar en un prototipo de un robot resuelve laberintos de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada lo más recomendable es utilizar el PIC16F877A; además existen dos opciones de sensores: sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F o sensor de distancia análogo GP2Y0A51SK0F que comparten las siguientes características:

- Precisión
- Sensibilidad
- Uso y programación sencilla

- **Combinación de conceptos**

Al contar con dos posibilidades de sensores es necesario un análisis para su uso de acuerdo a las necesidades del robot.

**Tabla 53**

*Combinación de conceptos para prototipo de robot resuelve laberintos*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis circular 3 ruedas</b>	Sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F
	Sensor de distancia análogo GP2Y0A51SK0F

A través de la Tabla 53 y las diferentes soluciones presentadas para el prototipo se puede combinar dichas soluciones y crear dos conceptos que serán representados para su análisis y posteriormente seleccionar el mejor concepto para el desarrollo.

- **Concepto uno**

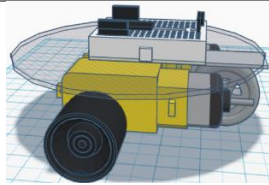
**Tabla 54**

*Características concepto uno para prototipo de robot resuelve laberintos*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis circular 3 ruedas</b>	Sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F

Tabla 55

*Desarrollo concepto uno del robot de robot resuelve laberintos*

<b>CONCEPTO UNO</b>	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo poseerá 3 sensores de distancia digitales ubicados en la parte derecha, izquierda y frontal del robot; que permitirán detectar o no pared para mover los motores. Su movimiento se realizará con 2 motores DC y una rueda de giro libre. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	

○ **Concepto dos**

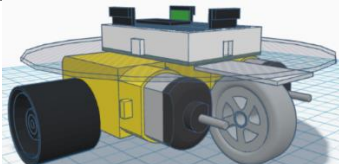
Tabla 56

*Características concepto dos del de robot resuelve laberintos*

<b>CHASIS Y RUEDAS</b>	<b>SENSOR</b>
<b>Chasis circular 3 ruedas</b>	Sensor de distancia análogo GP2Y0A51SK0F

Tabla 57

*Desarrollo concepto dos del robot resuelve laberintos*

<b>CONCEPTO DOS</b>	
<b>Descripción del concepto</b>	El prototipo poseerá 3 sensores de distancia analógicos ubicados en la parte derecha, izquierda y frontal del robot; que permitirán conocer la distancia en cm entre el prototipo y pared. Su movimiento se realizará con 2 motores DC y una rueda de giro libre. El controlador irá en la parte superior con el resto de elementos electrónicos.
<b>Bosquejo</b>	



- **Evaluación del concepto**

Los parámetros o criterios que se toman en cuenta en la selección de conceptos fueron peso, estética, facilidad de ensamble y desensamble, equilibrio y por último la resistencia a movimientos y caídas.

Dichos parámetros se incluyeron en la tabla comparativa, asignándole un valor entre 0 (mal desempeño) y 5 (buen desempeño) de acuerdo al peso de cada criterio. Por último, fueron sumados estos valores para obtener un total se aceptarán valores mayores a 4.2 para ser considerados para su implementación.

**Tabla 58**

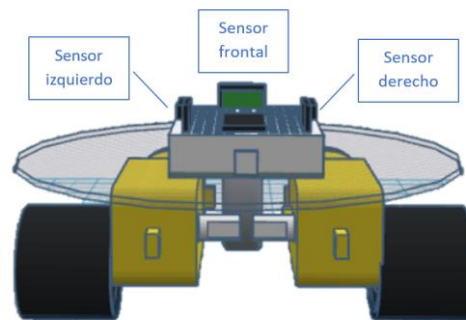
*Evaluación de conceptos del robot resuelve laberintos*

<b>Criterios de selección</b>	<b>Sensores</b>	<b>Peso</b>	<b>Concepto 1</b>		<b>Concepto 2</b>	
			Calificación	Valor parcial	Calificación	Valor parcial
<b>Costo</b>		10%	4	0.4	5	0.5
<b>Peso</b>		5%	4	0.2	4	0.2
<b>Estética</b>		5%	5	0.25	5	0.25
<b>Facilidad de instalación</b>		10%	5	0.5	4	0.4
<b>Facilidad de programación</b>		15%	5	0.75	4	0.6
<b>Equilibrio</b>		5%	4	0.2	4	0.2
<b>Precisión</b>		15%	5	0.75	5	0.75
<b>Consumo</b>		10%	4	0.4	4	0.4
<b>Fiabilidad</b>		15%	4	0.6	4	0.6
<b>Resistencia a movimientos</b>		10%	5	0.5	5	0.5
<b>SUMA TOTAL</b>		100%	<b>4.55</b>		<b>4.4</b>	

De acuerdo a la Tabla 58 el concepto número uno alcanzó la calificación más alta, a pesar de esto es necesario realizar un análisis del funcionamiento del robot y elegir la mejor alternativa para los tres sensores que serán necesarios para su funcionamiento.

**Figura 33**

*Ubicación de sensores en robot resuelve laberintos*



En la Figura 33 se puede ver la ubicación de los sensores; un dato importante para la toma de decisiones (algoritmo de control) es conocer la distancia entre el robot (lado frontal) y el laberinto ya que permitirá saber si el robot se acerca a un callejón sin salida o se encuentra en la ruta adecuada, por otro lado los sensores laterales (derecho e izquierdo) pueden proporcionar información de si existe o no pared sin conocer con exactitud la distancia en centímetros para realizar los giros necesarios.

Se puede concluir que una combinación de conceptos es lo más adecuado, es decir que para el sensado frontal se realizará con el sensor de distancia análogo GP2Y0A51SK0F del concepto uno y para el sensado lateral (derecho e izquierdo) con dos sensores de distancia digitales GP2Y0D810Z0F para cumplir con las necesidades de un robot resuelve laberintos.

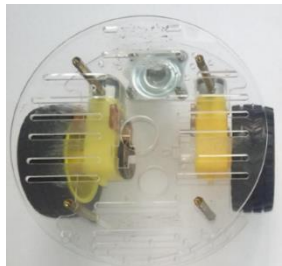
- **Especificaciones finales**

---

### Características

---

#### CHASIS



- Acrílico color transparente
  - Grosor 5mm
  - 3 ruedas
- 

#### CONTROLADOR PIC 16F877A



- 2 canales PWM.
  - Entradas y salidas 33
  - Frecuencia máxima 20 MHz
  - Conector de alimentación 2-5.5 VCD
- 

#### SENSOR FRONTAL DE

#### DISTANCIA ANÁLOGO



- Voltaje de funcionamiento: 2.5V – 5.5V
  - Rango de detección: 2 cm – 15 cm
  - Consumo medio de corriente: 12mA
  - Tipo de salida: voltaje analógico
  - Periodo de actualización:  $16.5 \pm 4$  ms.
- 

#### SENSORES LATERALES

#### SENSOR DE DISTANCIA

#### DIGITAL

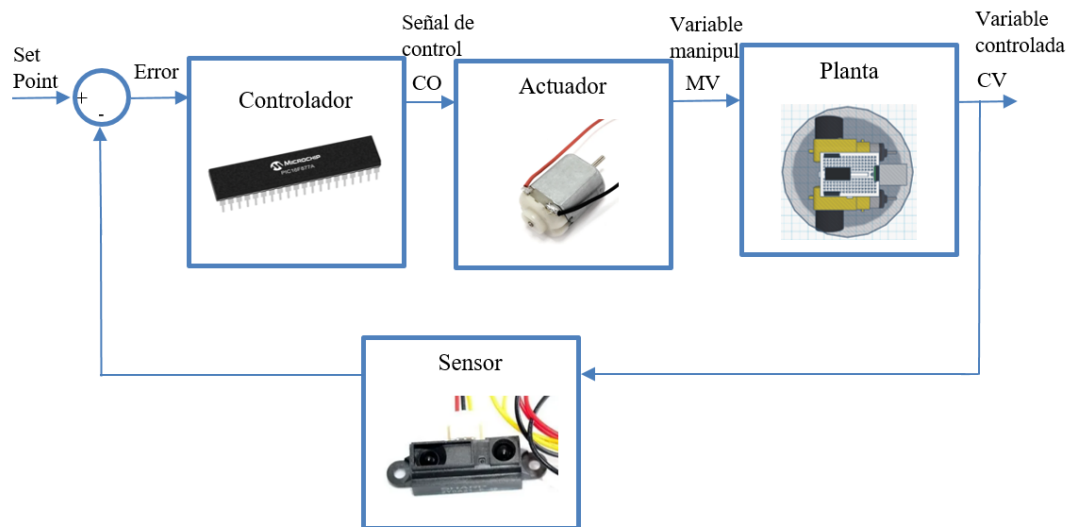


- Voltaje de funcionamiento: 2.7V – 6.2V
  - Rango de detección: 2 cm – 10 cm
  - Consumo medio de corriente: 5mA
  - Tipo de salida: señal digital
  - Periodo de actualización:  $3.16 \pm 6$  ms.
-

## Ingeniería básica del robot resuelve laberintos

### Esquema del prototipo

Para el prototipo de un robot resuelve laberintos se debe realizar un diagrama con sus elementos constitutivos.

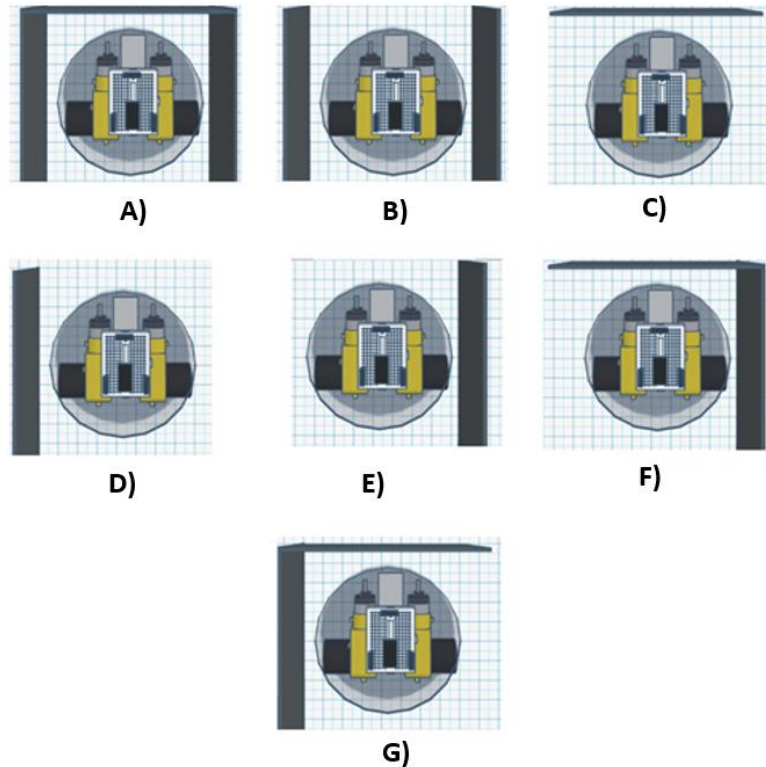


### Características de funcionamiento

El movimiento de un prototipo de un robot resuelve laberintos normalmente se basa en la detección de las paredes del laberinto para la toma de decisiones, existen algunas posibilidades de combinaciones y bifurcaciones en los laberintos como se observa en la Figura 34 .

**Figura 34**

*Combinaciones y bifurcaciones en laberintos A) Callejón sin salida B) Pared derecha e izquierda C) Pared frontal D) Pared izquierda E) Pared derecha F) Pared frontal y derecha G) Pared frontal e izquierda*



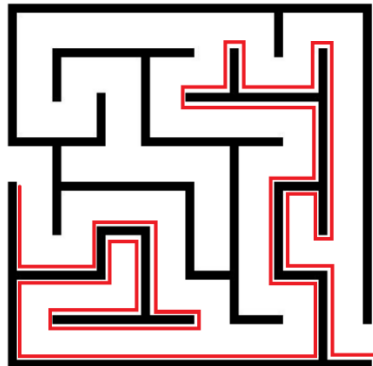
El objetivo en las competencias de robots resuelve laberintos es que el robot pueda salir del laberinto en el menor tiempo posible existen algunos algoritmos que permiten salir de un laberinto.

- **Algoritmos de la mano derecha y de la mano izquierda**

Son algoritmos bastante sencillos; se basan en seguir una pared del laberinto (izquierda o derecha) sin importar las bifurcaciones o cruces hasta salir o resolver el laberinto y resultan efectivos en casi todos los casos. Una de sus mayores desventajas es que no podrán resolver laberintos con islas internas además de que es un método que requiere bastante tiempo ya que recorre todas las opciones hasta encontrar la salida (Knuth, 2002).

**Figura 35**

*Resolución de laberinto con algoritmo de la mano derecha*

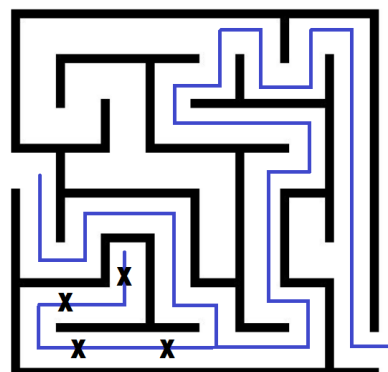


- **Algoritmo de recorrido recursivo**

Este algoritmo se basa en trazar una línea mientras se recorre el camino; cuando se encuentra una pared se borra la línea y se continúa si hay una salida, este método encontrará siempre una salida, si es que existe, pero en la mayoría de los casos, no encuentra el camino más corto, y requiere recorrer una gran parte del laberinto para salir de él (Sedgewick, 1992).

**Figura 36**

*Resolución de laberinto con algoritmo de recorrido recursivo*



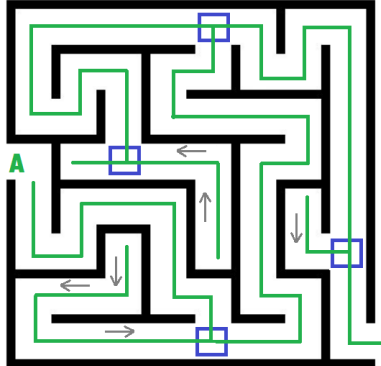
- **Algoritmo de Tarry**

Este método publicado por Tarry en 1895, crea un camino cíclico en el laberinto, inicia en una posición A selecciona un camino cualquiera y lo marca de manera especial, no se debe seguir el mismo camino dos veces y si se llega a un camino antiguo o sin salida se debe

retroceder hasta la entrada de dicho camino. Este algoritmo aunque efectivo podría tomar demasiado tiempo y señalar el laberinto (Korte & Vygen, 2011).

**Figura 37**

*Resolución de laberinto con algoritmo de Tarry*

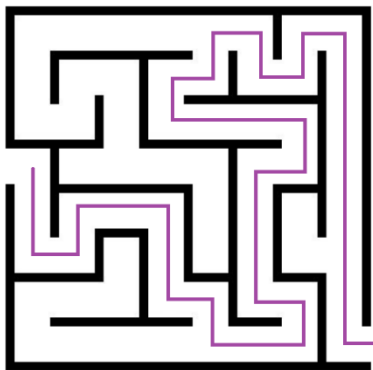


- **Algoritmo de Pledge**

En este algoritmo se escoge una dirección arbitraria para avanzar, y cuando se encuentra una pared recurre al algoritmo de la mano derecha. En el momento que la suma angular de las vueltas dadas se vuelva cero, se suelta la pared y se continúa con la dirección antes escogida. Este algoritmo funciona sólo para laberintos en segunda dimensión y en ciertos casos el robot queda ciclado en un solo camino (Aragona, 2000).

**Figura 38**

*Resolución de laberinto con algoritmo de Pledge*



- **Algoritmo de Lee**

Este algoritmo consta de dos partes, primero la creación del mapa del laberinto en memoria, por medio de varios recorridos; en este mapa de memoria se anotan las paredes que tiene cada celda conforme el robot las visita y se asignan un número a cada celda, de la siguiente manera: Iniciamos colocando un 0 en cada una de las celdas del laberinto que se consideren como meta (Katrib, y otros, 2017).

Una vez generados los números es fácil encontrar el camino dentro del laberinto, y además se asegura que será siempre el camino más corto, puesto que estando en cualquier celda del laberinto basta con moverse a la celda vecina que contenga un número menor.

**Figura 39**

*Resolución de laberinto con algoritmo de Lee*

30	29	28	27	26	27	30	31
31	34	35	24	25	28	29	32
32	33	36	23	22	21	20	33
1	38	37	38	39	18	19	34
2	5	6	7	40	17	38	35
3	4	19	8	41	16	37	36
16	17	18	9	10	15	14	37
15	14	13	12	11	12	13	38

En la siguiente tabla se resumen y comparan las características principales de cada algoritmo.



Algoritmo	Mano derecha e izquierda	Recorrido recursivo	Tarry	Pledge	Lee
<b>Características</b>					
Requiere memoria					✓
Sencillo de programar	✓	✓			
Marca el laberinto		✓	✓		✓
Usa el camino más corto				✓	✓

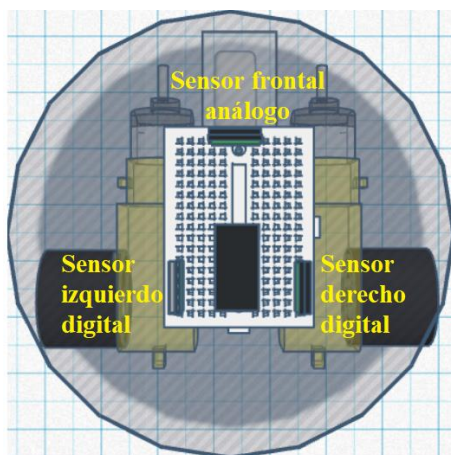
De acuerdo al reglamento del último CER (Concurso Ecuatoriano de robótica) para la categoría resuelve laberintos (sin memoria) el algoritmo de la mano derecha es el más adecuado ya que no se necesita marcar el laberinto o realizar recorridos por memoria.

### Sistema de control

Para implementar el algoritmo de la mano derecha es necesario analizar las condiciones de los sensores; al poseer 3 sensores (derecha, izquierda y frontal) se obtienen 8 posibles combinaciones para las acciones de los motores.

**Figura 40**

*Sensores de robot resuelve laberintos*









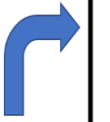

**Tabla 59***Condiciones de sensores para robot resuelve laberintos*

<b>CONDICIONES DE SENSORES</b>			
<b>Sensores</b>	Sensor Frontal	Sensor Derecho	Sensor Izquierdo
	Análogo	Digital	Digital
<b>Detecta pared</b>	1	0	0
<b>No detecta pared</b>	0	1	1

*Nota:* la salida del sensor análogo es analizada luego de realizar la transformación análoga a

digital, en este caso se establece que cuando detecte pared (ajustar los cm) su salida sea 1 en caso contrario 0.

Ahora es necesario analizar las posibilidades de combinaciones y bifurcaciones en los laberintos y los giros de acuerdo al algoritmo de la mano derecha.

Sensor Frontal	Sensor Derecho	Sensor Izquierdo	Ubicación en el laberinto
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

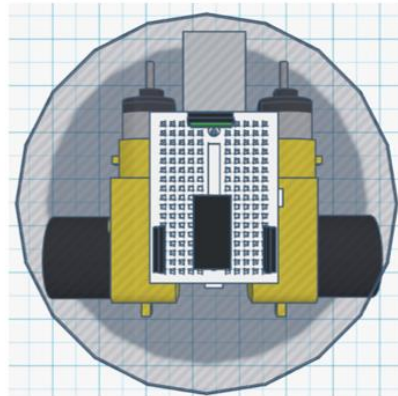
Los giros que se observan siempre a la mano derecha es debido a que es el algoritmo escogido, pero puede ser utilizado el de mano izquierda ya que su dificultad es la misma.

De acuerdo a las condiciones de los sensores se deberá ajustar el sentido de los motores para el movimiento del prototipo, esto se ampliará en el diagrama de flujo del programa utilizado.

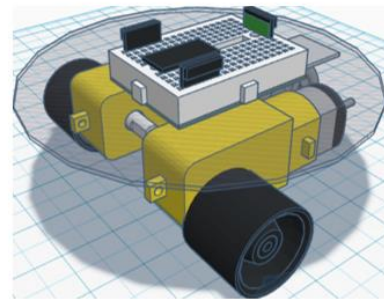
### Disposición geométrica aproximada

**Figura 40**

*Prototipo de robot resuelve laberintos A) Vista superior B) Vista isométrica*



A)



B)

## Lista de materiales

**Tabla 60**

*Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot resuelve laberintos*

<b>Modulo L298N Puente H</b>	<b>1</b>
<b>Cristal de Cuarzo de 4 MHz</b>	<b>1</b>
<b>Condensadores</b>	<b>4</b>
<b>Resistencias</b>	<b>4</b>
<b>Inductores</b>	<b>2</b>
<b>Diodos</b>	<b>8</b>
<b>Diodo emisor de luz (Led)</b>	<b>4</b>
<b>Pulsador</b>	<b>3</b>
<b>Sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F</b>	<b>2</b>
<b>Sensores de distancia análogo GP2Y0A51SK0F</b>	<b>1</b>
<b>Ruedas</b>	<b>2</b>
<b>Batería 5V</b>	<b>1</b>
<b>PIC16F877A</b>	<b>1</b>
<b>Mini regleta</b>	<b>1</b>
<b>Motores DC</b>	<b>2</b>

## Presupuesto tentativo

**Tabla 61**

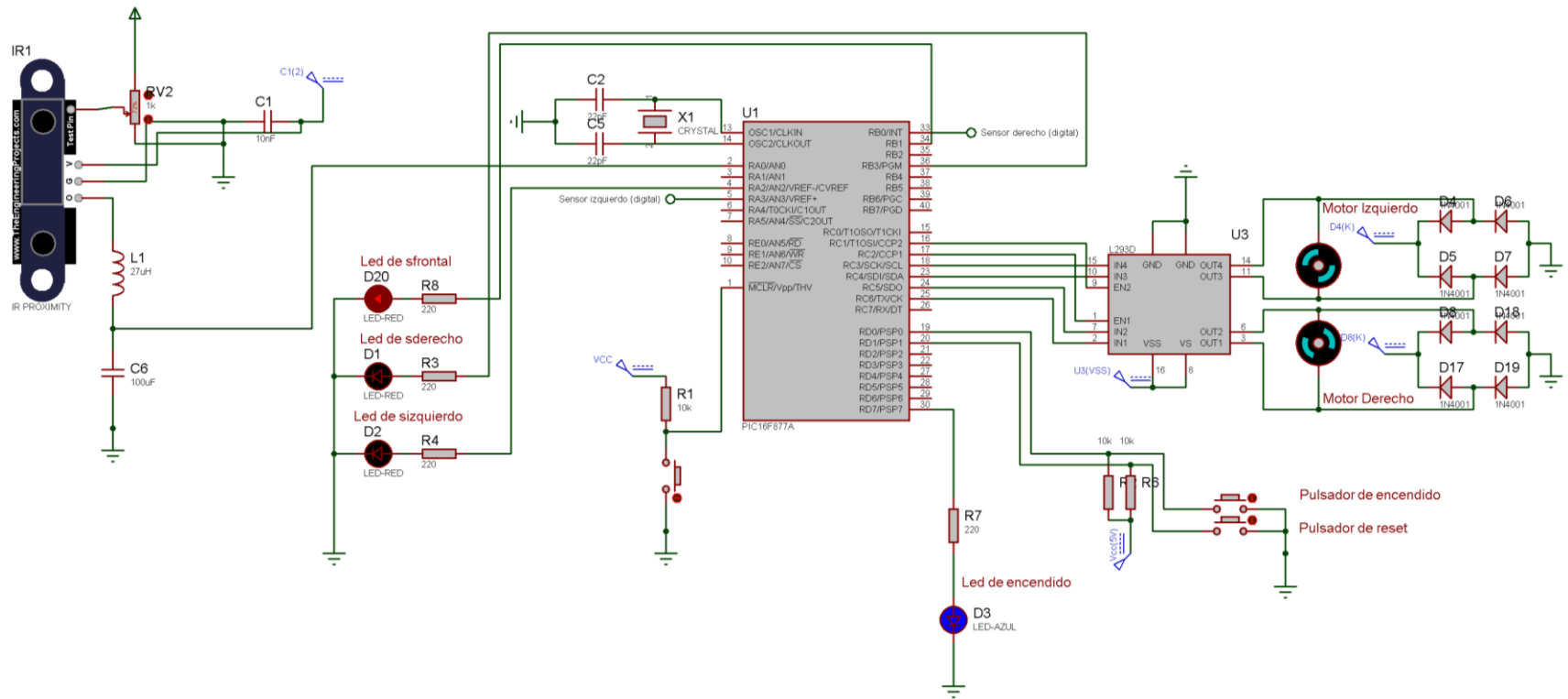
*Presupuesto tentativo para prototipo de robot resuelve laberintos*

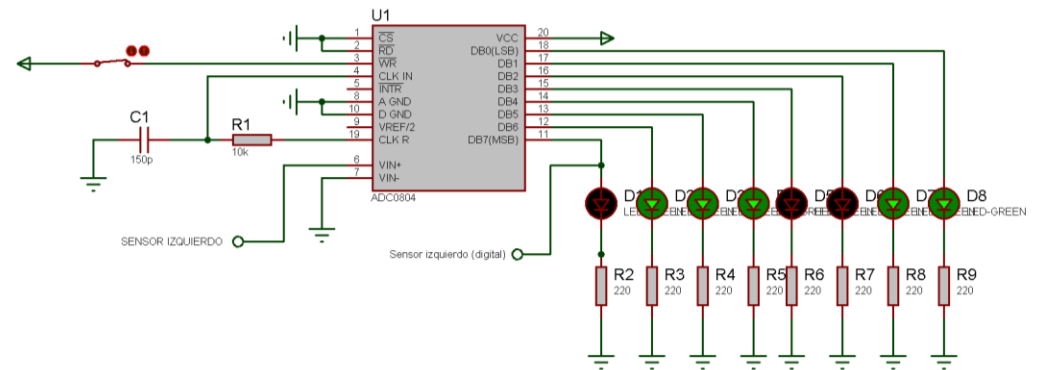
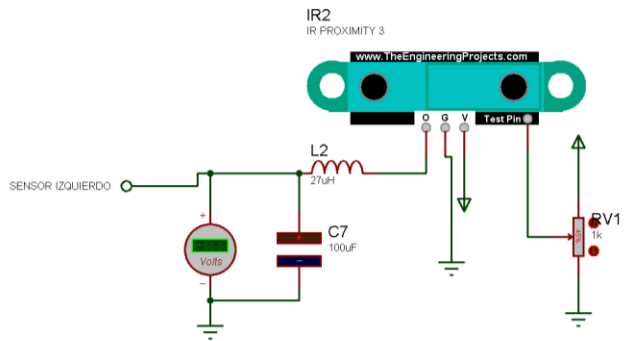
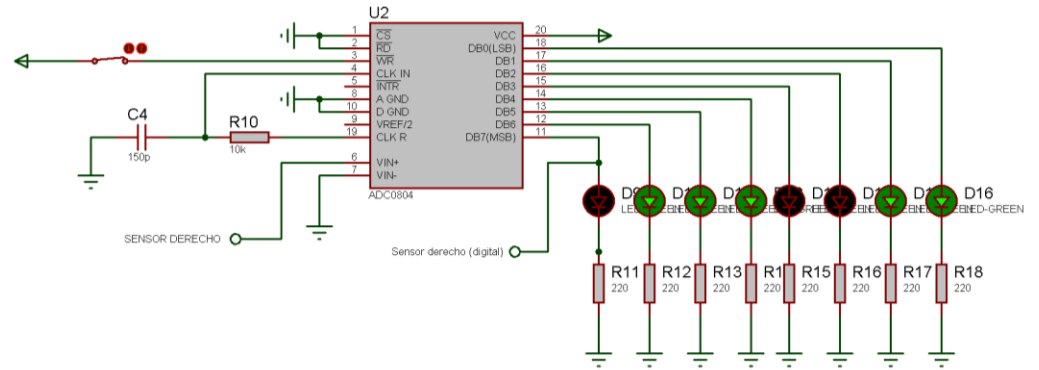
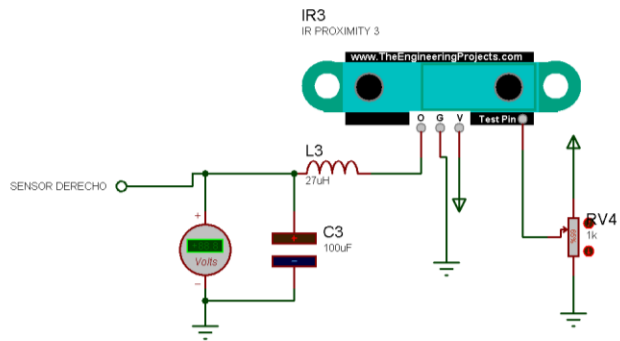
<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
1	Modulo L298N Puente H	3	3
8	Diodos	0,1	0,8
3	Pulsador	0,1	0,3
1	Sensores de distancia análogo GP2Y0A51SK0F	9	9
2	Sensor de distancia digital GP2Y0D810Z0F	13	26
1	Chasis resuelve laberintos (incluye motores y ruedas)	45	45
1	Batería 5V	6	6
1	PIC 16F877A	5	5
1	Mini regleta	3	3
1	Cristal de Cuarzo de 4 MHz	1	1
4	Condensadores	1	4
4	Resistencias	0,2	0,8
2	Inductores	2	4
4	Diodos emisores de luz (LED)	0,2	0,8
1	Metro de cable	1	1
<b>Total</b>			<b>US \$100,1</b>

Ingeniería a detalle del robot resuelve laberintos

Planos eléctricos

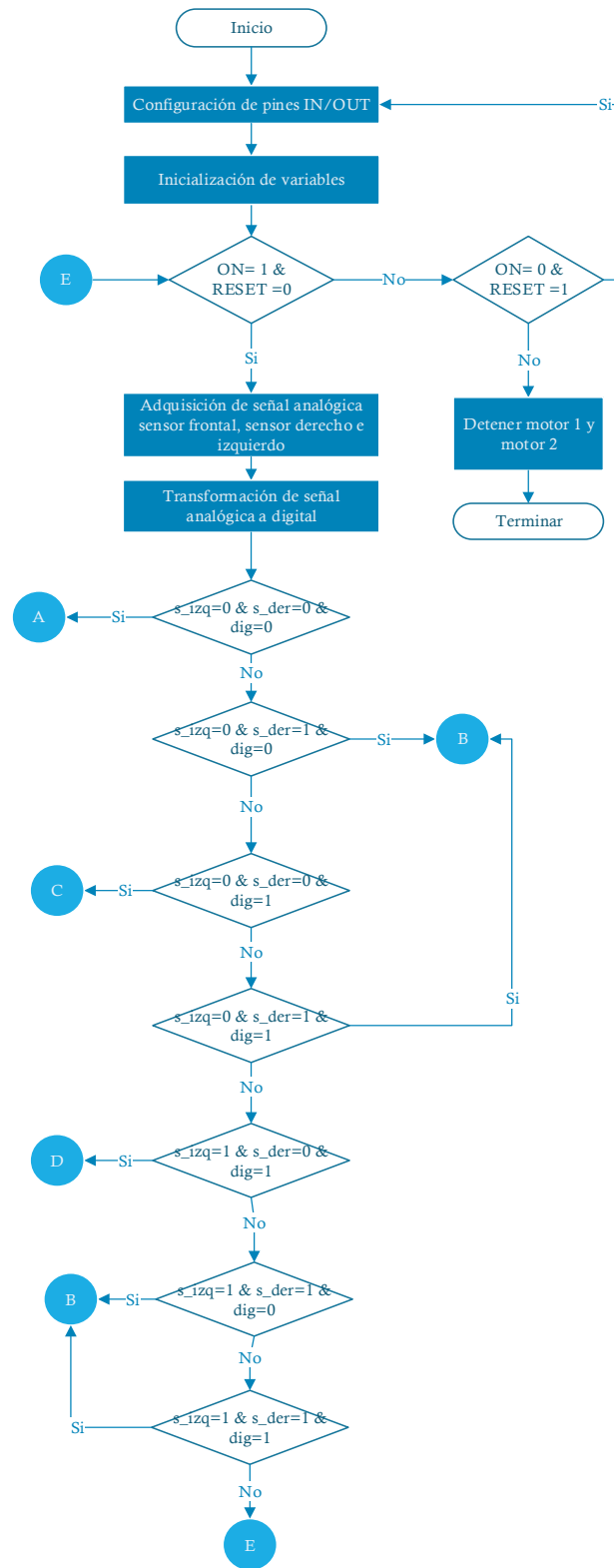
El diseño se realizó en software dedicado que es utilizado para elaborar diseños de circuitos electrónicos que permite ver una emulación virtual sobre su funcionamiento determinando así posibles problemas al realizar el diseño en una baquelita de fibra de vidrio.

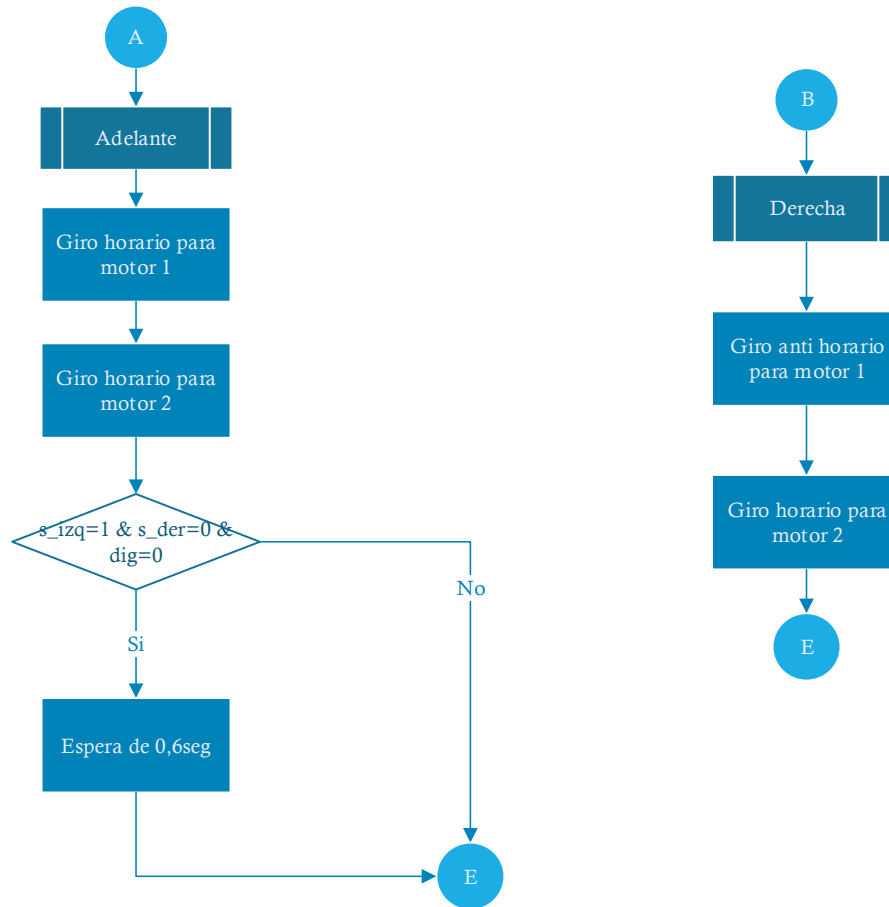


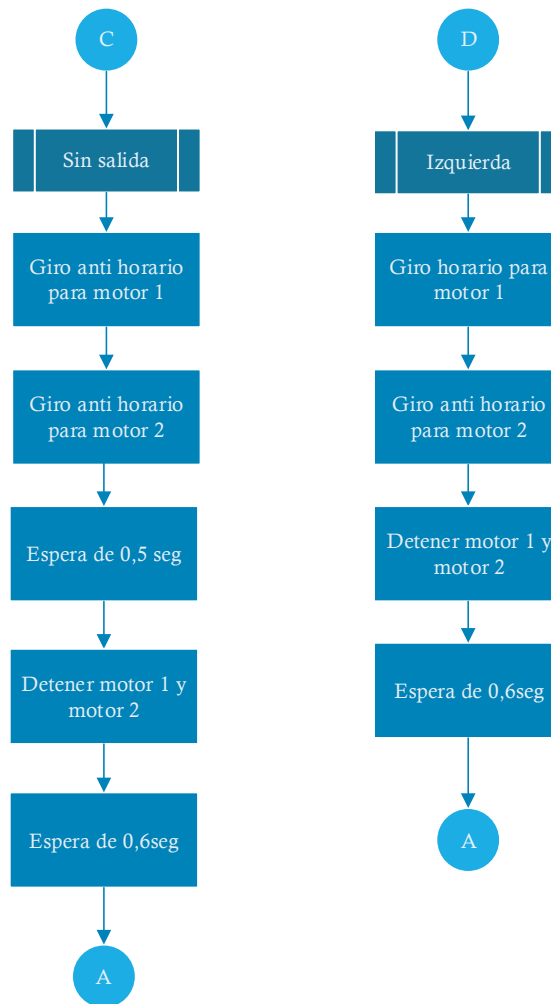




## Diagrama de flujo







### Pseudocódigo

#### PROGRAMA RESUELVE LABERINTOS

Si on= 1 & reset=0 entonces

Leer sensor derecho e izquierdo

Leer sensor análogo frontal

Conversión análoga a digital

Si s\_izq=0 & s\_der=0 & dig=0

Giro horario motor1

Giro horario motor2

Si s\_izq=1 & s\_der=0 & dig=0

Espera 0,6seg

FinSi

FinSi

Si s\_izq=0 & s\_der=1 & dig=0

Giro anti horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si s\_izq=0 & s\_der=0 & dig=1

Giro anti horario motor1

Giro anti horario motor2

Detener motor 1 y motor2

Espera 0,6seg

FinSi

Si s\_izq=0 & s\_der=1 & dig=1

Giro anti horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si s\_izq=1 & s\_der=0 & dig=1

Giro horario motor1

Giro anti horario motor2

Detener motor 1 y motor2

Espera 0,6seg

FinSi

Si s\_izq=1 & s\_der=1 & dig=0

Giro anti horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si s\_izq=1 & s\_der=1 & dig=1

Giro anti horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

FinSi

Si on= 0 & reset=1 entonces

Configurar pines IN/OUT

Sino Detener motor1 y motor2

FINPROGRAMA

## Ingeniería del robot balancín

Para comenzar con la ingeniería del robot balancín es necesario establecer las restricciones y objetivos generales para el prototipo.

**Tabla 62**

*Declaración de la misión de un robot balancín*

<b>Declaración de la misión: prototipo de robot balancín</b>	
<b>Descripción del producto</b>	Robot que posee uno o dos puntos de apoyo que puede mantener su equilibrio sin apoyo externo,
<b>Propuesta de valor</b>	Prototipo sencillo de implementar Diseño apto para competencias nacionales e internacionales
<b>Objetivos clave de negocio</b>	Brindar una guía técnica a personas con diferentes niveles de conocimiento en robótica para el desarrollo de prototipos Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de un robot balancín.
<b>Mercado primario</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
<b>Mercados secundarios</b>	Universidad que cuenten con un club de robótica propio Escuelas y colegios
<b>Suposiciones y restricciones</b>	Fallos mecánicos en pistas con poca fricción Desconexión de elementos eléctricos y/o electrónicos por movimientos bruscos Problemas con tiempo de respuesta de sensores y/o microcontrolador. Presupuesto limitado para la compra de los materiales
<b>Involucrados</b>	Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Docentes y estudiantes de escuelas y colegios

## Ingeniería de concepto del robot balancín

### Identificar las necesidades del cliente

Se analizó el reglamento del último Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER 2019) obteniendo características técnicas y físicas que debe tener el prototipo. Además, se realizó una consulta a estudiantes que participaron en las competencias.

**Tabla 63**

*Necesidades en un prototipo de robot balancín*

Número	Necesidad
1	Robot totalmente autónomo
2	La alimentación debe ser con baterías de cualquier tipo de corriente continua
3	Los sensores pueden operar con cualquier intensidad de luz
4	El robot deberá mantenerse de pie al menos 10 segundos
5	Las ruedas del robot no se deben deslizar en la pista
6	La batería del robot debe durar lo suficiente para la competencia
7	No puede pesar más de 3kg
8	Debe poder contenerse en 1m x 1m x 1m
9	Costo accesible

### Establecer especificaciones objetivo

- **Métricas**

Para conocer de mejor manera que especificaciones debemos tener en nuestro prototipo es necesario realizar una lista de métricas basadas en las necesidades

**Tabla 64***Métrica para especificaciones del robot balancín*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa
<b>5</b>	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s
<b>6</b>	9	Costo	3	US\$
<b>7</b>	8	Dimensiones	5	m



- **Recabar información de comparaciones con la competencia**

Tabla 65

*Métricas de robots comerciales del robot balancín*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Elego Tumbler</b>	<b>Yahboom</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Subjetivo	5	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	1000	2000
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	1,12	3,17
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,04
<b>5</b>	4,8	Velocidad máxima de desplazamiento	5	m/s	0,4	0,6
<b>6</b>	9	Costo	3	US\$	180	90
<b>7</b>	8	Dimensiones	5	m	0.2x0.2x0.1	0.2x0.07x 0.15

- **Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables**

Tabla 66

*Valores establecidos de métricas del robot balancín*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de autonomía	5	Sub.	4	5
<b>2</b>	2,6	Capacidad de la batería	5	mAh	800	2000
<b>3</b>	4,7	Masa total (incluyendo elementos)	3	Kg	3	2
<b>4</b>	5	Adherencia a la pista	4	MPa	0,06	0,1
<b>6</b>	4,8	Velocidad de desplazamiento	5	m/s	0,4	0,6
<b>7</b>	8	Dimensiones	5	m	0.5x0.5x0.5	1x1x1

### **Generación de conceptos**


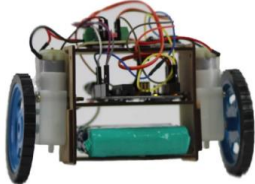
Para generar conceptos es necesario analizar las características y disponibilidad de los elementos que serán utilizados en el prototipo; para esto se realizará un análisis de la parte estructural (chasis) y microcontroladores disponibles.

- **CHASIS Y RUEDAS**

Para la parte estructural se utilizarán plataformas probadas disponibles comercialmente ya que este proyecto se enfoca en el diseño eléctrico, electrónico y de control.

**Tabla 67**

*Chasis y ruedas disponibles comercialmente del robot balancín*

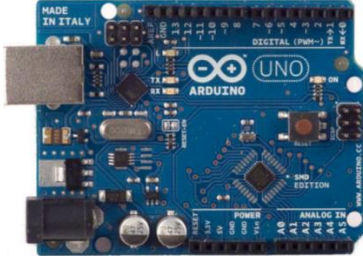

	<b>MODELO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
	<b>Chasis de 2 ruedas con 3 plataformas</b>	Pisos de acrílico negro de 4mm Columnas de acrílico transparente 2 ruedas 3 pisos de 14cm x5 cm
	<b>Chasis de 2 ruedas con 3 plataformas</b>	Pisos de acero inoxidable Columnas de tornillos 2 ruedas 3 pisos de 10cm x 4 cm
	<b>Chasis de 2 ruedas con 3 plataformas</b>	Columnas y pisos de MDF de 2.5 mm 2 ruedas 3 pisos de 8cm x 4 cm

- **MICROCONTROLADOR Y SENSORES**

Con base en el estado del arte y a información obtenida por parte de participantes en competencias de robótica lo más adecuado para diseñar e implementar robots para la categoría balancín es utilizar el microcontrolador Arduino utilizando el sensor acelerómetro y giroscopio.

Tabla 68

*Microcontrolador y sensor adecuado para robot balancín*

MICROCONTROLADOR	SENSOR
<p><b>ARDUINO UNO</b></p> 	<p>Sensor Acelerómetro Giroscopio</p> <p>Arduino Mpu6050</p> 

### Selección del concepto

- **Ponderación de conceptos**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

Tabla 69

Ponderación de hardware disponible para robot balancín

Criterios de selección	Chasis y ruedas	Peso	Chasis de 2 ruedas con plataformas de acrílico		Chasis de 2 ruedas con plataformas de acero inoxidable		Chasis de 2 ruedas con plataformas de MDF (madera)	
			Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Velocidad</b>		15%	4	0.6	3	0.45	5	0.75
<b>Peso</b>		10%	5	0.5	4	0.4	3	0.3
<b>Estética</b>		10%	4	0.4	3	0.3	5	0.5
<b>Facilidad de ensamble y desensamble</b>		5%	5	0.25	4	0.2	4	0.2
<b>Equilibrio</b>		15%	3	0.45	4	0.6	5	0.75
<b>Resistente a caídas</b>		15%	4	0.6	5	0.75	3	0.45
<b>Resistente a movimiento</b>		10%	3	0.3	2	0.2	5	0.5
<b>TOTAL</b>		100%	3.9		3.9		<b>4.25</b>	

- **En la Tabla 69**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

**Tabla 11** de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, la mejor opción para un prototipo de robot balancín es un chasis de 2 ruedas con plataformas de MDF (madera) ya que posee las siguientes características:

- Velocidad
- Poco peso

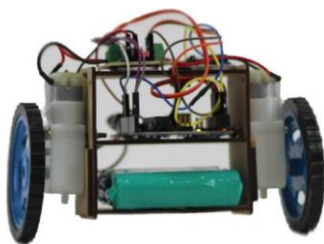
- Es sencillo para armar y desarmar
- Resistente a movimiento y caídas
- Costo accesible

- **Especificaciones finales**

---

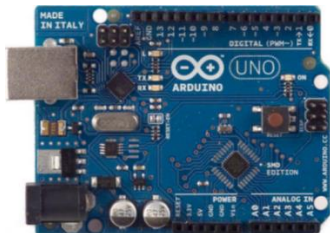
### Características

#### CHASIS



- Columnas y pisos de MDF de 2.5 mm
- 2 ruedas
- 3 pisos de 8cm x 4 cm

#### CONTROLADOR ARDUINO UNO



- Microcontrolador principal  
Arduino ATmega328
- 14 pines digitales de entrada / salida (6 salidas PWM).
- 6 entradas analógicas
- Cristal de 16 MHz
- Conector de alimentación (7-12VCD)
- Memoria 32 KB 8 pines analógicos de entrada / salida.

#### SENSOR ACCELERÓMETRO

#### GIROSCOPIO ARDUINO MPU6050

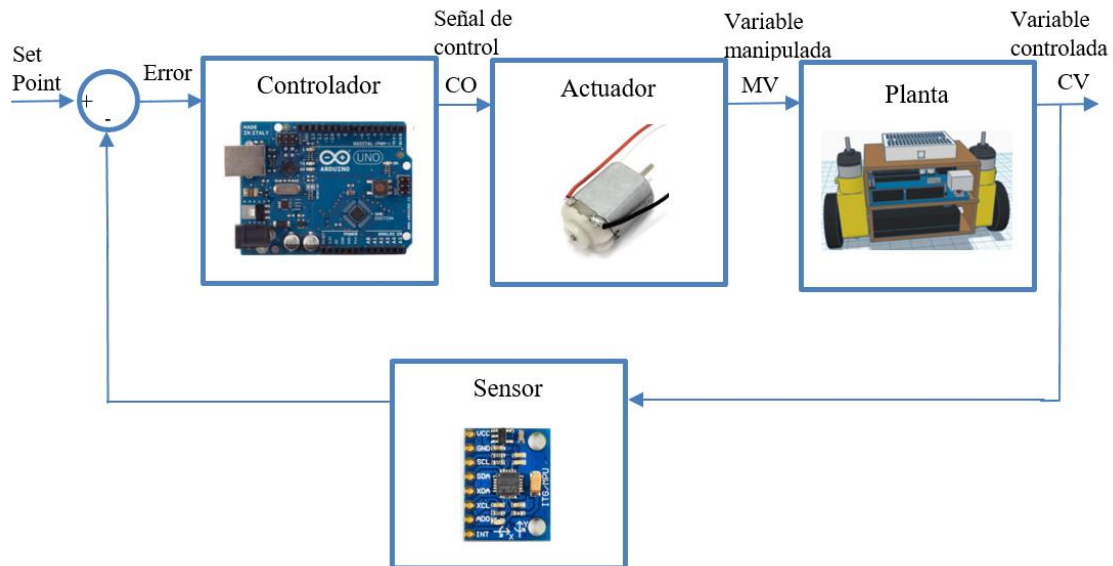


- Voltaje de funcionamiento: 3.3V – 5V
  - Grados de libertad: 6 DoF
  - Rango Giroscopio: 250Grad/Seg,  
500Grad/Seg, 1000Grad/Seg,  
2000Grad/Seg
-

## Ingeniería básica del robot balancín

### Esquema del prototipo

Para el prototipo de un robot balancín se debe realizar un diagrama con sus elementos constitutivos.



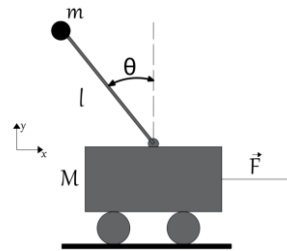
### Características de funcionamiento

Un robot auto balanceado o balancín consta de dos ruedas (dos actuadores) con ejes colineales, es un péndulo montado sobre una plataforma móvil que tiene un ángulo de libertad que es el giro del péndulo con respecto al eje de las ruedas y gira alrededor de sí mismo. El péndulo invertido es inestable porque puede girar en cualquier momento y en cualquier dirección, a menos que se le aplique una fuerza de control conveniente (Ogata, 2003).

Para que el prototipo mantenga el equilibrio es necesario desarrollar un algoritmo de control que permita que el robot se mueva hacia adelante y hacia atrás cambiando la referencia para la posición y velocidad del sistema, evitando un punto donde los dos actuadores no puedan recuperar el equilibrio del robot.

Figura 41

Sistema de péndulo invertido



En estos prototipos es necesario medir velocidad angular, movimiento de rotación y aceleración, es decir es necesario conocer la medida de la inclinación del robot para aplicar una fuerza de control, como se explicará a continuación:

<b>Posición estable</b>		<p>Lectura de sensores inerciales (acelerómetro y giroscopio) para calcular el ángulo respecto al horizonte para compararlo con el ángulo objetivo (<math>0^\circ</math> si quiere mantener el equilibrio sin moverse, o un ángulo positivo o negativo si quiere avanzar o retroceder)</p>
<b>Inclinación hacia adelante</b>		<p>Con la diferencia entre el ángulo objetivo (<math>0^\circ</math> en equilibrio sin moverse) y el ángulo real un sistema de control envía los comandos correctos a los motores para mantener su equilibrio. Los comandos a los motores son aceleraciones.</p>
<b>Corrección de inclinación mediante motores</b>		<p>Si el robot se inclina hacia adelante (el ángulo del robot es de <math>3^\circ</math>), envía una orden a los motores para que aceleren hacia adelante hasta que este ángulo se reduzca a cero para preservar el equilibrio.</p>

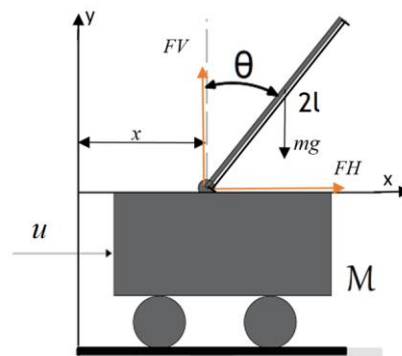


### Sistema de control

Como se mencionó un péndulo invertido es inestable porque puede girar en cualquier momento y en cualquier dirección y es necesario un algoritmo de control para que el prototipo mantenga el equilibrio, para esto es necesario conocer el modelo matemático que rige a este tipo de sistemas, es decir obtener la función de transferencia.

**Figura 42**

*Diagrama de cuerpo libre sistema de péndulo invertido*



$M$  masa del carro

$m$  masa del péndulo

$l$  longitud al centro de masa del péndulo

$\theta$  ángulo de la barra respecto de la línea vertical

$x_G, y_G$  coordenadas  $x, y$  del centro de gravedad del péndulo

$I$  momento de inercia de la barra alrededor de su centro de gravedad

$$x_G = x + l * \text{sen}(\theta) \quad (35)$$

$$y_G = l * \text{cos}(\theta) \quad (36)$$

Movimiento rotacional de la barra:

$$I\ddot{\theta} = Vl * \text{sin}(\theta) - Hl * \text{cos}(\theta) \quad (37)$$

Movimiento horizontal del centro de la barra:

$$FH = m \frac{d^2}{dt^2} (x + l * \text{sen}(\theta)) \quad (38)$$

Movimiento vertical del centro de la barra:

$$FV - mg = m \frac{d^2}{dt^2} (l * \text{cos}(\theta)) \quad (39)$$

Movimiento horizontal del carro (no se mueve en vertical):

$$u - FH = M \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (40)$$

Ya que se debe mantener el péndulo invertido en posición vertical, se puede suponer que  $\theta(t)$  y  $\ddot{\theta}(t)$  son muy pequeños por lo que tienden a 0, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$I\ddot{\theta} = Vl\theta - FHL \quad (41)$$

$$m(\ddot{x} + l\ddot{\theta}) = FH \quad (42)$$

$$0 = V - mg \quad (43)$$

A partir de las ecuaciones ( 40 ) y ( 42 ) se obtiene:

$$u = (M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \quad (44)$$

A partir de las ecuaciones ( 41 )( 42 ) y ( 43 ) se obtiene:

$$mgl\theta = (I + ml^2)\ddot{\theta} + ml\ddot{x}$$

Debido al peso del robot balacín que estará distribuido sobre las ruedas se supondrá que  $I = 0$ , por lo que se obtiene:

$$mgl\theta = ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x} \quad (45)$$

Las ecuaciones ( 44 ) y ( 45 ) se modifican para obtener:

$$Ml\ddot{\theta} = (M + m)g\theta - u \quad (46)$$

$$Mx = u - mg\theta \quad (47)$$

A partir de la ecuación ( 46 ) se obtiene la función de transferencia de la planta que es:

$$\frac{\Theta(s)}{-U(s)} = \frac{1}{Mls^2 - (M + m)g} = \frac{1}{Ml \left( s + \sqrt{\frac{M+m}{Ml}}g \right) \left( s - \sqrt{\frac{M+m}{Ml}}g \right)} \quad (48)$$

Como se ve en la ecuación ( 48 ) la planta del péndulo invertido tiene un polo en el eje real negativo  $s = -\left(\frac{\sqrt{M+m}}{\sqrt{Ml}}\right)\sqrt{g}$  y otro en el eje real positivo  $s = \left(\frac{\sqrt{M+m}}{\sqrt{Ml}}\right)\sqrt{g}$ . Por lo tanto, la planta es inestable en lazo abierto y se requiere un control bastante robusto para ser implementado (Ogata, 2003).

Para realizar las simulaciones del control y pruebas en este documento se analizará un prototipo se utilizarán los siguientes valores (Beltrán Alonso, 2010).

M: Masa del carro = 0.5 Kg

m: Masa del péndulo = 0.5 Kg

l: Longitud péndulo = 0.3 m

I: Inercia del péndulo = 0.006 Kg\*m<sup>2</sup>

F: Fuerza aplicada al carro

x: Coordenadas de posición del carro

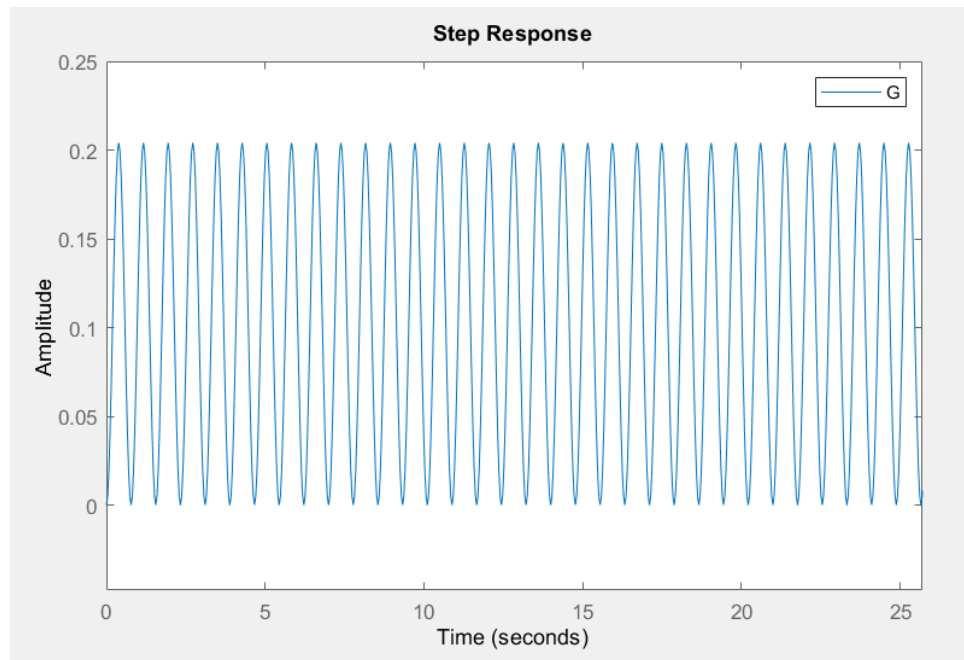
$\Theta$ : Angulo del péndulo

Obteniendo la ecuación:

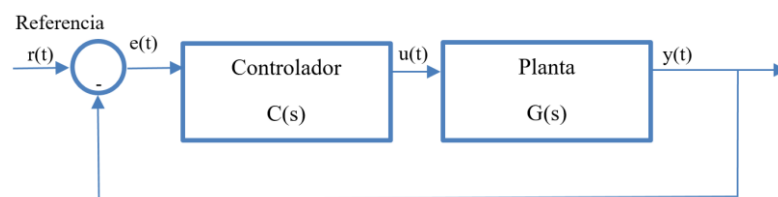
$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{-U(s)} = \frac{1}{0,15s^2 - 9,8} \quad (49)$$

Figura 43

Curva de respuesta a escalón unitario



Como se observa en la Figura 43 un sistema de péndulo invertido es inestable ante cualquier perturbación en este caso representado por una entrada de escalón unitario. Al ser un robot para competencias se requiere un tiempo de establecimiento corto y el ángulo del péndulo siempre menor que 0.08 radianes, lo que se traduce a un sobreimpulso máximo de 8%.



OBJETIVO DE CONTROL:

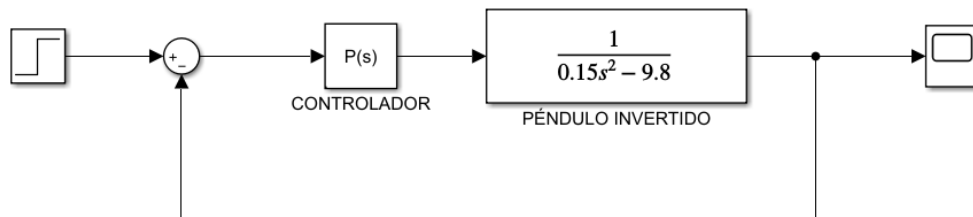
Parámetros	Valor
$t_s$	$\leq 80ms$
$M_p$	$\leq 8\%$
$e_{ss}$	2%

- **Algoritmo de control proporcional (P)**

Con este algoritmo se realiza un control suave (variaciones pequeñas). Existe una relación proporcional entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ .

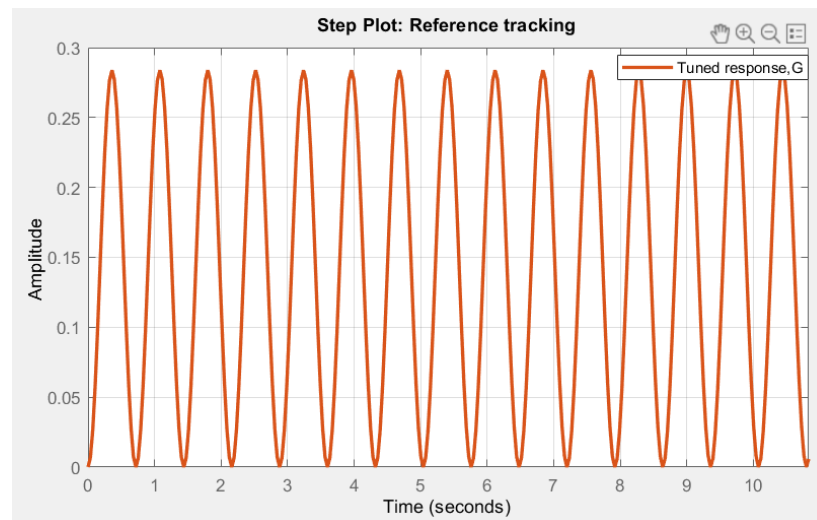
$$u(t) = K_p * e(t) \quad (50)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (51)$$



**Figura 44**

*Respuesta del sistema con un control P*



Obteniendo la ecuación para un controlador P

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,62 \quad (52)$$

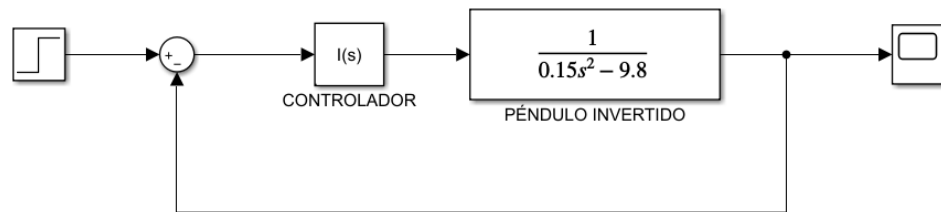
Como se observa en la Figura 44 con un control proporcional no se logra un control adecuado por lo que no se recomienda para este tipo de sistemas.

- **Algoritmo de control integral (I)**

Con un algoritmo integral lo que hacemos es acumular errores del pasado utilizando la ecuación guardándolo en la memoria mientras transcurre el tiempo y cada vez que se realiza una integral la respuesta se acerca más a la referencia.

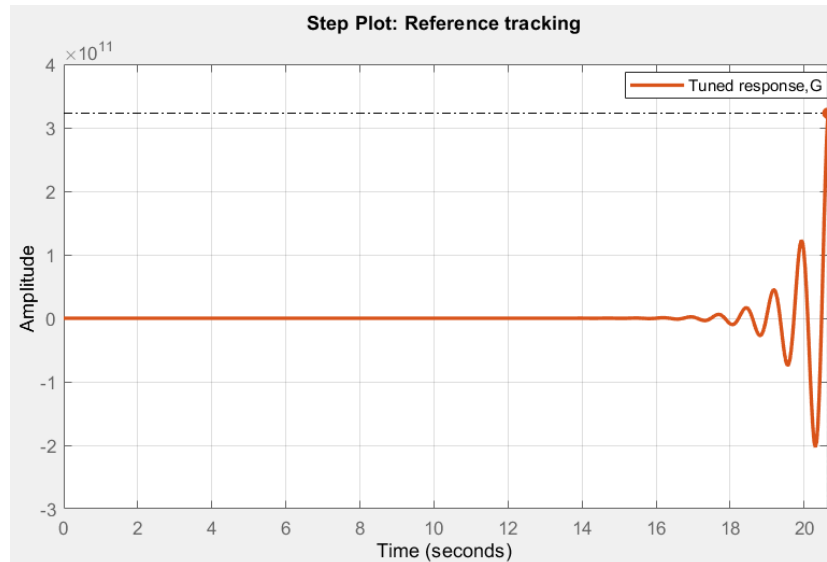
$$u(t) = K_i * \int_0^t e(t) dt \quad (53)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (54)$$



**Figura 45**

*Respuesta del sistema con un control I*



Obteniendo la ecuación para un controlador I

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{29,25}{s} \quad (55)$$

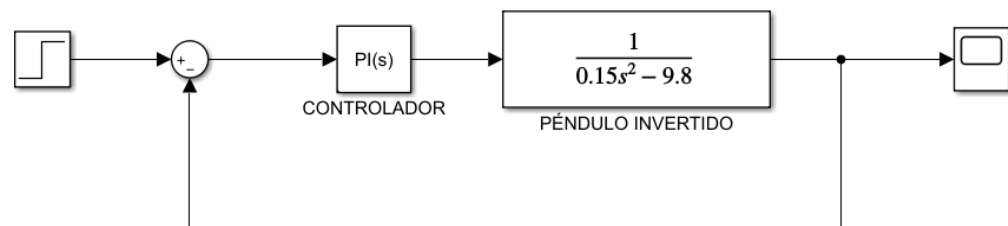
Como se observa en la Figura 45 con un control integral no se logra un control adecuado por lo que no se recomienda para este tipo de sistemas.

- **Algoritmo de control proporcional integral (PI)**

Es una combinación de algoritmos para ajustar el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento.

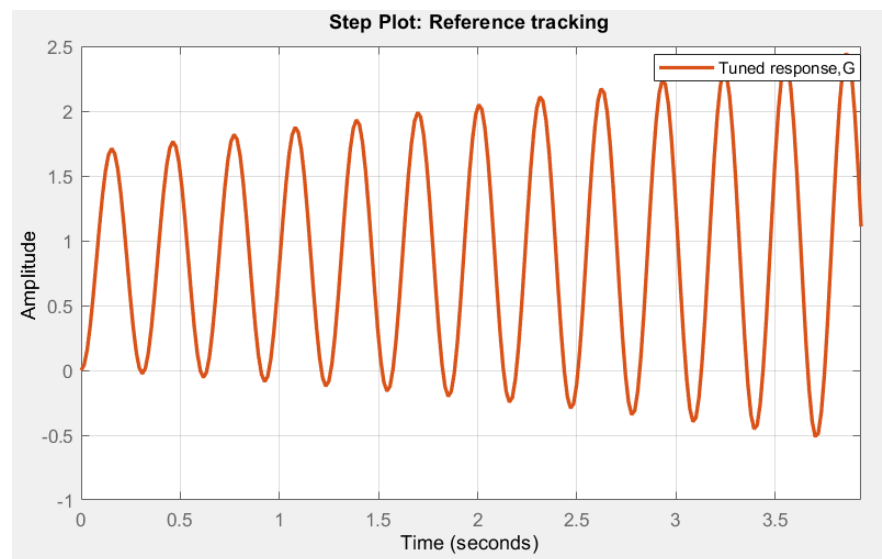
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt \quad (56)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (57)$$



**Figura 46**

*Respuesta del sistema con un control PI*



Obteniendo la ecuación para un controlador PI

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 52,23 \left( 1 + \frac{1}{2,81s} \right) \quad (58)$$

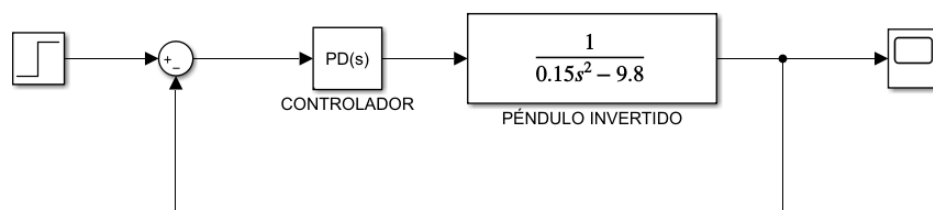
Como se observa **Figura 44** con un control proporcional integral no se logra un control adecuado y en ningún momento se logra sincronizar con la referencia.

- **Algoritmo de control proporcional derivativo (PD)**

Es una combinación de algoritmos para intentar disminuir el sobreimpulso y mejorar su estabilidad.

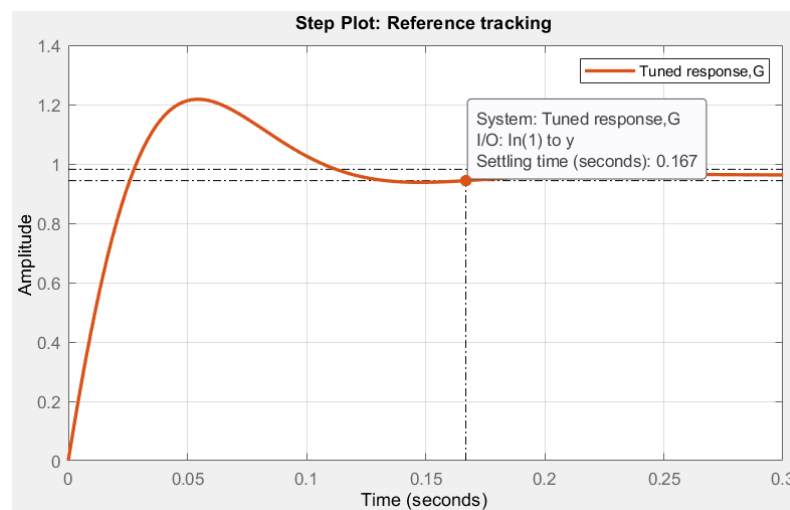
$$u(t) = K_p * e(t) + K_p T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (59)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (60)$$



**Figura 47**

*Respuesta del sistema con un control PD*





Obteniendo la ecuación para un controlador PD

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 253,1(1 + 0,029s) \quad (61)$$

Parámetros	Sistema controlado
Tiempo de subida $T_r$ seg	0,020
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	0,167
Sobreimpulso $M_p$ %	26,5

Se observa que la señal se controla; el tiempo de establecimiento ha mejorado considerablemente, pero existe un sobreimpulso muy alto por lo que no es una opción viable para este sistema.

- **Algoritmo de control proporcional integral derivativo (PID)**

El algoritmo principal de este controlador se compone de control proporcional (depende del error actual), control integral (se enfoca en los errores pasados) y el control derivativo (permite predecir errores a futuro).

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt + K_p T_d * \frac{d e(t)}{dt} \quad (62)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (63)$$

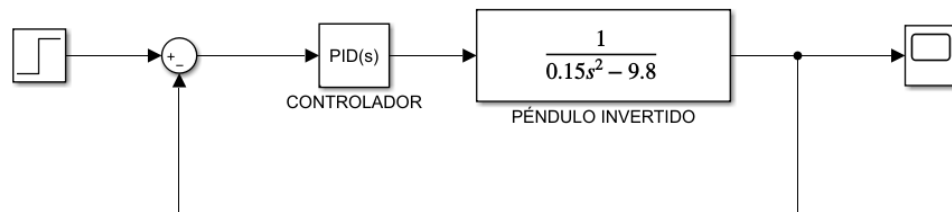
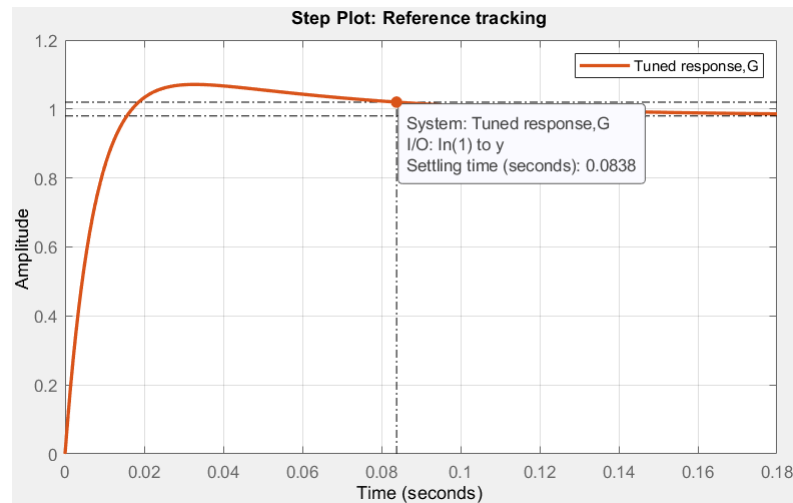


Figura 48

Respuesta del sistema con un control PID



Obteniendo la ecuación para un controlador PID

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 390,71 \left( 1 + \frac{1}{0,440s} + 0,059s \right) \quad (64)$$

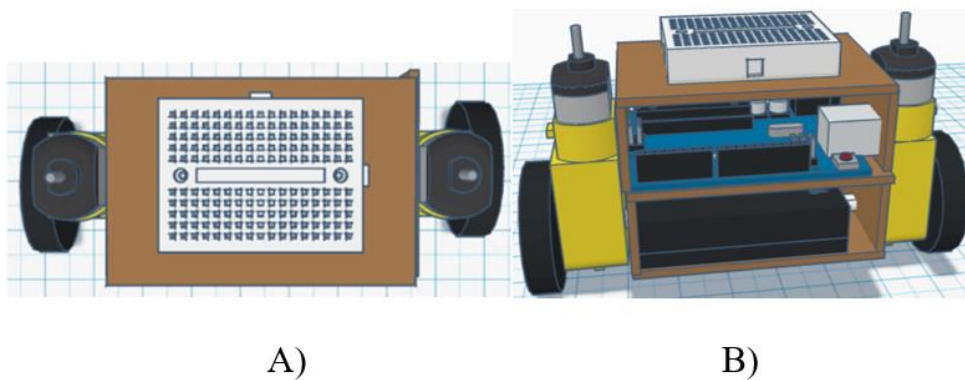
Parámetros	Sistema controlado
Tiempo de subida $T_r$ seg	0,01114
Tiempo de establecimiento $t_s$ seg	0,0838
Sobreimpulso $M_p$ %	7,13%

En la Figura 48 , al utilizar un algoritmo proporcional integral derivativo se observa un error en estado estacionario muy pequeño ya que la señal de respuesta se estabiliza en el valor deseado, el tiempo de establecimiento es corto; además tenemos un sobreimpulso del 7% que es aceptable para este tipo de sistemas, por lo que es la mejor opción para el control.

**Disposición geométrica aproximada**

Figura 49

Prototipo de robot balancín A) Vista superior B) Vista isométrica



### Lista de materiales

Tabla 70

Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot balancín

<b>Módulo L298N Puente H</b>	<b>1</b>
<b>Acelerómetro y giroscopio MPU6050</b>	<b>1</b>
<b>Interruptor</b>	<b>1</b>
<b>Ruedas</b>	<b>2</b>
<b>Batería 9V</b>	<b>1</b>
<b>Batería Lipo 12V 3S</b>	<b>1</b>
<b>Controlador Arduino UNO</b>	<b>1</b>
<b>Mini regleta</b>	<b>1</b>
<b>Motores DC</b>	<b>2</b>

## Presupuesto tentativo

**Tabla 71**

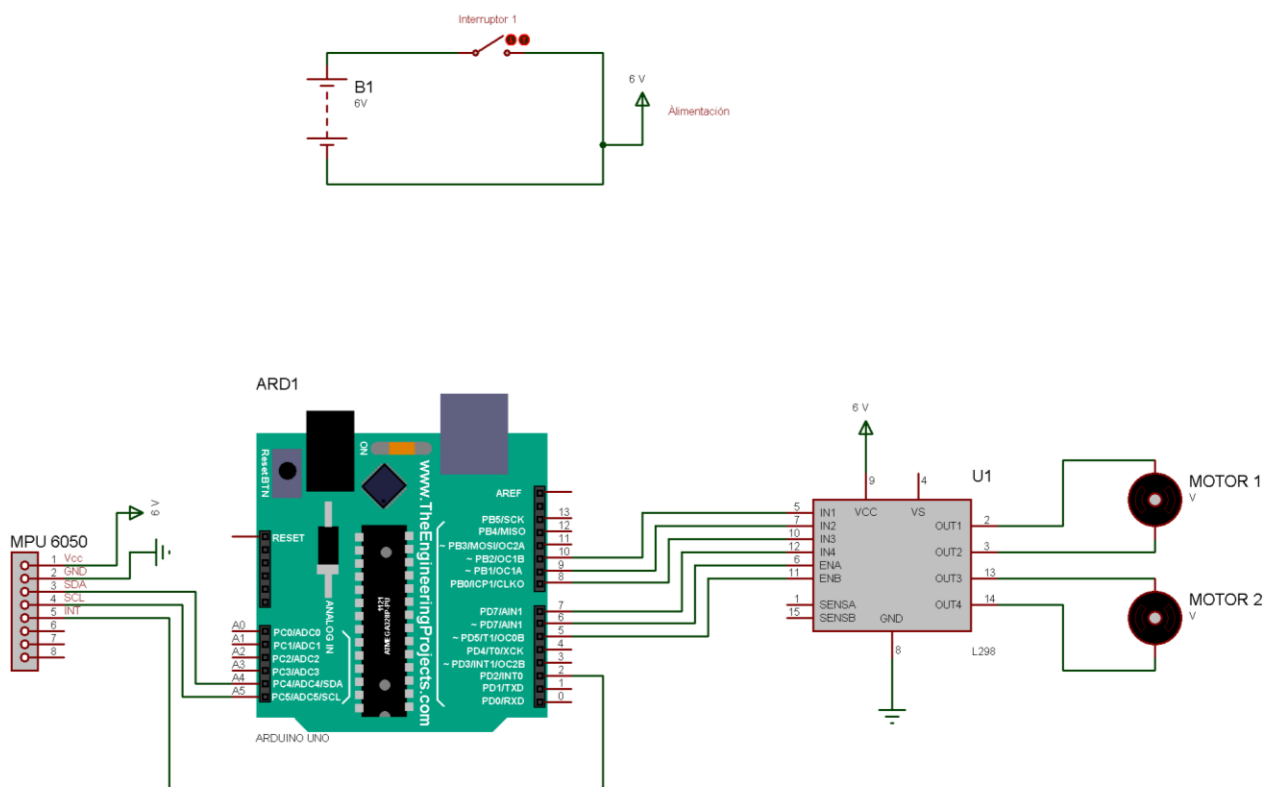
*Presupuesto tentativo para prototipo de robot balancín*

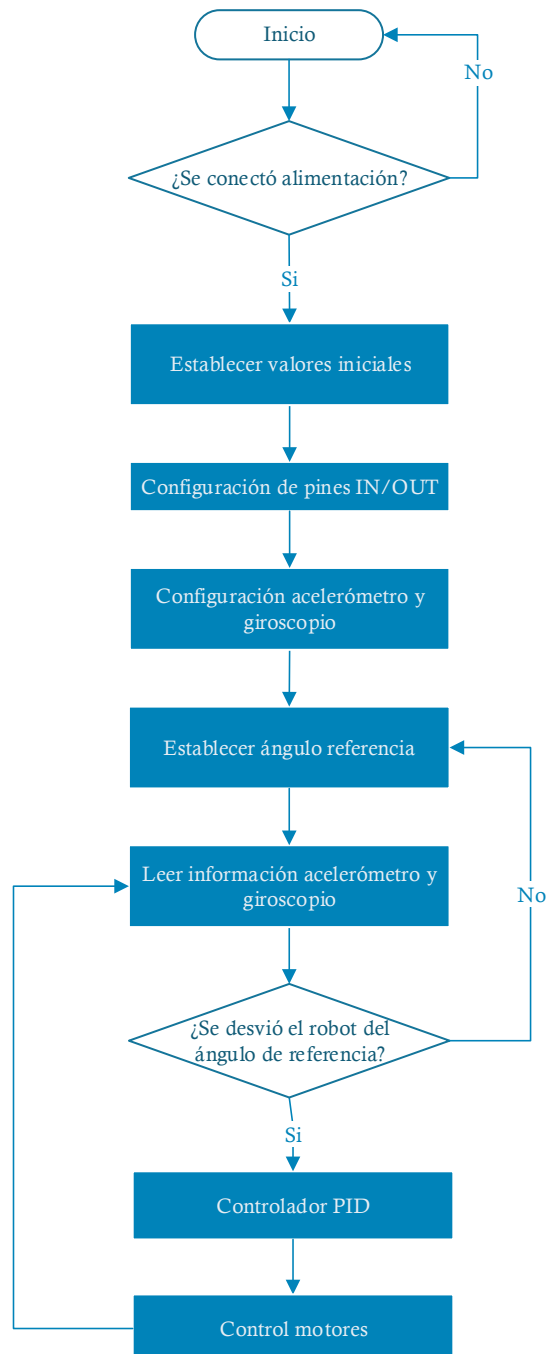
<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
<b>1</b>	Módulo L298N Puente H	3	3
<b>1</b>	Acelerómetro y giroscopio MPU6050	4	4
<b>1</b>	Interruptor	0,5	0,5
<b>1</b>	Batería 9V	1	1
<b>1</b>	Chasis robot balancín (incluye motores y ruedas)	35	35
<b>1</b>	Batería Lipo 12V 3S	25	25
<b>1</b>	Controlador Arduino UNO	10	10
<b>1</b>	Mini regleta	3	3
<b>1</b>	Metro de cable	1	1
<b>Total</b>			US \$82,5

## Ingeniería a detalle del robot balancín

### Planos eléctricos

El diseño se realizó en software dedicado que es utilizado para elaborar diseños de circuitos electrónicos que permite ver una emulación virtual sobre su funcionamiento determinando así posibles problemas al realizar el diseño en una baquelita de fibra de vidrio.



**Diagrama de flujo**

**Pseudocódigo**

PROGRAMA BALANCÍN

Si se conectó alimentación entonces

Configuración acelerómetro y giroscopio

Establecer ángulo referencia

Leer información acelerómetro y giroscopio

Si se desvió el ángulo de referencia

Controlador PID

Control motores

FinSi

Sino establecer ángulo de referencia

FinSi

FINPROGRAMA

## Ingeniería del robot mini sumo

Para comenzar con la ingeniería del robot mini sumo es necesario establecer las restricciones y objetivos generales para el prototipo.

**Tabla 72**

*Declaración de la misión de robot mini sumo*

<b>Declaración de la misión: prototipo de robot mini sumo para competencias</b>	
<b>Descripción del producto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robot que puede desplazarse de manera autónoma para atacar a su oponente para sacarlo del área establecida (dhoyo) en el menor tiempo posible.</li> </ul>
<b>Propuesta de valor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipo sencillo de implementar</li> <li>• Diseño apto para competencias nacionales e internacionales</li> </ul>
<b>Objetivos clave de negocio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brindar una guía técnica a personas con diferentes niveles de conocimiento en robótica para el desarrollo de prototipos</li> <li>• Realizar el diseño eléctrico, electrónico y de control de un robot mini sumo</li> </ul>
<b>Mercado primario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE</li> </ul>
<b>Mercados secundarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Universidad que cuenten con un club de robótica propio</li> <li>• Escuelas y colegios</li> </ul>
<b>Suposiciones y restricciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallos mecánicos en pistas con poca fricción</li> <li>• Desconexión de elementos eléctricos y/o electrónicos por movimientos bruscos</li> <li>• Problemas con tiempo de respuesta de sensores y/o microcontrolador.</li> <li>• Presupuesto limitado para la compra de los materiales</li> </ul>
<b>Involucrados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Club de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE</li> <li>• Docentes y estudiantes de escuelas y colegios</li> </ul>



## Ingeniería de concepto del robot mini sumo

### Identificar las necesidades del cliente

La categoría robot mini sumo tiene algunas necesidades específicas para las competencias, se realizó una consulta a estudiantes que participaron en las competencias.

**Tabla 73**

*Necesidades en un prototipo de un robot mini sumo*

<b>Número</b>	<b>Necesidad</b>
<b>1</b>	La alimentación debe ser con baterías de cualquier tipo de corriente continua
<b>2</b>	Los sensores pueden operar con cualquier intensidad de luz
<b>3</b>	Las ruedas del robot no se deben deslizar en la pista
<b>4</b>	La batería del robot debe durar lo suficiente para la competencia
<b>5</b>	Peso máximo 500 gr
<b>6</b>	Dimensiones de máximo 10cm ancho, 10 cm de largo y sin restricción en el alto
<b>7</b>	El robot debe ser resistente a golpes y movimientos bruscos
<b>8</b>	Costo accesible para estudiantes

### Establecer especificaciones objetivo

- **Métricas**

Para conocer de mejor manera que especificaciones debemos tener en nuestro prototipo es necesario realizar una lista de métricas basadas en las necesidades

Tabla 74

Métrica para especificaciones del robot mini sumo

Métrica núm.	Núm. De necesidad	Métrica	Imp.	Unidades
1	1,4	Capacidad de la batería	5	mAh
2	5	Masa total (incluyendo elementos)	3	gr
3	3	Adherencia a la pista	4	MPa
4	6	Dimensiones	5	cm
5	7	Resistencia al impacto	5	Pa
6	2	Sensibilidad de sensores	2	mV/V
7	8	Costo por prototipo	3	US\$

- **Recabar información de comparaciones con la competencia**

Tabla 75

Métricas de robots comerciales del robot mini sumo

Métrica núm.	Núm. De necesidad	Métrica	Imp	Unidades	Ikedo Mini Sumo	Parallax sumobot
1	1,4	Capacidad de la batería	5	mAh	450	650
2	5	Masa total (incluyendo elementos)	3	gr	150	450
3	3	Adherencia a la pista	4	MPa	0,1	0,5
4	6	Dimensiones	5	cm	10x10	33x25
5	7	Resistencia al impacto	5	Pa	0,85	0,95
6	2	Sensibilidad de sensores	2	mV/V	0,65	0,40
7	8	Costo por prototipo	3	US\$	90	140

- **Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables**

Luego de conocer algunos de los robots comerciales se establecen los valores para nuestro prototipo.

**Tabla 76**

*Valores establecidos de métricas del robot mini sumo*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Núm. De necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
<b>1</b>	1,4	Capacidad de la batería	5	mAh	650	800
<b>2</b>	5	Masa total (incluyendo elementos)	3	gr	500	500
<b>3</b>	3	Adherencia a la pista	4	MPa	0,5	0,1
<b>4</b>	6	Dimensiones	5	cm	10x10x15	10x10x10
<b>5</b>	7	Resistencia al impacto	5	Pa	0,5	1,5
<b>6</b>	2	Sensibilidad de sensores	2	mV/V	0,40	0,65
<b>7</b>	8	Costo por prototipo	3	US\$	120	90

### **Generación de conceptos**

Para generar conceptos es necesario analizar las características y disponibilidad de los elementos que serán utilizados en el prototipo; para esto se realizará un análisis de la parte estructural (chasis) y microcontroladores disponibles.

- **CHASIS Y RUEDAS**

Para la parte estructural se utilizarán plataformas probadas disponibles comercialmente ya que este proyecto se enfoca en el diseño eléctrico, electrónico y de control.

**Tabla 77**

*Chasis y ruedas disponibles comercialmente para robot mini sumo*



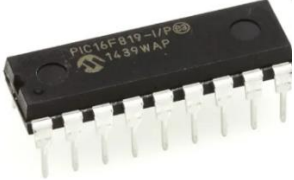

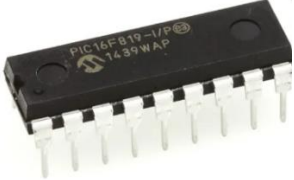

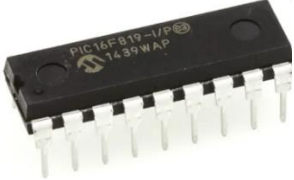
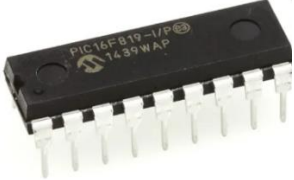

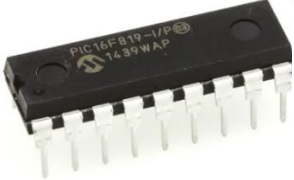
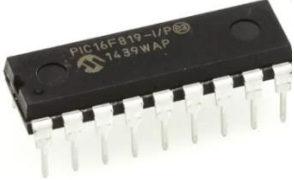

	<b>MODELO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
	Chasis de aluminio con cuchilla	Aluminio Dimensiones 10cm x 8cm x 5cm No incluye ruedas ni motores
	Chasis de acero negro con cuchilla	Acero Dimensiones 10cm x 9cm x 2.5cm No incluye ruedas ni motores
	Chasis de silicona con orugas	Acrílico de 1.58 mm color negro Dimensiones 5cm x 5cm x 1.27cm Cuenta con un compartimento para cuatro baterías AA y enchufes para dos motor reductores micro metálicos

- **MICROCONTROLADOR Y SENSORES**

Con base en el estado del arte y a información obtenida por parte de participantes en competencias de robótica se analizarán algunos microcontroladores y sensores adecuados para un prototipo de robot seguidor de línea categoría destreza.

Tabla 78

*Microcontroladores y sensores disponibles comercialmente para robot mini sumo*

MICROCONTROLADOR	SENSOR
<b>ARDUINO UNO</b>	Sensor infrarrojo IR FC-51
	
<b>PIC 16F877A</b>	Sensor infrarrojo IR TCRT5000
	
<b>PIC 16F877A</b>	Sensor ultrasónico HC SR 04
	
<b>PIC 16F877A</b>	SENSOR DE DISTANCIA SHARP ANÁLOGO
	GP2Y0A51SK0F
	
	SENSOR INFRARROJO CNY70
	

## Selección del concepto

- **Ponderación de conceptos**

La ponderación establecida es del 0 al 5 siendo 5 el mejor desempeño en cada criterio; el peso de cada criterio fue subjetivo de acuerdo a las necesidades, se aceptarán valores lo más cercanos a 4 para ser considerados para su implementación.

Tabla 79

*Ponderación de hardware disponible para robot mini sumo*

Criterios de selección	Chasis y ruedas	Peso	Chasis de aluminio con cuchilla		Chasis de acero negro con cuchilla		Chasis de silicona con orugas	
			Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Velocidad</b>		15%	5	0,75	4	0,6	5	0,75
<b>Forma aerodinámica</b>		5%	5	0,25	4	0,2	4	0,2
<b>Peso</b>		10%	5	0,5	3	0,3	5	0,5
<b>Estética</b>		5%	4	0,2	5	0,25	5	0,25
<b>Facilidad de ensamble y</b>		10%	5	0,5	4	0,4	3	0,3
<b>Equilibrio</b>		10%	4	0,4	5	0,5	3	0,3
<b>Resistente a caídas</b>		15%	5	0,75	5	0,75	3	0,45
<b>Costo</b>		10%	5	0,5	2	0,2	4	0,4
<b>Resistente a golpes</b>		20%	4	0,8	5	1	3	0,6
<b>TOTAL</b>		100%	<b>4,65</b>		4,2		3,75	

Tabla 80

Ponderación de microcontroladores disponibles para robot mini sumo

Microcontrolador	Peso	ARDUINO UNO		PIC16F877A	
		Calif	Valor parcial	Calif	Valor parcial
<b>Criterios de selección</b>					
<b>Costo</b>	15%	3	0.45	5	0.75
<b>Peso</b>	5%	3	0.15	5	0.25
<b>Estética</b>	10%	3	0.3	5	0.5
<b>Facilidad de instalación</b>	10%	5	0.5	4	0.4
<b>Costo por programación</b>	10%	5	0.5	3	0.3
<b>Velocidad de procesamiento</b>	20%	3	0.6	4	0.8
<b>Facilidad de programación</b>	10%	5	0.5	4	0.4
<b>Memoria suficiente</b>	10%	5	0.5	4	0.4
<b>Consumo</b>	10%	4	0.4	3	0.3
<b>TOTAL</b>	100%	3.9		4.1	

En la Tabla 79 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, la mejor opción para un prototipo de robot mini sumo es un chasis de aluminio con cuchillas, posee las siguientes características:

- Velocidad
- Poco peso
- Costo accesible
- Es sencillo para armar y desarmar
- Resistente a golpes

En la Tabla 30 de acuerdo a los criterios establecidos y la comparación realizada, la mejor opción para el microcontrolador es utilizar un PIC 16F877A ya que cuenta con las siguientes características:

- Bajo costo por programación
- Buena velocidad de procesamiento
- Facilidad de programación
- Memoria suficiente



- **Especificaciones finales**

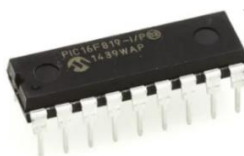
---

**Características**


---

**CHASIS**

- Aluminio
  - Dimensiones 10cm x 8cm x 5cm
  - No incluye ruedas ni motores
- 

**CONTROLADOR PIC 16F877A**

- 2 canales PWM.
  - Entradas y salidas 33
  - Frecuencia máxima 20 MHz
  - Conector de alimentación 2-5.5 VCD
  - Memoria ROM 8KB
- 

**SENSOR DE DISTANCIA SHARP****ANÁLOGO GP2Y0A51SK0F**

- Voltaje de funcionamiento: 2.7V – 6.2V
  - Rango de detección: 2 cm – 10 cm
  - Tipo de salida: señal digital
  - Periodo de actualización:  $3.16 \pm 6$  ms
  - Consumo medio de corriente: 5mA
- 

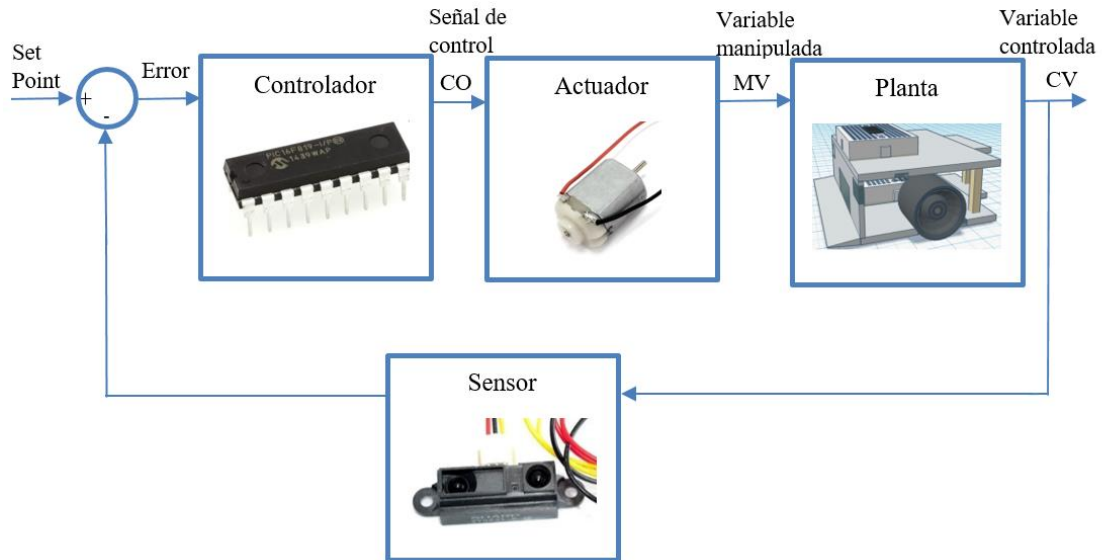
**SENSOR INFRARROJO CNY70**

- Distancia de operación máxima: 5mm.
  - Longitud de onda del emisor: 950 nm.
  - Corriente máxima del led: 50 mA.
  - Corriente máxima del foto transistor: 50 mA.
-

## Ingeniería básica del robot mini sumo

### Esquema del prototipo

Para el prototipo de un robot mini sumo se debe realizar un diagrama con sus elementos constitutivos.

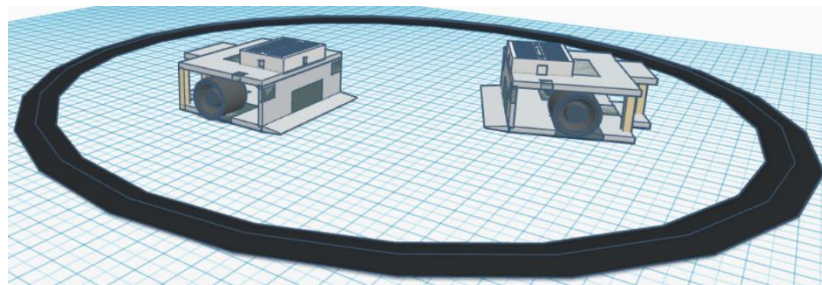


### Características de funcionamiento



La finalidad de un robot mini sumo es mover a su oponente hasta que salga del dhoyo, pero debe evitar salir por si solo del área de batalla.

**Figura 50**

*Dhoyo con robots mini sumo*



La función primordial del robot será detectar a su oponente para empujarlo, y por otro lado deberá leer las líneas del dhoyo para así evitar salir.

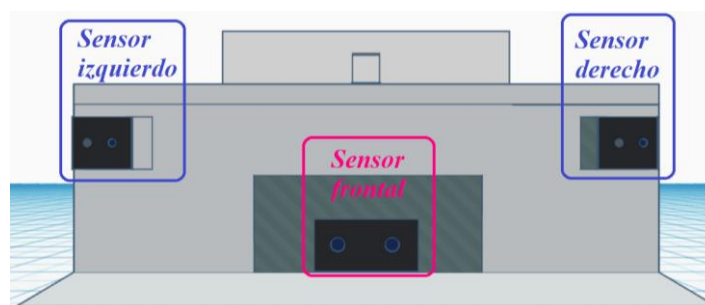
SENSOR	FUNCIONES
<p data-bbox="483 317 764 344"><b>SENSOR DE DISTANCIA</b></p> 	<ul data-bbox="992 310 1437 506" style="list-style-type: none"> <li>• Detectar cuando exista un objeto frente al prototipo</li> <li>• Detectar cuando no haya nada frente al prototipo</li> </ul>
<p data-bbox="493 527 755 554"><b>SENSOR INFRARROJO</b></p> 	<ul data-bbox="1016 590 1409 617" style="list-style-type: none"> <li>• Detectar las líneas del dhoyo</li> </ul>

### Sistema de control

Para la categoría mini sumo el robot tiene un área específica para desplazarse un dhoyo, el robot debe detectar la línea para evitar salir y buscar a su contrincante para empujarlo, darle vuelta o sacarlo del dhoyo.

**Figura 51**

*Ubicación de sensores en robot mini sumo*



El sensor Sharp analógico permitirá conocer la distancia en cm al contrincante; dependiendo de la necesidad debe ajustarse la distancia mínima que se considerará en detección frontal.

De acuerdo a la necesidad en la competencia se requiere que cuando detecte una distancia igual o mayor a 7cm el robot ataque a su contrincante.

<b>Distancia</b>	<b>Estado</b>	<b>Detección</b>
<b>&lt;=7cm</b>	Contrincante cerca	1
<b>&gt;7cm</b>	Contrincante lejos	0

También es necesario conocer la lectura o detección de líneas con los sensores infrarrojos CNY70, para este tipo de prototipo cuando detecte una línea muy cercana deberá alejarse para así evitar salir del dhoyo, como se explica en la siguiente tabla.

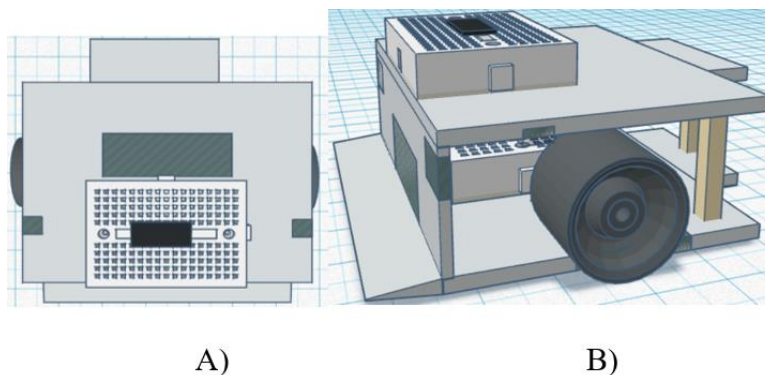
<b>Sensor frontal (sharp)</b>	<b>Sensor izquierdo (CNY70)</b>	<b>Sensor derecho (CNY70)</b>	<b>Acción</b>
<b>0</b>	0	0	Frente
<b>0</b>	0	1	Izquierda
<b>0</b>	1	0	Derecha
<b>0</b>	1	1	Reversa
<b>1</b>	0	0	Frente
<b>1</b>	0	1	Frente
<b>1</b>	1	0	Frente
<b>1</b>	1	1	Detener

También es necesario conocer la lectura o detección de líneas con los sensores infrarrojos CNY70, para este tipo de prototipo cuando detecte una línea muy cercana deberá alejarse para así evitar salir del dhoyo, como se explica en la siguiente tabla.

## Disposición geométrica aproximada

Figura 52

Prototipo de robot mini sumo A) Vista superior B) Vista isométrica



## Lista de materiales

Tabla 81

Materiales eléctricos y electrónicos para prototipo de robot mini sumo

ELEMENTO	CANTIDAD
Módulo L298N Puente H	1
Cristal de Cuarzo de 4 MHz	1
Switch	1
Condensadores	2
Diodos	8
Pulsador	1
Sensor de distancia SHARP análogo GP2Y0A51SK0F	1
Sensor infrarrojo CNY70	2
Ruedas	2
Batería 5V	1
PIC16F877A	1
Mini regleta	1
Motores DC	2

## Presupuesto tentativo

**Tabla 82**

*Presupuesto tentativo para prototipo de robot seguidor mini sumo*

<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
1	Módulo L298N Puente H	3	3
1	Cristal de Cuarzo de 4 MHz	1	1
1	Switch	0,5	0,5
2	Condensadores	0,5	1
8	Diodos	0,1	0,8
1	Pulsador	0,1	0,1
1	Sensor de distancia SHARP análogo GP2Y0A51SK0F	9	9
2	Sensor infrarrojo CNY70	1,75	3,5
2	Ruedas	8	16
1	Batería 5V	6	6
1	PIC16F877A	5	5
1	Mini regleta	3	3
1	Chasis	50	50
2	Motores DC	2	4
1	Metro de cable	1	1
<b>Total</b>			<b>US \$103,9</b>

## Ingeniería a detalle del robot mini sumo

### Planos eléctricos

El diseño se realizó en software dedicado que es utilizado para elaborar diseños de circuitos electrónicos que permite ver una emulación virtual sobre su funcionamiento determinando así posibles problemas al realizar el diseño en una baquelita de fibra de vidrio.

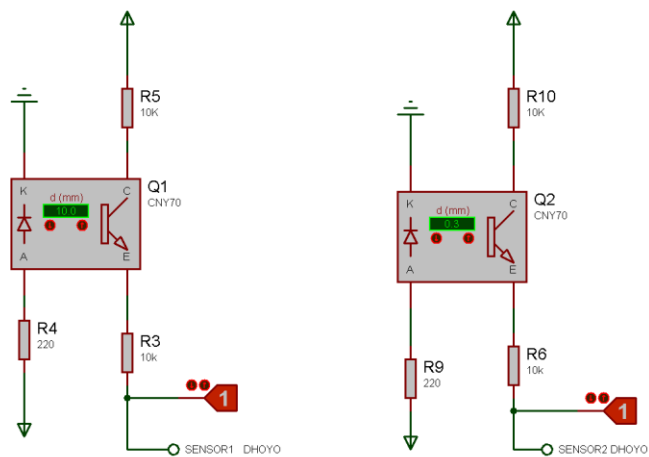
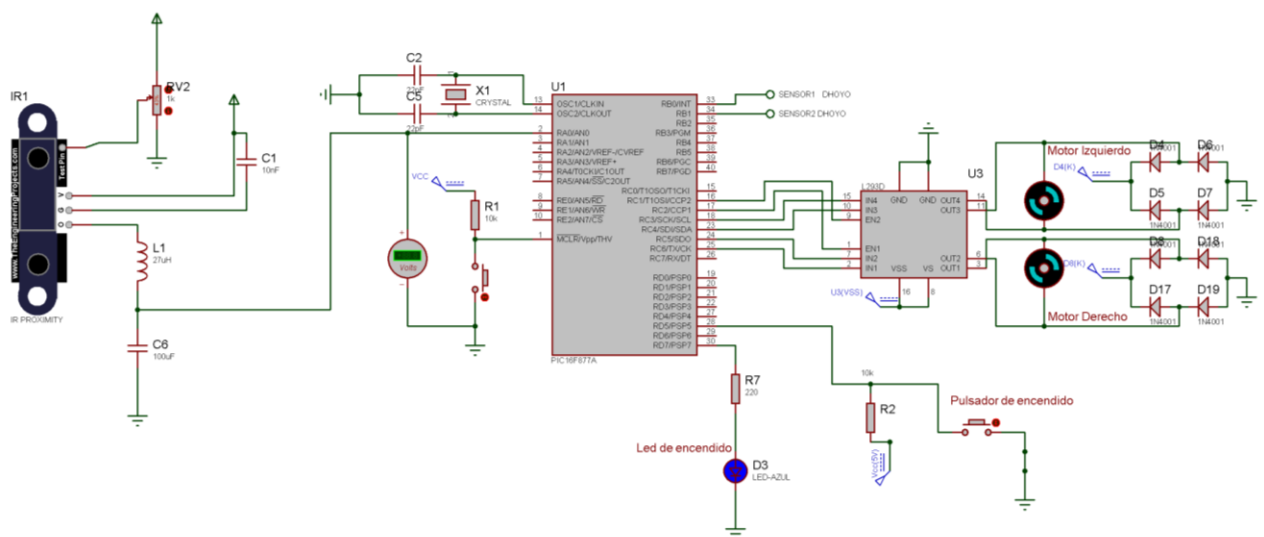
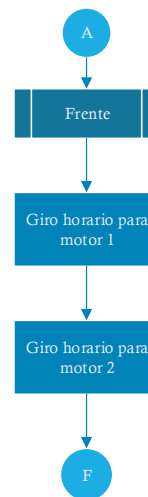
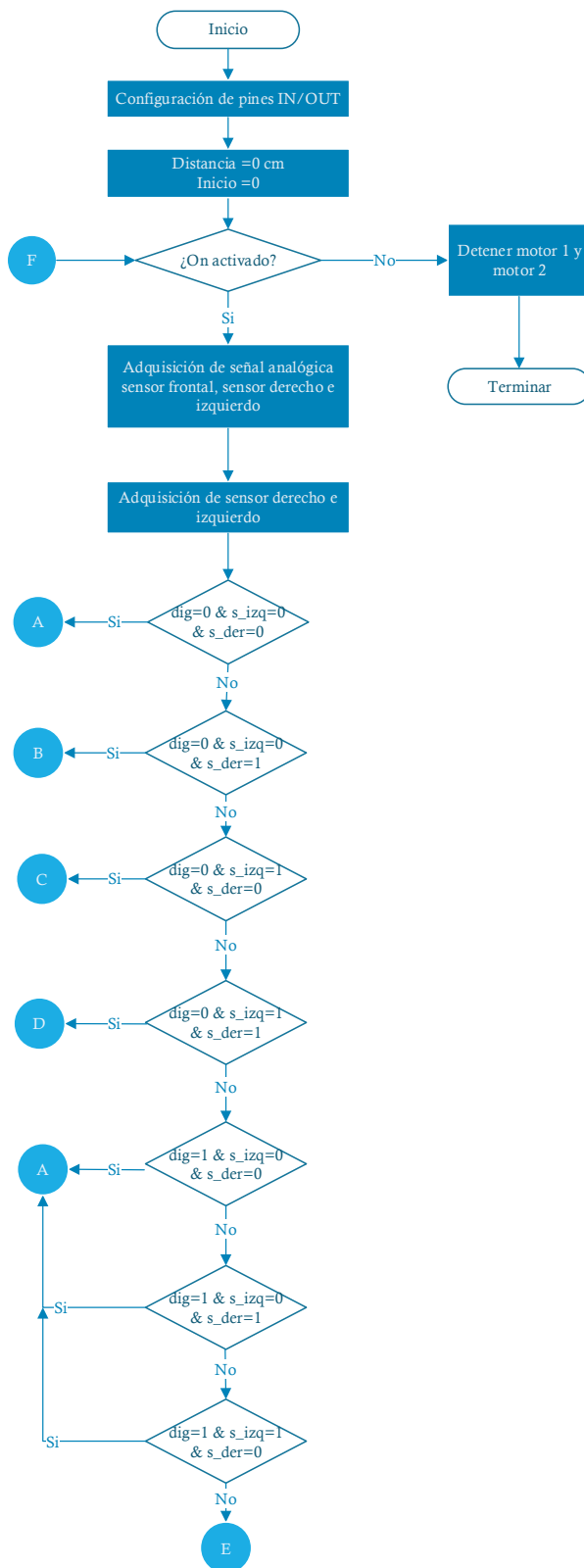
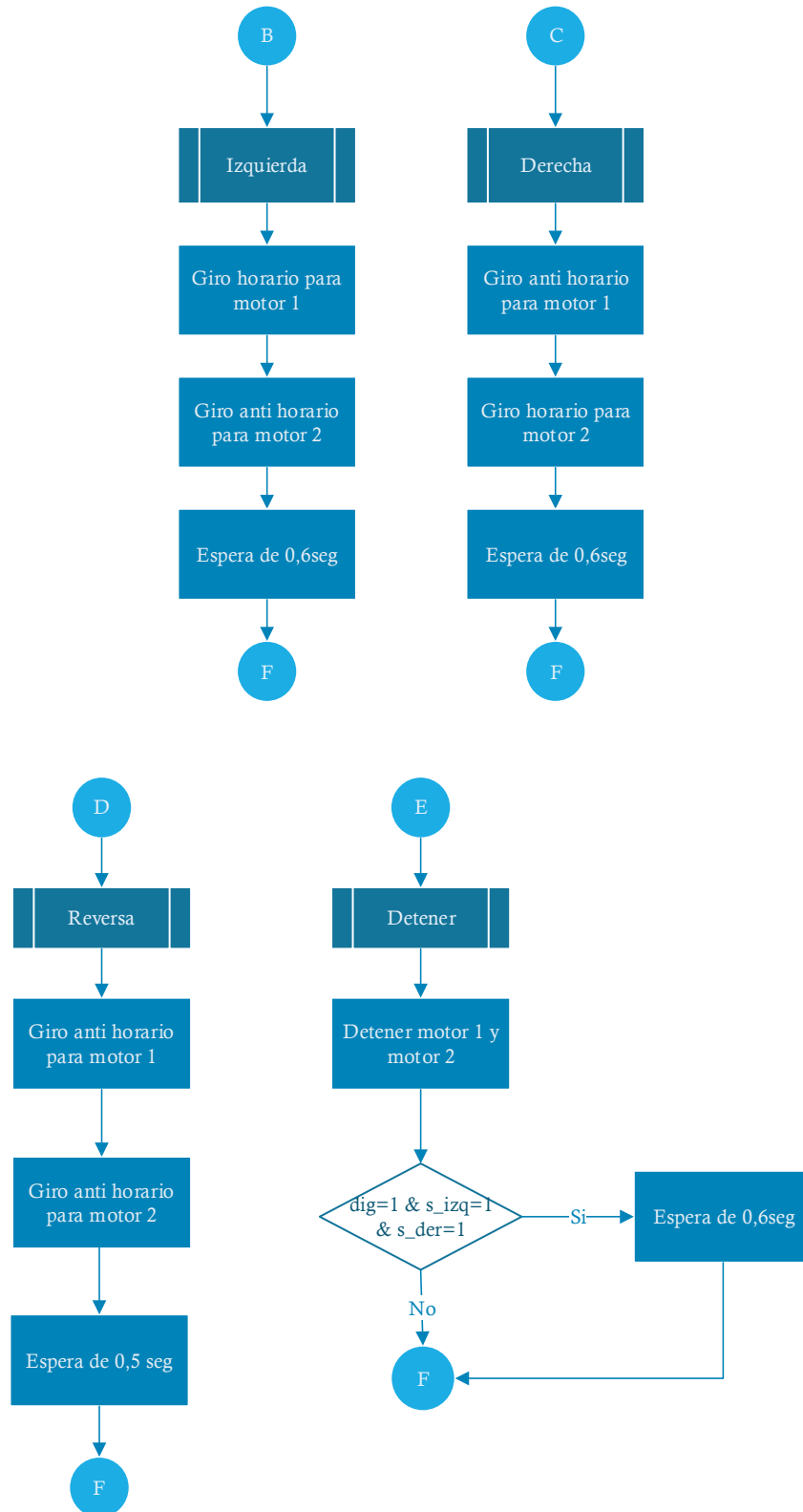


Diagrama de flujo







**Pseudocódigo**

## PROGRAMA MINISUMO

Si on= 1 entonces

Leer sensor derecho e izquierdo

Leer sensor análogo frontal

Conversión análoga a digital

Si dig=0 & s\_izq=0 & s\_der=0

Giro horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si dig=0 & s\_izq=0 & s\_der=1

Giro horario motor1

Giro anti horario motor2

FinSi

Si dig=0 & s\_izq=1 & s\_der=0

Giro anti horario motor1

Giro horario motor2

Espera 0,6seg

FinSi

Si dig=0 & s\_izq=1 & s\_der=1

Giro anti horario motor1

Giro anti horario motor2

FinSi

Si dig=1 & s\_izq=0 & s\_der=0

Giro horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si dig=1 & s\_izq=0 & s\_der=1

Giro horario motor1

Giro horario motor2

FinSi

Si dig=1 & s\_izq=1 & s\_der=0

Detener motor 1 y motor 2

Si dig=1 & s\_izq=1 & s\_der=1

Espera 0,6seg

FinSi

FinSi

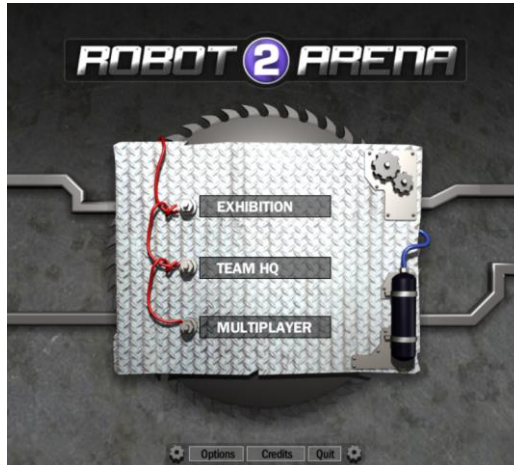
FinSi

Sino Detener motor1 y motor2

FINPROGRAMA

## Guía metodología para la utilización de software robot arena 2

### Introducción



Robot Arena 2 es un videojuego que permite la creación y combate de robots con entornos 3 D; el jugador puede diseñar el chasis, armas, pintura y la mecánica del robot para un combate.

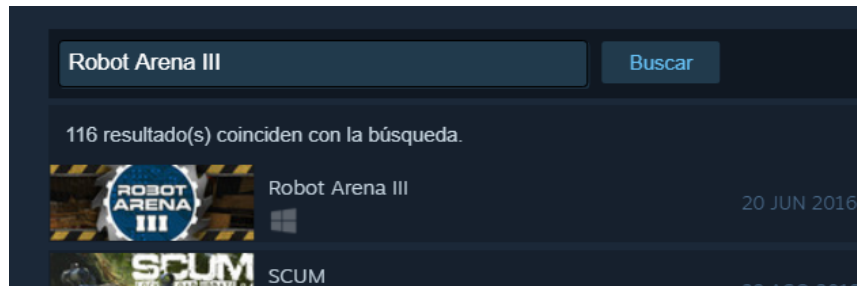
El robot se enfrenta a su oponente en diferentes arenas mediante control remoto intentando inmovilizarlo o destruirlo para ganar la batalla, y puede enfrentarse en diferentes categorías como uno contra uno o un torneo todos contra todos.

En muchas arenas están disponibles trampas y peligros que hacen que las batallas se tornen más interesantes.

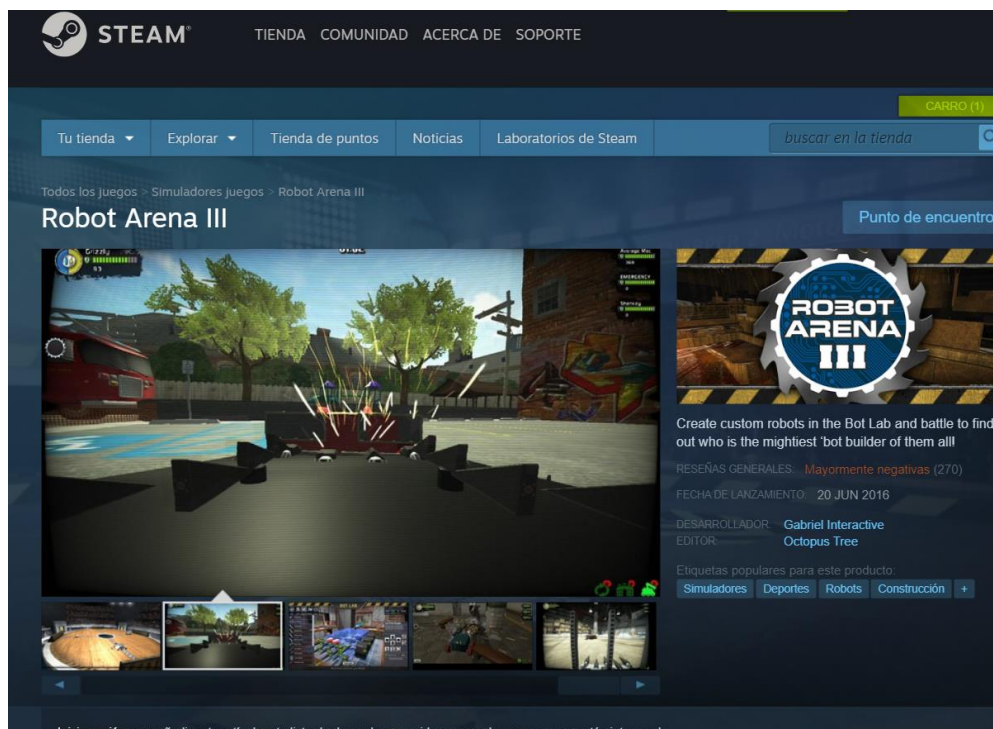
### Instalación

Para su instalación existen dos opciones: adquirir el videojuego para instalarlo directamente en el computador, o acceder a las plataformas que lo comercializan virtualmente; debido a la actualización de estas plataformas muchas veces son versiones actuales de juegos,

como STEAM ingresando a <https://store.steampowered.com>, se escribe en el buscador el nombre del software.



Se debe realizar el pago y se tendrá acceso al software.



### Requisitos mínimos del sistema

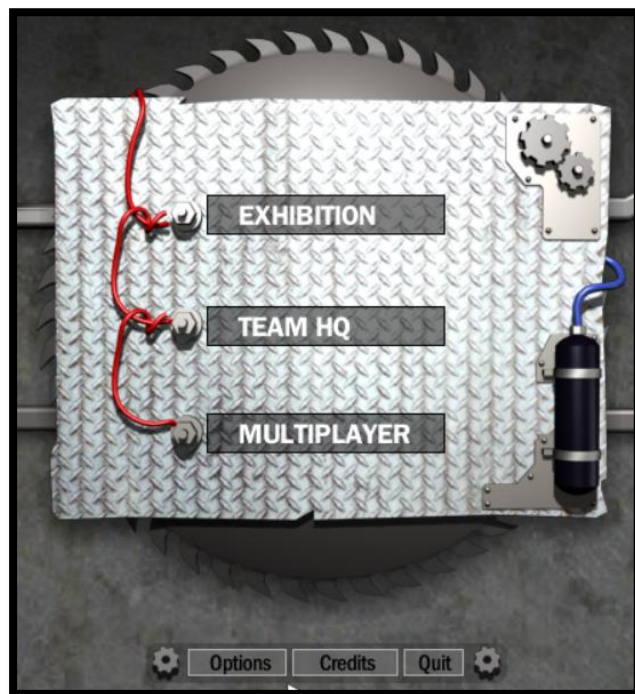
- Sistema Operativo: Windows Vista®, Windows® 7, Windows® 8, Windows® 10
- Procesador: Intel® Core™ 2 Duo, AMD Athlon™ x2 6400+
- Memoria: 4 GB de RAM

- Gráficos: nVidia® 7600 / ATI-AMD® 2600 or faster with 1GB VRAM , DirectX® 9.0c-compliant, SM 3.0-compliant
- Almacenamiento: 1 GB de espacio disponible
- Tarjeta de sonido: DirectX® 9.0c-compatible, 16-bit

### Entorno del software

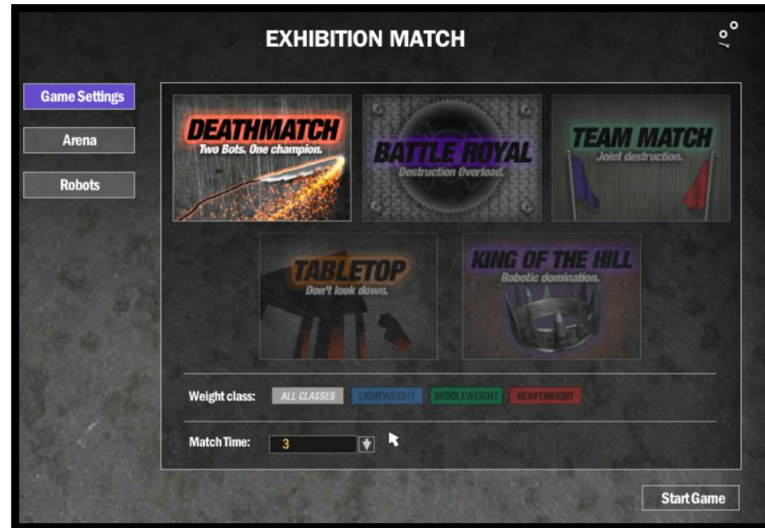
Al iniciar el videojuego el jugador tiene acceso a un menú principal (en el centro de la pantalla) con tres botones y en la parte inferior una barra de tareas.

Cuenta con tres botones: **Exhibition** (exhibición), **Team HQ** (equipos) y **Multiplayer** (multijugador); se explicará a detalle que permite cada opción.



## EXHIBITION

Esta opción permite elegir cualquiera de los robots diseñados para que compita contra cualquier robot rival del juego; en cada partida o juego el retador pone un tiempo límite, puede elegir la arena, la categoría (livianos, pesados) y colocar obstáculos en toda la arena.



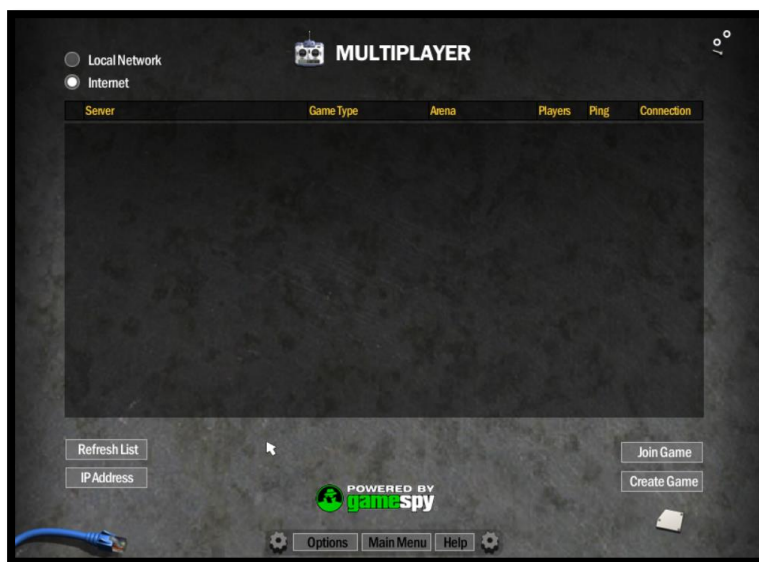
## TEAM HQ

En esta opción el jugador tiene a su disposición todos los equipos (teams) creados además le permite crear nuevos, editar algunas de sus características o eliminarlos para una competencia.



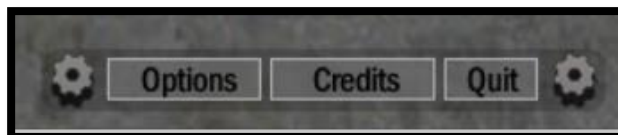
## MULTIPLAYER

Es una de las opciones más llamativas del videojuego ya que permite que el jugador compita con otros jugadores en una red local ingresando una dirección IP o encuentre jugadores en línea en los servidores GameSpy.



## BARRA DE TAREAS

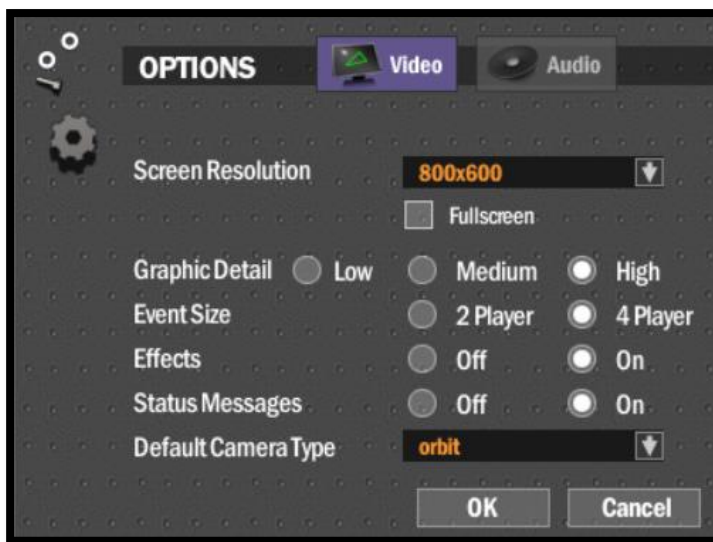
Cuenta con tres botones: **Options** (opciones), **Credits** (créditos) y **Quit** (salir); se explicará a detalle que permite cada opción.





- **OPTIONS**

Se desplegará un cuadro de diálogo con la información de configuración del audio y video para el software, el usuario puede realizar cambios o dejar los valores por defecto.



- **CREDITS**

Si se presiona se desplegará toda información sobre el programa como su versión, distribuidor, equipo de programadores, el artista detrás de los gráficos de los robots, la música que suena desde que se inicia el programa, entre otros.

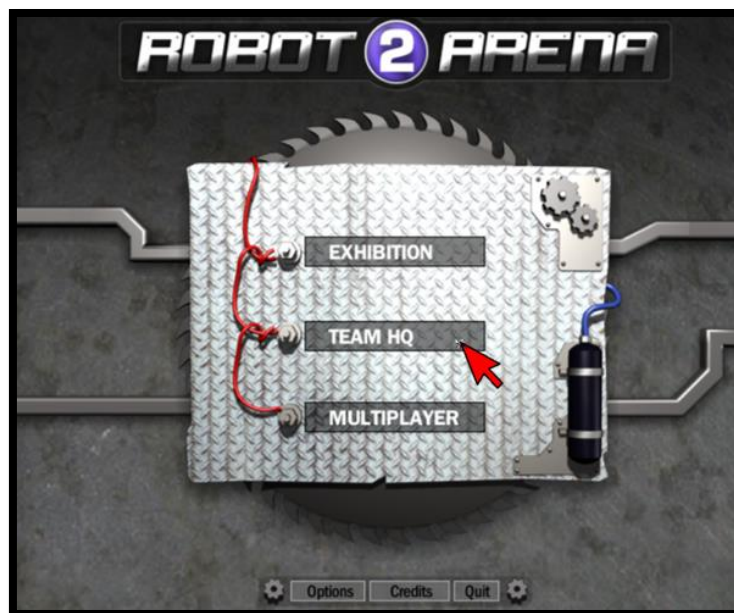


- **QUIT**

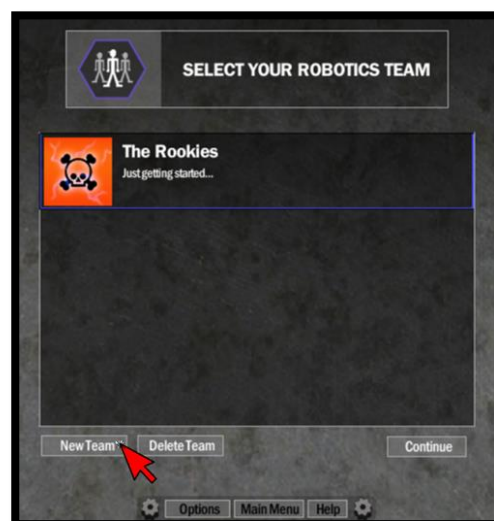
Es la opción para cerrar o salir del programa, si se desea ingresar nuevamente se deberá ejecutarlo desde el escritorio o donde el jugador lo haya instalado.

### Creación de un nuevo equipo

1. En la pantalla inicial el jugador seleccionará la opción segunda opción TEAM HQ.



2. En la siguiente pantalla vemos los grupos antes creados, se dará click en **New Team**



3. Aparecerá un nuevo cuadro de diálogo para ingresar la información del nuevo equipo; en la región Team Name se coloca el nombre del nuevo equipo, en Team Motto un lema o frase del equipo y se elige un logo entre los disponibles para dar ok.

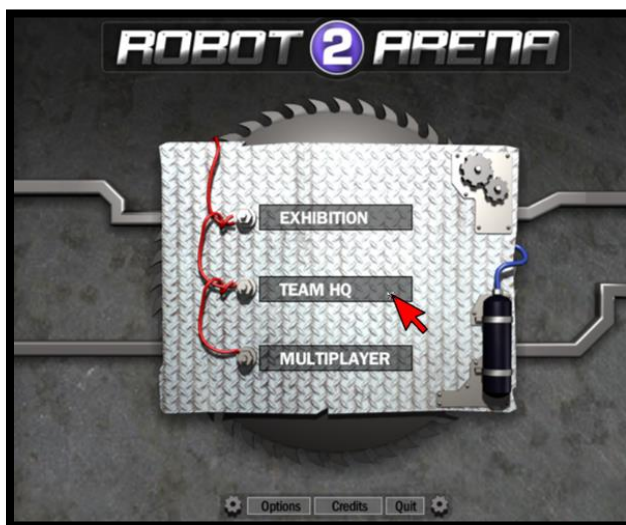


4. En la sección de equipos aparecerá el equipo creado



### Creación de nuevo robot

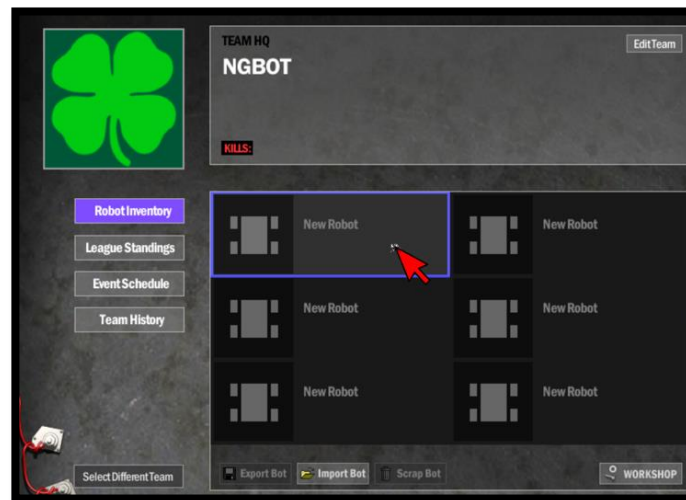
1. En la pantalla inicial se selecciona la opción TEAM HQ para elegir el equipo en el que se creará el nuevo robot.



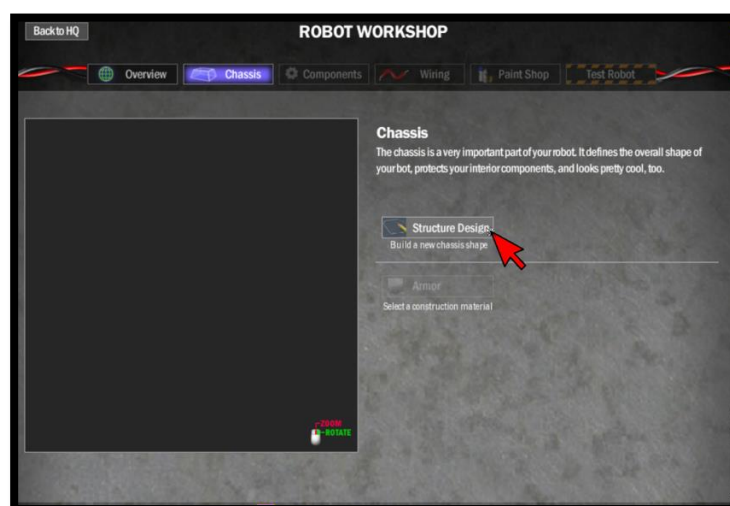
2. En la lista de equipos se elige el equipo del que será parte el nuevo robot y se hace click en continue.



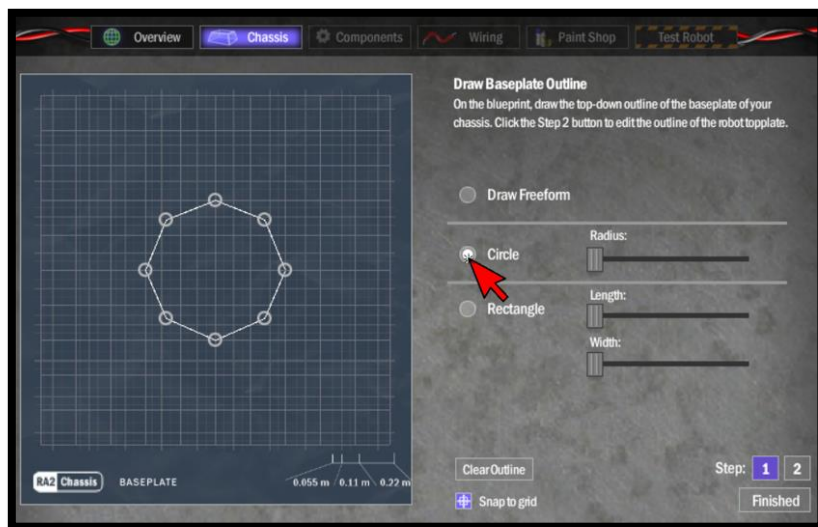
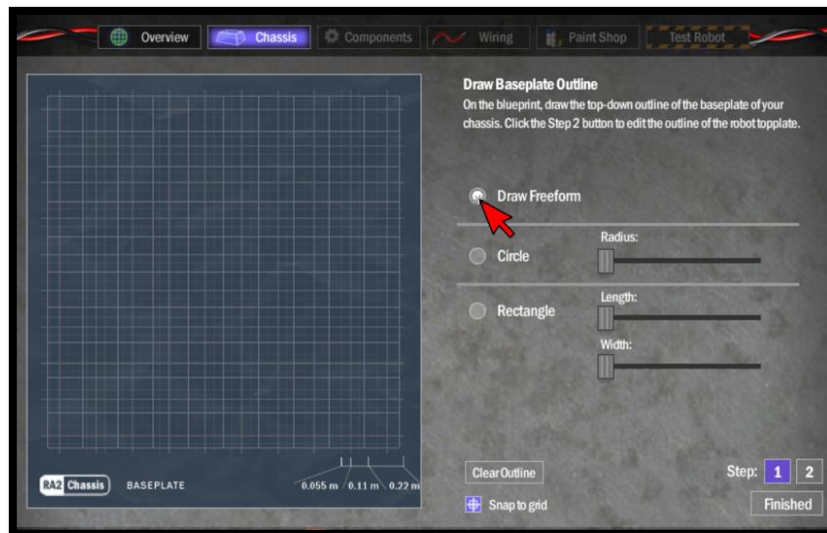
3. Aparecerá un cuadro de diálogo con los robots creados; existe espacio para 6 robots por equipo, en el caso de un equipo nuevo los espacios aparecerán en blanco, se puede elegir cualquier espacio disponible para crear el robot haciendo click en el mismo.

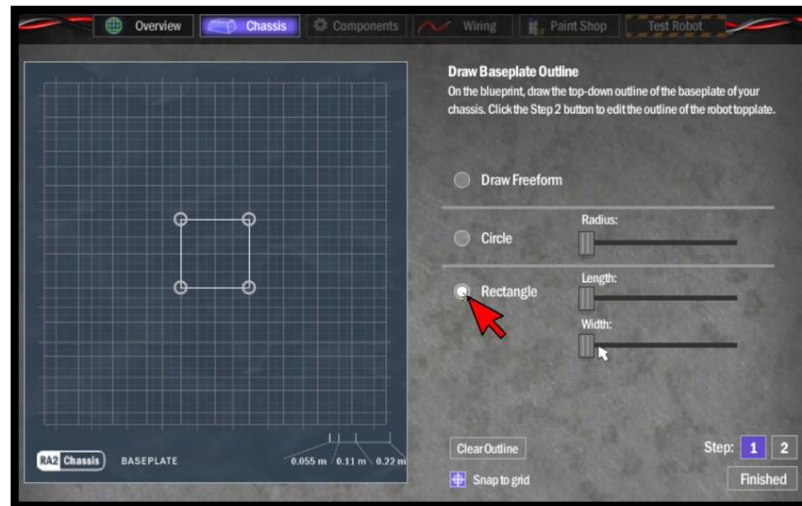


4. En el nuevo cuadro de diálogo se puede ver seis pestañas en la parte superior: chasis, componentes, alambrado o conexiones, área de pintura y probar el robot, cada una se irá habilitando cuando se complete los pasos de la anterior. La primera parte del diseño del robot será el chasis, para esto se debe dibujar su estructura o forma haciendo click en Structure Design

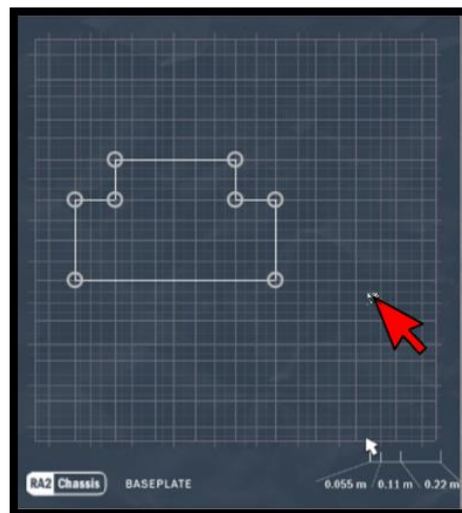


5. La creación del chasis se realiza primero en 2 dimensiones, es decir su largo y ancho; para esto se cuenta con algunas opciones: Draw Freeform (dibujo libre) en donde el jugador puede dibujarlo, Circle (circular) que desplegará una forma circular que se puede modificar en dimensiones y Rectangle (rectangular) que desplegará una forma rectangular que se puede modificar en dimensiones.

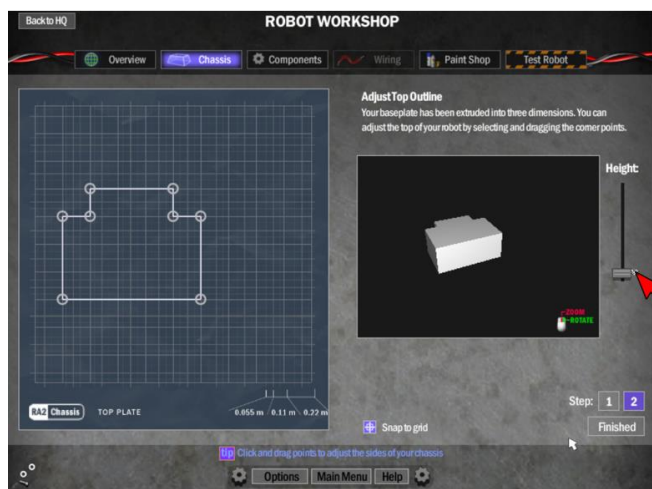
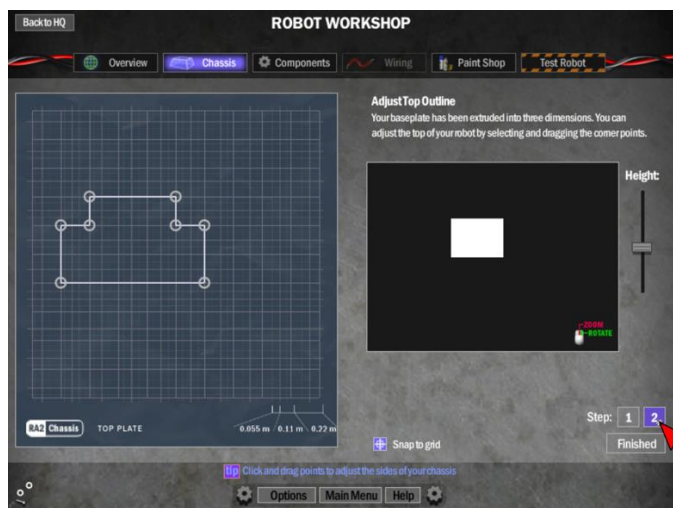




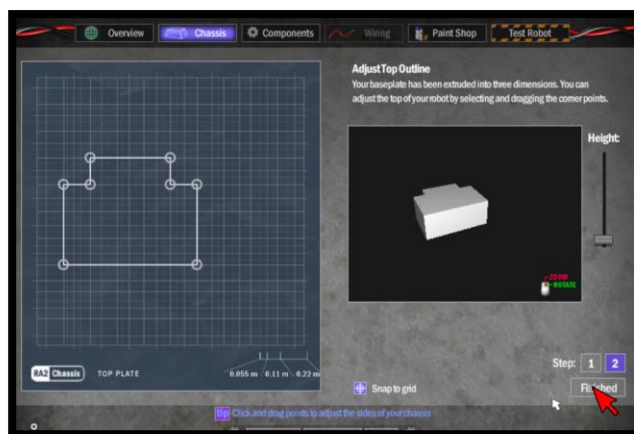
6. Dibujar el chasis a elección con las herramientas disponibles



7. Ya terminada la forma seleccionar step 2 (paso 2) que permitirá convertir el dibujo en 2D en uno 3D dándole la altura adecuada del chasis, el jugador puede ajustar la altura con la barra de desplazamiento que se encuentra en la parte derecha.

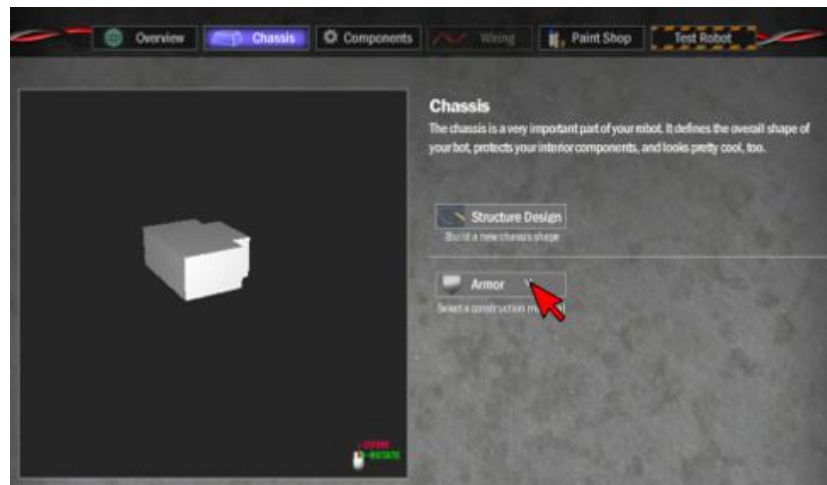


8. Cuando el jugador esté satisfecho con su diseño de chasis se debe presionar finished para finalizar y guardar.

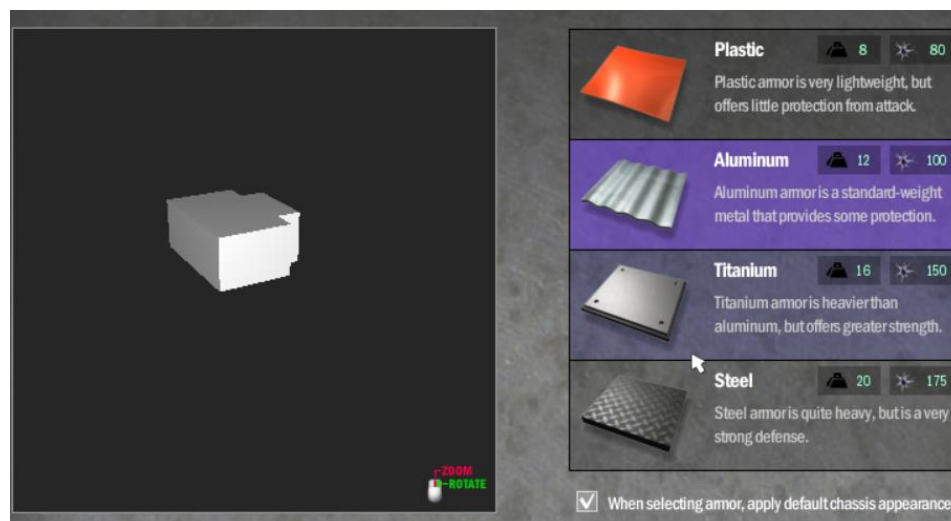




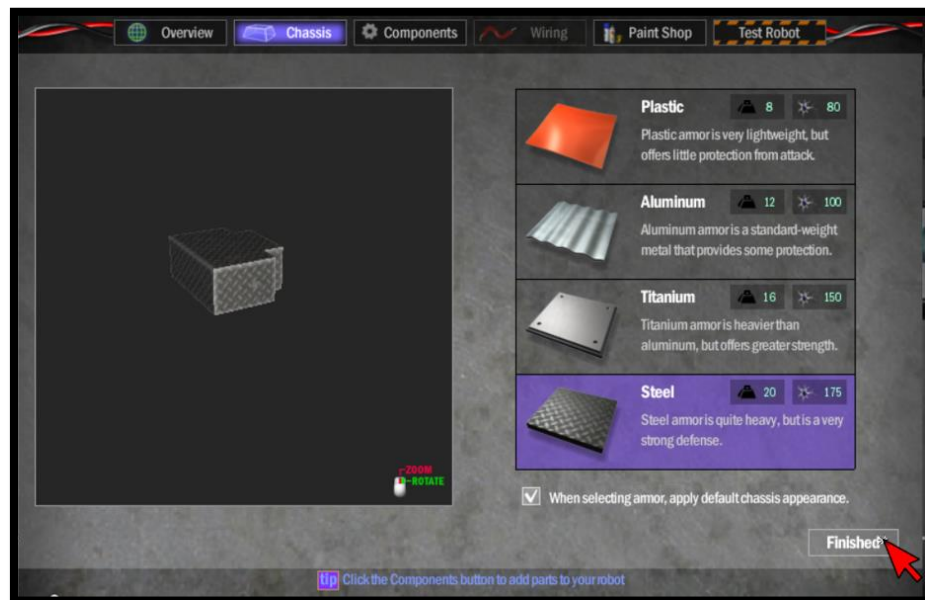
9. Se desplegará un cuadro de diálogo para terminar la construcción del chasis que permite seleccionar el material se hace click en armor.



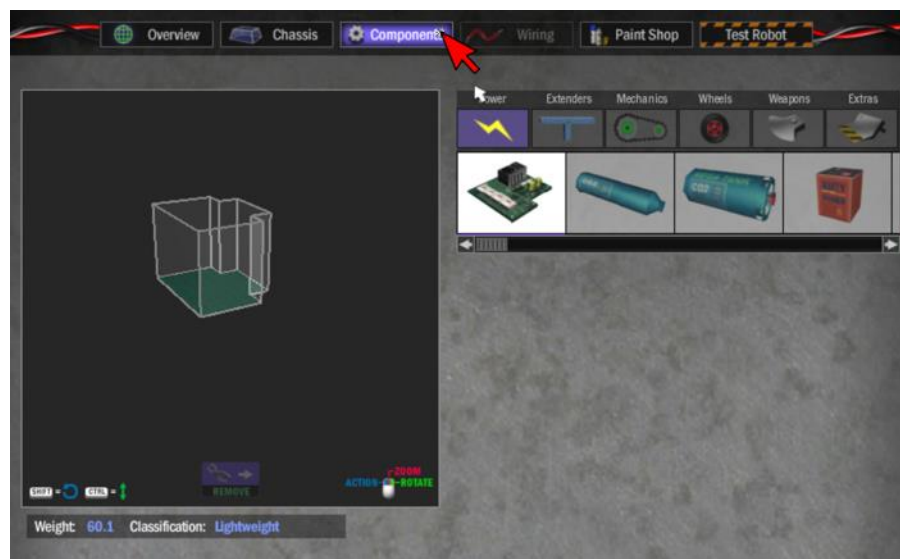
10. Para la construcción del chasis el jugador cuenta con cuatro materiales disponibles: plástico, aluminio, titanio y acero el cuadro de diálogo proporciona información de su resistencia y características; dependiendo de las necesidades del jugador debe elegir el más conveniente.



11. El jugador debe elegir el material y dar click en finished para guardar el chasis



12. Ya terminada la primera parte del robot se habilitó la tercera pestaña en la barra superior: Components, haciendo click sobre ella se observa todos los componentes disponibles para los robots, agrupados de acuerdo a sus características, diferentes tipos de motores, fuentes de alimentación, llantas y armas.



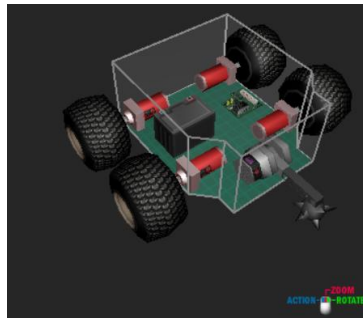
13. Haciendo click sobre cada elemento proporciona información útil para el jugador, una foto, su peso y descripción.



14. Para colocar los elementos en el chasis se hace click en la flecha debajo de la foto del elemento y se debe ubicar en el chasis; si es el lugar adecuado el componente se tornará color blanco, caso contrario tendrá un color oscuro, se debe instalar todos los elementos, incluyendo tarjeta de control, batería, motores, llantas y armas.



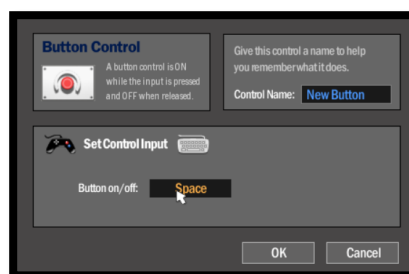
15. Una vez ubicados con éxito todos los componentes el jugador puede ver su robot completo.



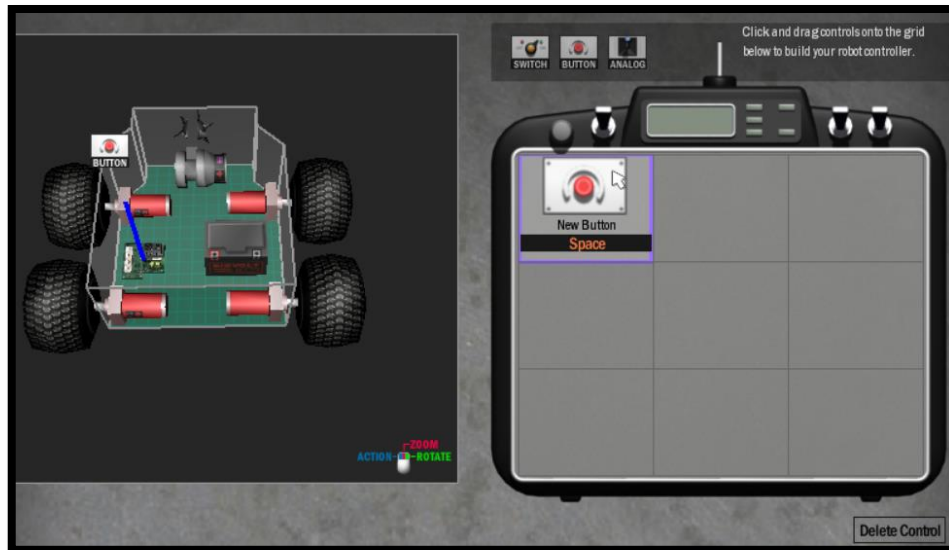
16. Ya terminada la sección de componentes se habilitará la cuarta pestaña:Wiring, o también llamado conexiones que permitirá colocar el control de los elementos. En la parte superior del control remoto existen 3 opciones: switch, botón y control analógico, para colocarlos se debe arrastrar y realizar su conexión cada uno se lo ubicará en el control remoto para su configuración.



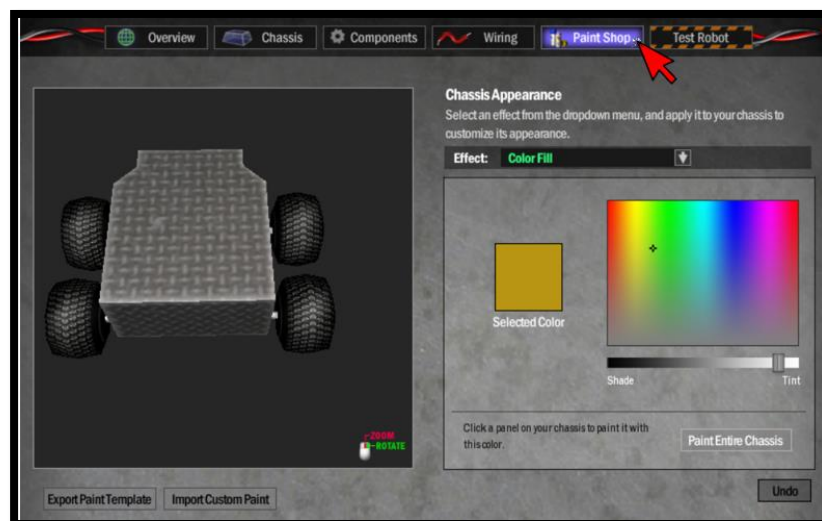
17. Haciendo doble click vemos las características de los elementos del control remoto y mediante el teclado se elige como activarse, desactivarse y su nombre.



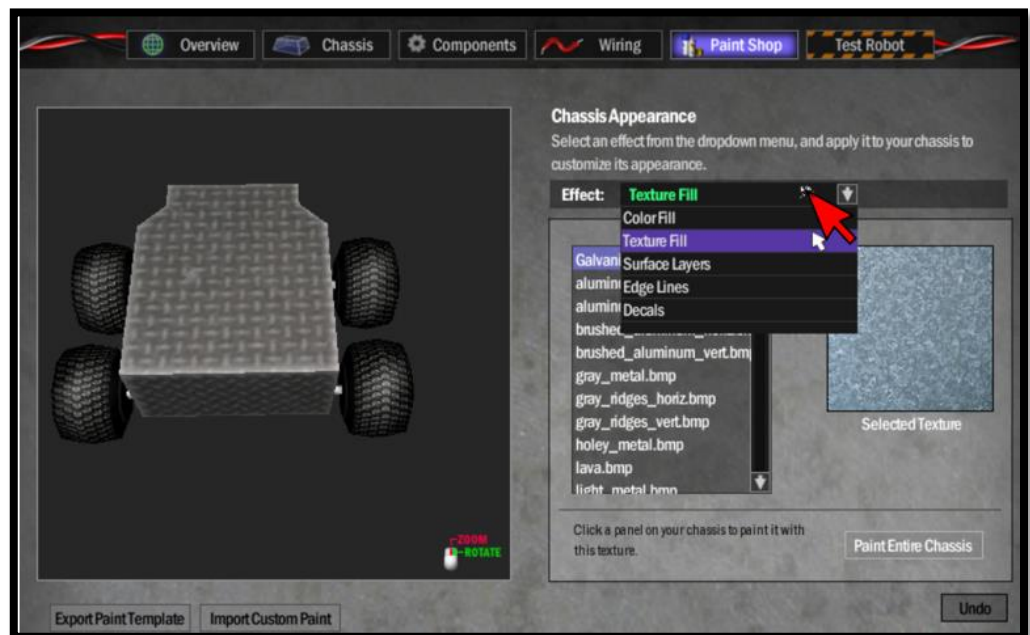
18. Luego de colocar todos los elementos se observa el control en el robot



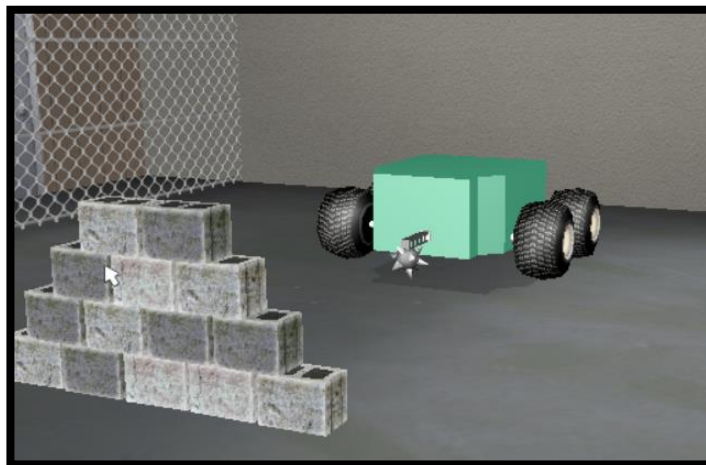
19. Ya terminada la parte de conexiones se habilitará la quinta pestaña: Paint Shop en donde el jugador puede decorar y pintar el robot, por partes o todo el robot.



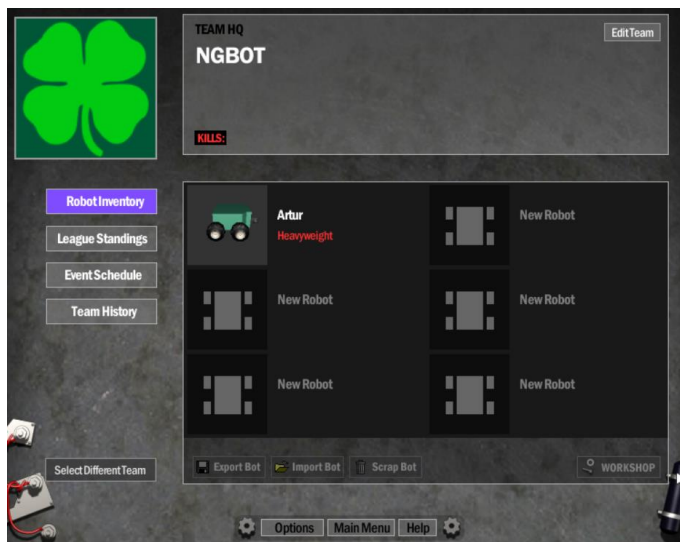
20. En la opción Effect hay algunas opciones, como texturas y decoraciones



21. Ya terminado el robot se pueden realizar pruebas haciendo click en la última pestaña, Test Robot donde podemos ver sus movimientos ante bloques, conos, o rampas para realizar cambios si es necesario antes de una competencia



22. Si se regresa al equipo se observa que todos los robots creados estarán listos para las competencias.



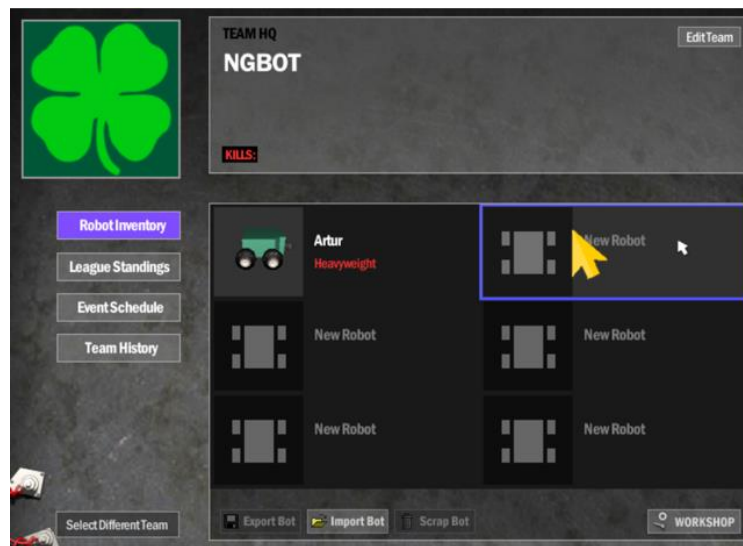
De acuerdo a la competencia se pueden crear más robots con diferentes tamaños, formas y armas.

### **Creación de robot para competir en CER 2019 categoría batalla simulada.**

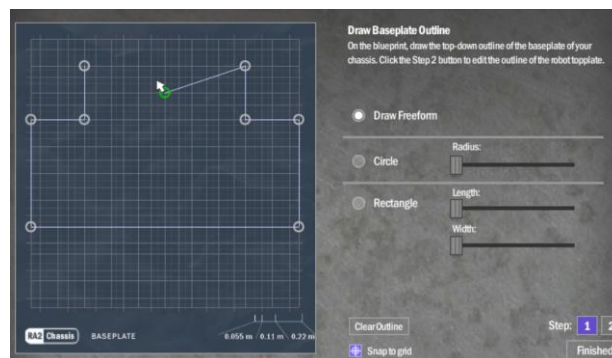
Características del robot:

- Sin límite de dimensiones
- Peso máximo de 799Kg
- La plataforma mecánica, el sistema de control y movimiento y numero de armas utilizadas serán de libre elección del participante

1. Seleccionar el equipo para el robot

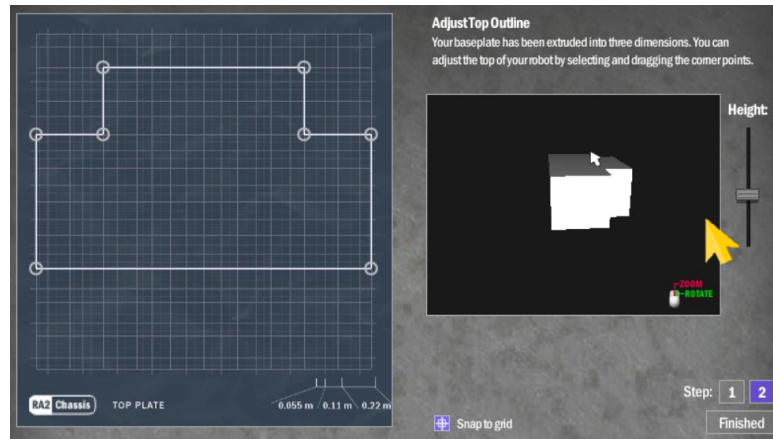


- CHASIS
- 1) Dibujar el chasis

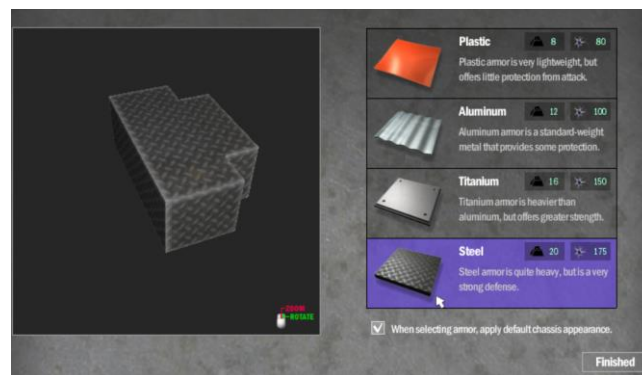




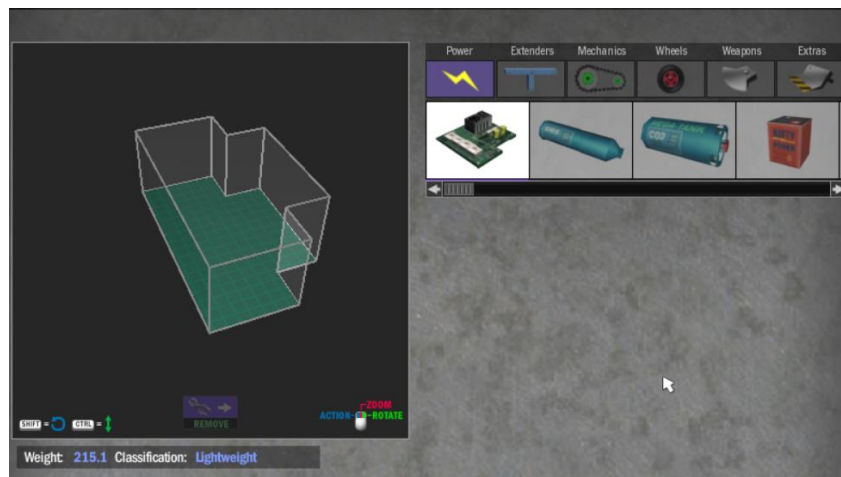
## 2) Ajustar la altura



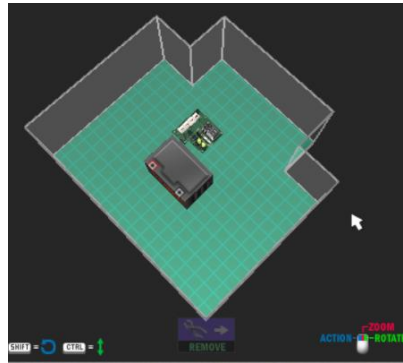
## 3) Ya que es una batalla de robots es necesario que el chasis sea de un material muy resistente como el acero.



## • COMPONENTES

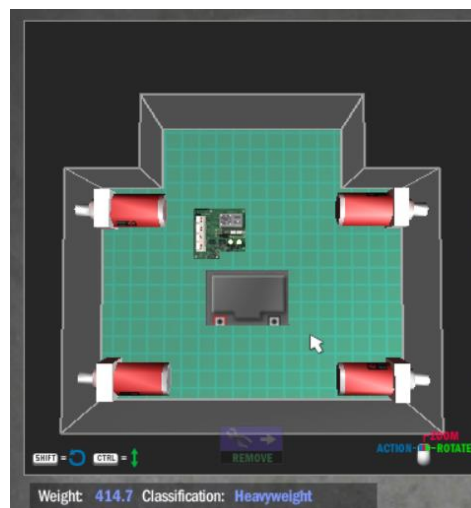


- 1) Para su alimentación se debe colocar una fuente, y para el control una tarjeta de control

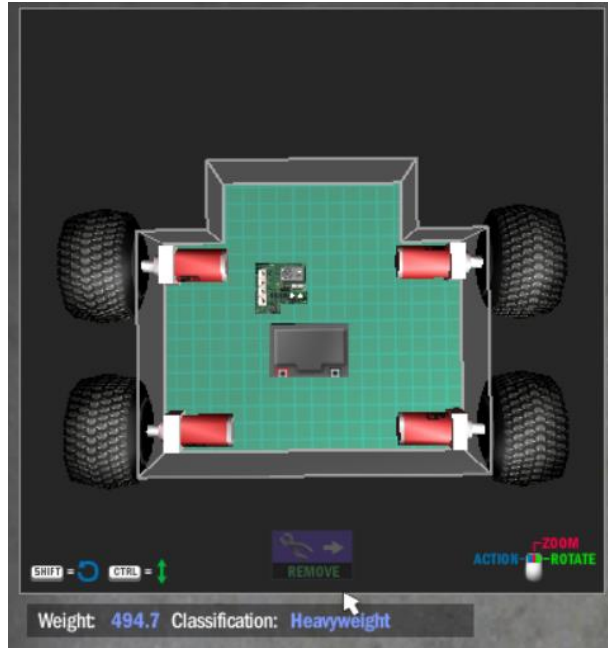


Por ahora el robot pesa 330.7 Kg por lo que lo clasifica en peso medio

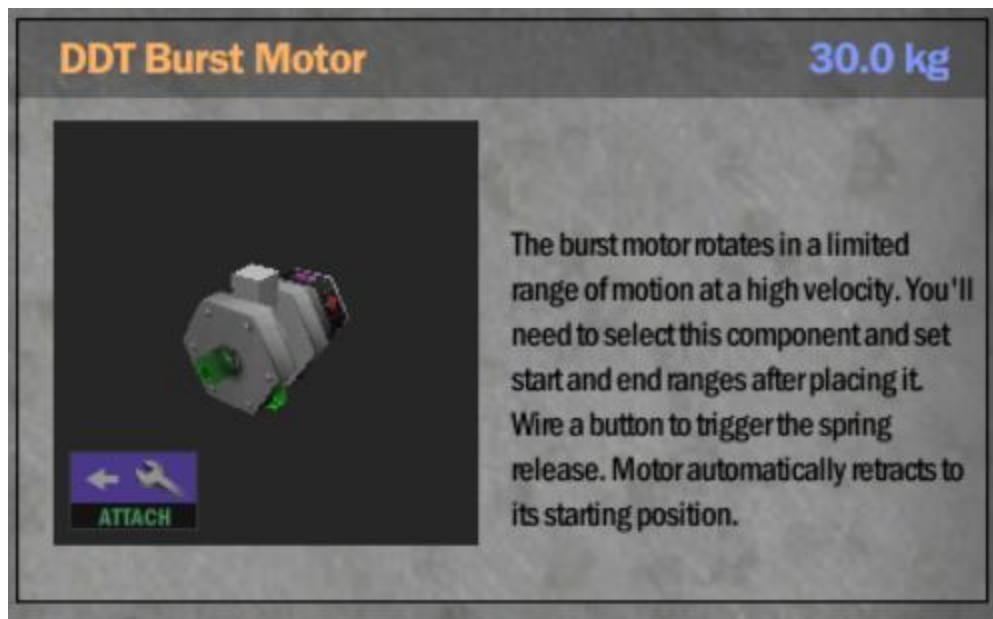
- 2) Los motores para las llantas deben permitirle girar libremente por lo que se usa un motor de giro, debido a su tamaño lo más adecuado es utilizar 4 motores lo que agregará un peso de 84 Kg



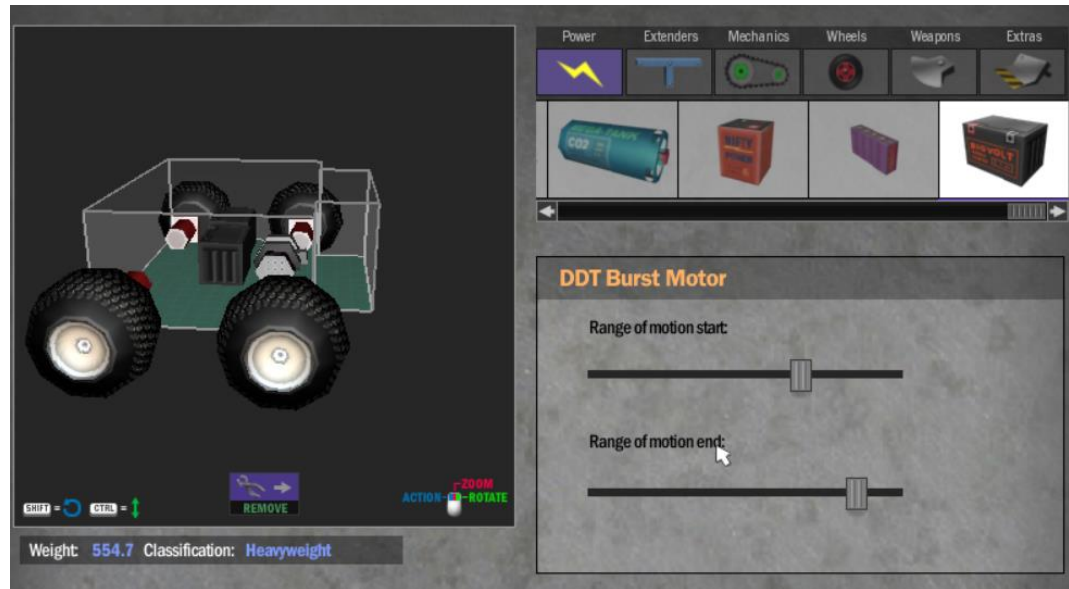
- 3) Las llantas deben ser anchas para que no pierda estabilidad fácilmente por lo que se utilizarán 4 de 20Kg



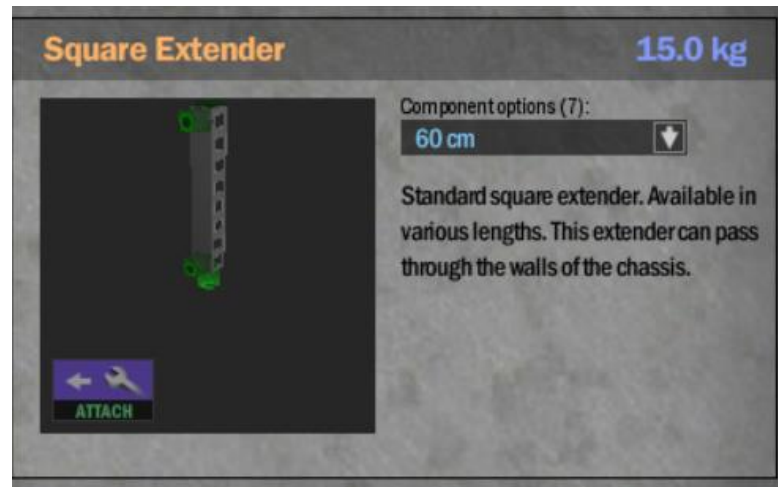
- 4) Las armas no deben ser muy pesadas pero deben ser una ventaja para una batalla, como un hacha, para esto primero se debe colocar el motor q moverá el arma, este motor debe ser con un movimiento limitado que no perjudique al movimiento

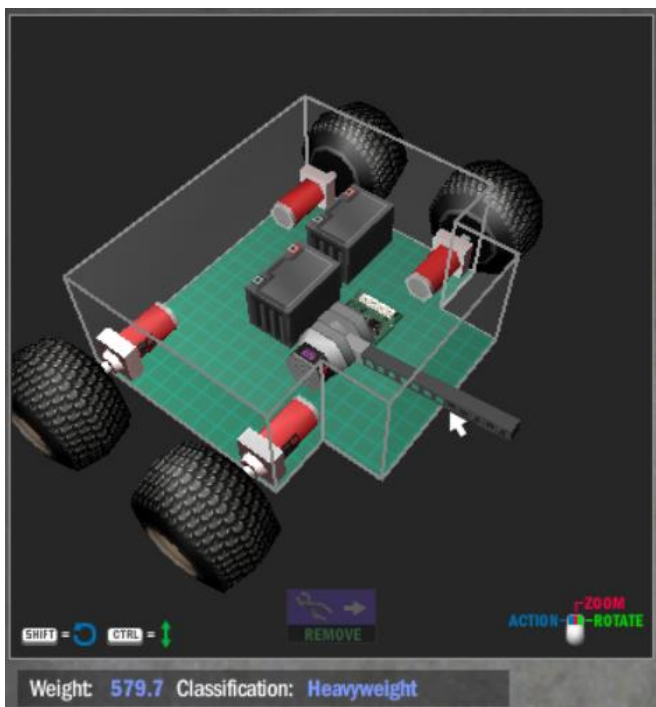


- 5) Se debe ajustar el rango de movimiento para el arma



- 6) Se requiere además un brazo extensor para que se transmita la energía del motor al arma





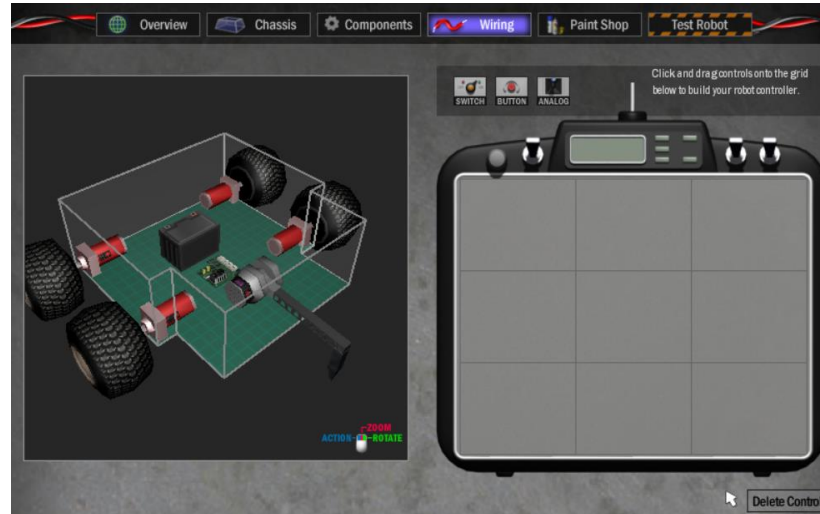
7) Finalmente se selecciona el arma, en este caso un pico



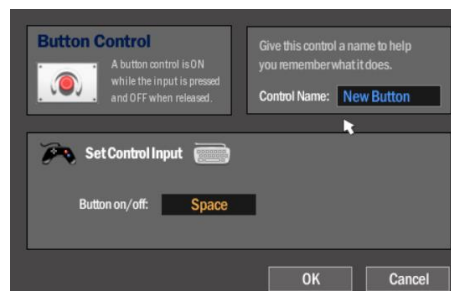
Con un peso de 589.7 Kg es un robot para categoría pesado en batalla simulada.

- CONEXIÓN

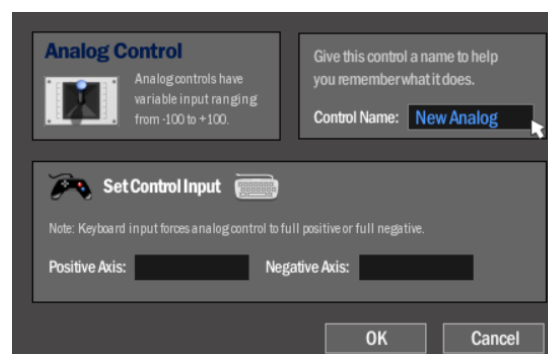
- 1) Aparece el control remoto vacío, en la parte superior se elige los controles que serán necesarios para el robot, en este caso: encendido, mover motores y ataque.



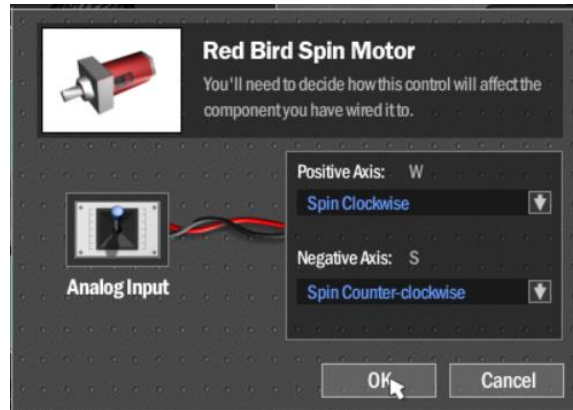
- 2) Para encendido se coloca un botón y se elige una tecla del teclado que lo active



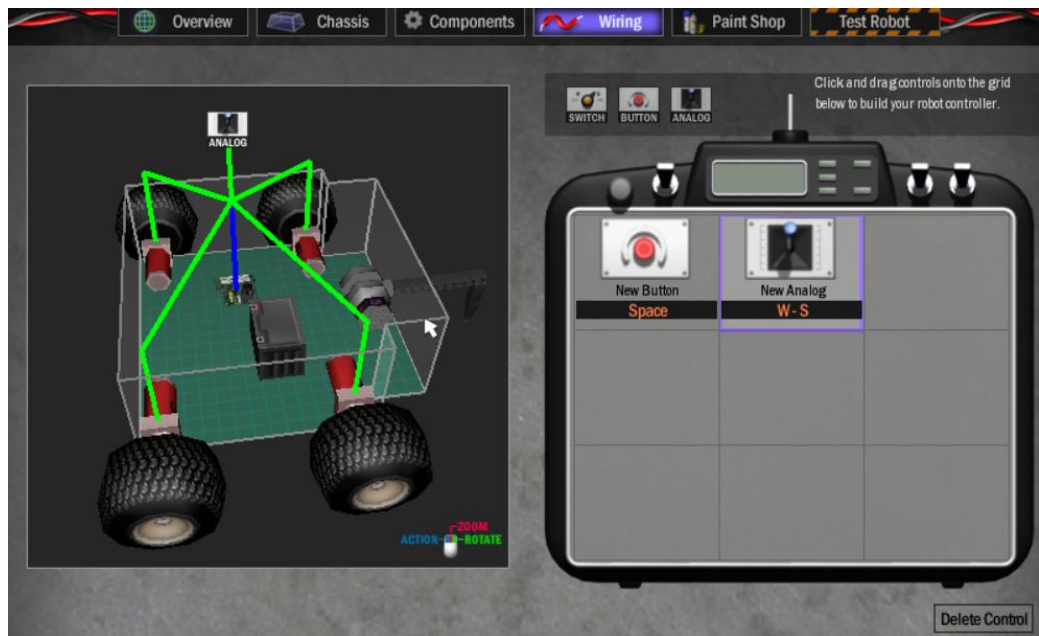
- 3) Se requiere un control análogo para el movimiento de llantas.



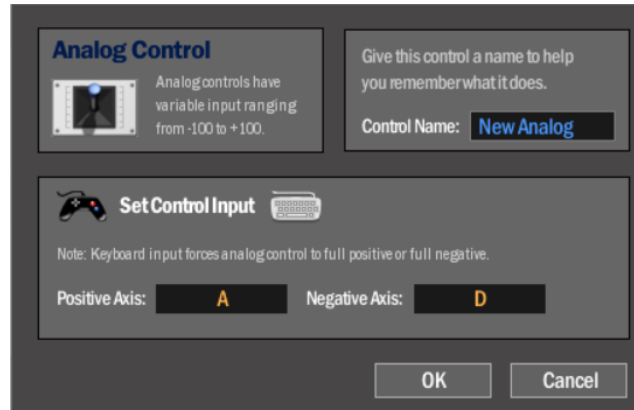
- 4) Es necesario ahora ajustar los movimientos de los motores de acuerdo a los controles análogos, con las teclas elegidas para el eje positivo y negativo



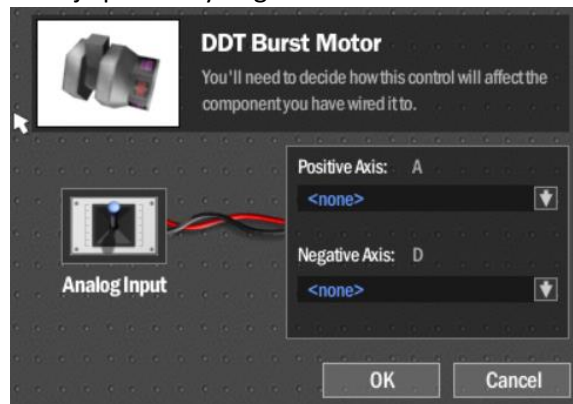
- 5) Cuando se realice la conexión con todos los motores se observa con que control se moverán los motores



- 6) Para el ataque, también se requiere un control análogo que permitirá mover el motor del pico

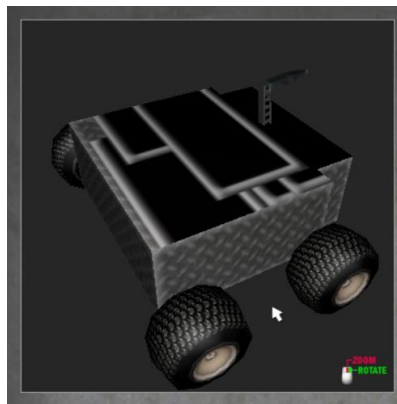


- 7) Es necesario ajustar los movimientos de los motores de acuerdo a los controles análogos, con las teclas elegidas para el eje positivo y negativo



- PINTURA

Se realizó una pintura con una plantilla





Se puede ver que el robot en un combate uno a uno tiene una buena respuesta

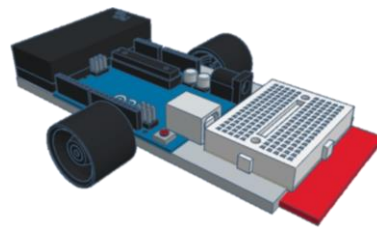


## Capítulo IV

### Pruebas

#### Pruebas y resultados robot seguidor de línea categoría destreza

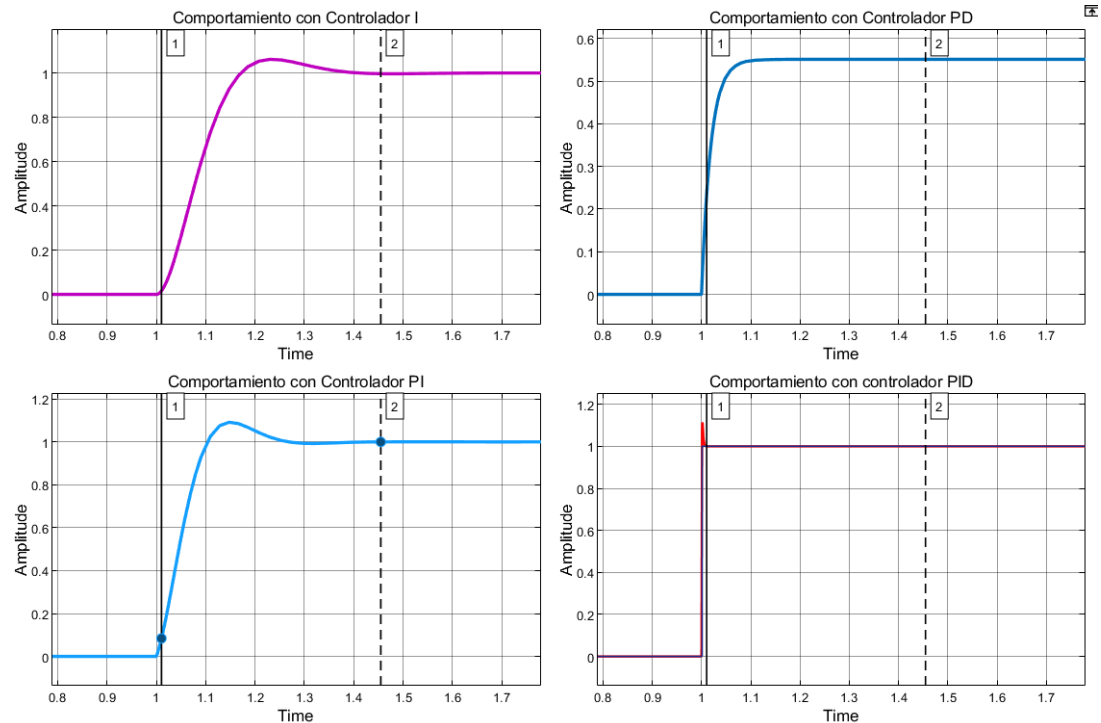
Con el fin de analizar los algoritmos de control aplicables para un robot seguidor de línea categoría destreza se realizaron simulaciones con la función de transferencia de un motor disponible para un chasis comercial.



Función de transferencia del motor DC

$$G(s) = \frac{0,0052776}{4,41x10^{-13}s^2 + 1,638x10^{-6}s + 3,87x10^{-5}}$$

Tipo de controlador	$k_p$	$k_i$	$k_d$	Función de transferencia del controlador
I	-	0,099	-	$C(s) = \frac{0,099}{s}$
PD	0,009	-	0	$C(s) = 0,099$
PI	0,0019	0,1840	-	$C(s) = \frac{0,1942s + 0,0019}{0,00978s}$
PID	0,707	349,093	0	$C(s) = \frac{0,00144s + 0,707}{0,00205s}$



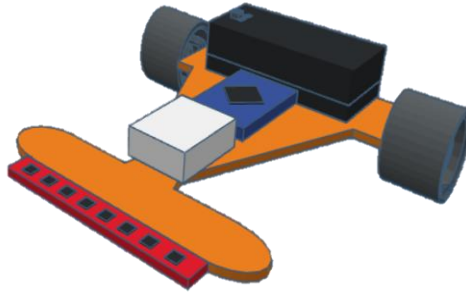
Con las pruebas de los controladores diseñados se obtuvo información indispensable en la respuesta del robot como son: tiempo de establecimiento, sobreimpulso y tiempo de asentamiento.

Controlador	I	PD	PI	PID
$t_s$	1,65	1,18	1,45	1,02
$M_p$	6,1%	0%	9,1%	11%
$t_p$	1,22 seg	1,18	1,14	1,002

De acuerdo con los diseños de los controladores y los comportamientos mostrados en la tabla lo más recomendable para este caso de estudio es implementar un controlador PI o PID, ya que con estos controladores el comportamiento del sistema converge al valor deseado en corto tiempo y cuentan con un sobre impulso aceptable. Dependerá de las características del prototipo para que sea implementado el mejor algoritmo de control.

### Pruebas y resultados: Robot seguidor de líneas categoría velocista

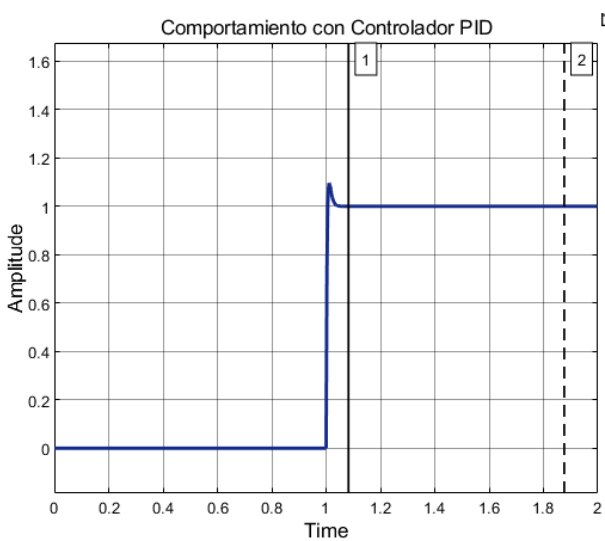
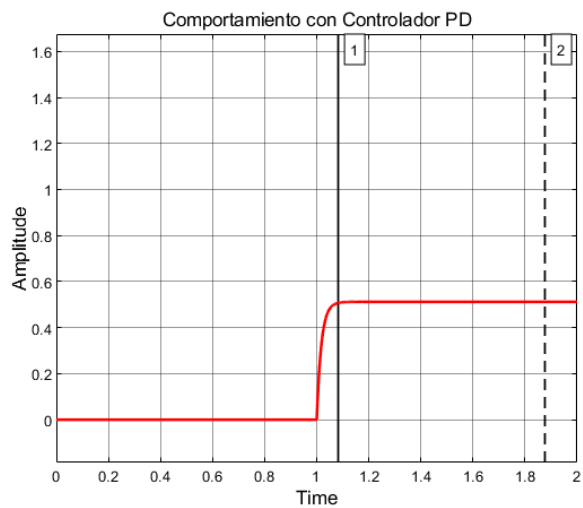
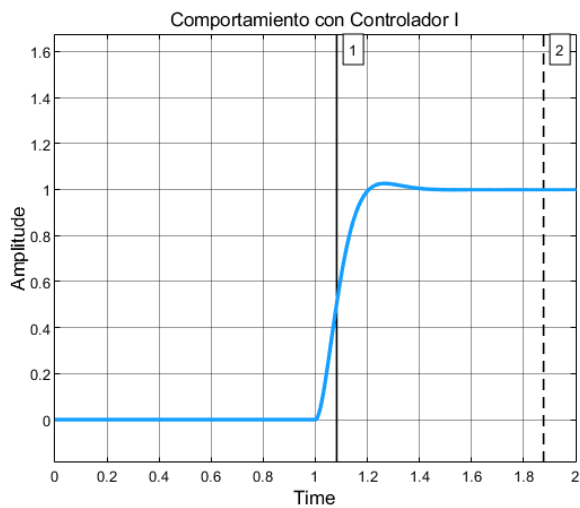
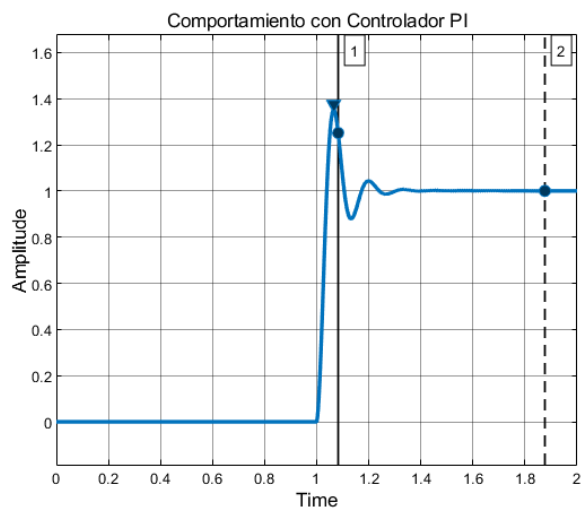
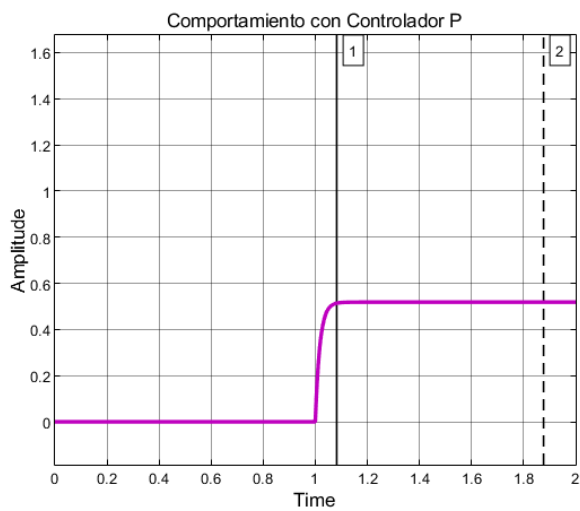
Con el fin de analizar los algoritmos de control aplicables para un robot seguidor de línea categoría velocista se realizaron simulaciones con la función de transferencia de un motor disponible para un chasis comercial.



Función de transferencia del motor DC

$$G(s) = \frac{0,009717}{3,93 \times 10^{-10} s^2 + 4,47 \times 10^{-6} s + 12,19 \times 10^{-5}}$$

Tipo de controlador	$k_p$	$k_i$	$k_d$	Función de transferencia del controlador
P	0,0135	-	-	$C(s) = 0,135$
I	-	0,1493	-	$C(s) = \frac{0,1493}{s}$
PD	0,01317	-	0	$C(s) = 0,01317$
PI	0,00427	1,1236	-	$C(s) = \frac{0,000016s + 0,0043}{0,00978s}$
PID	0,1567	16,5	-0,000078	$C(s) = \frac{2,24 * 10^{-10} s^2 + 0,000011s + 0,0065}{0,00205s}$



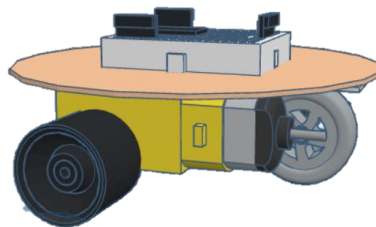
Con las pruebas de los controladores diseñados se obtuvo información indispensable en la respuesta del robot como son: tiempo de establecimiento, sobreimpulso y tiempo de asentamiento.

Controlador	P	I	PD	PI	PID
$t_s$ (seg)	1,30	1,9	1,28	1,85	1,08
$M_p$ (%)	0	2	0	35	9
$t_p$ (seg)	1,29	1,26	1,22	1,06	1,01

De acuerdo con los diseños de los controladores y los comportamientos mostrados en la tabla lo más recomendable para este caso de estudio es implementar un controlador PID, a pesar de que el controlador PI tiene un comportamiento aceptable su sobreimpulso es muy alto además de que su tiempo pico es bastante alto lo que provocaría que el prototipo se demore demasiado para leer con los sensores las líneas. El algoritmo PID converge al valor deseado en corto tiempo y cuenta con un sobre impulso aceptable.

### Pruebas y resultados: Robot resuelve laberintos

Debido al enfoque de ingeniería de concepto, básica y a detalle de este proyecto para comprobar el diseño del robot resuelve laberintos se realizó un análisis de comportamiento a nivel de software; es decir una emulación en el software Proteus.



Para realizar pruebas en el prototipo del robot resuelve laberintos se requiere emular la lectura de sensores para así comprobar los giros que realizará el robot, de acuerdo al datasheet


del controlador de los motores el control de giro del motor 1 (motor derecho) se realiza con el PIN 15 Y PIN 10, y el control de giro del motor 2 (motor izquierdo) con el PIN 7 Y PIN 2.

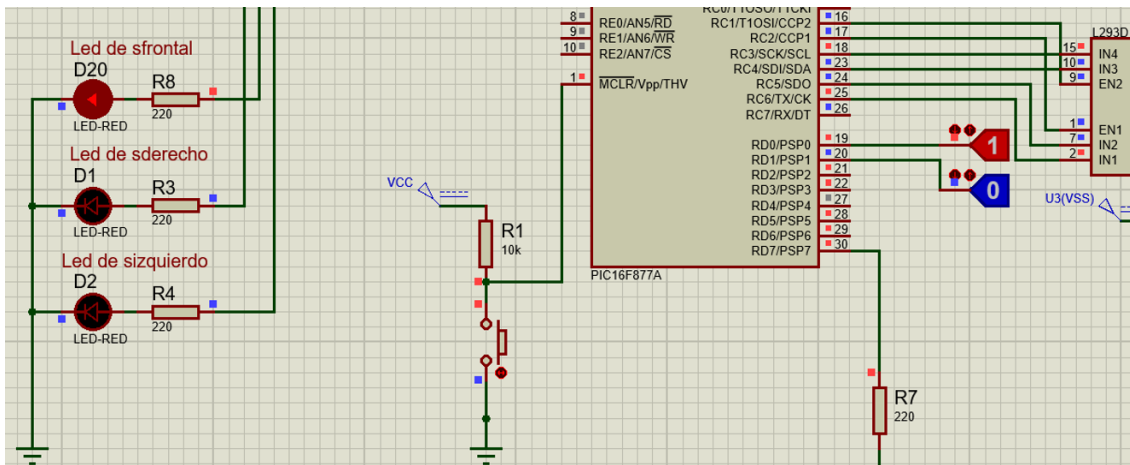
<b>Motor 1</b>	<b>PIN 15</b>	<b>PIN 10</b>
<b>Giro horario</b>	Activado	Desactivado
<b>Giro antihorario</b>	Desactivado	Activado

<b>Motor 2</b>	<b>PIN 7</b>	<b>PIN 2</b>
<b>Giro horario</b>	Activado	Desactivado
<b>Giro antihorario</b>	Desactivado	Activado

- Caso 1: sensor frontal activado


<b>Detección de pared (1 detecta 0 no detecta)</b>			<b>Ubicación en</b>
<b>Sensor frontal</b>	Sensor derecho	Sensor izquierdo	<b>laberinto</b>
<b>1</b>	0	0	

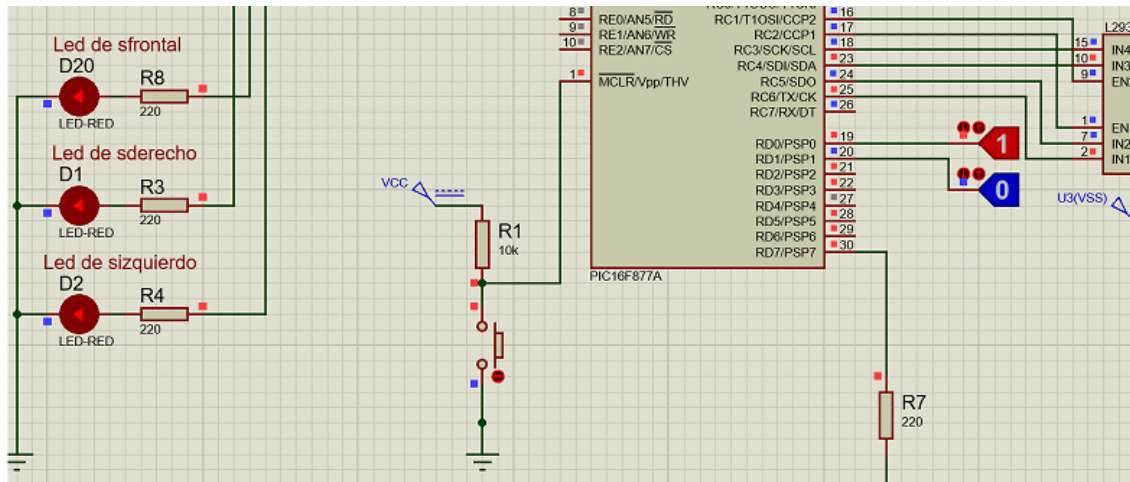


Al utilizar el algoritmo de la mano derecha se debe realizar un giro a la derecha para realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario		✓
Giro antihorario	✓	

- Caso 2: todos los sensores activados

Detección de pared (1 detecta 0 no detecta)			Ubicación en
Sensor frontal	Sensor derecho	Sensor izquierdo	laberinto
1	1	1	




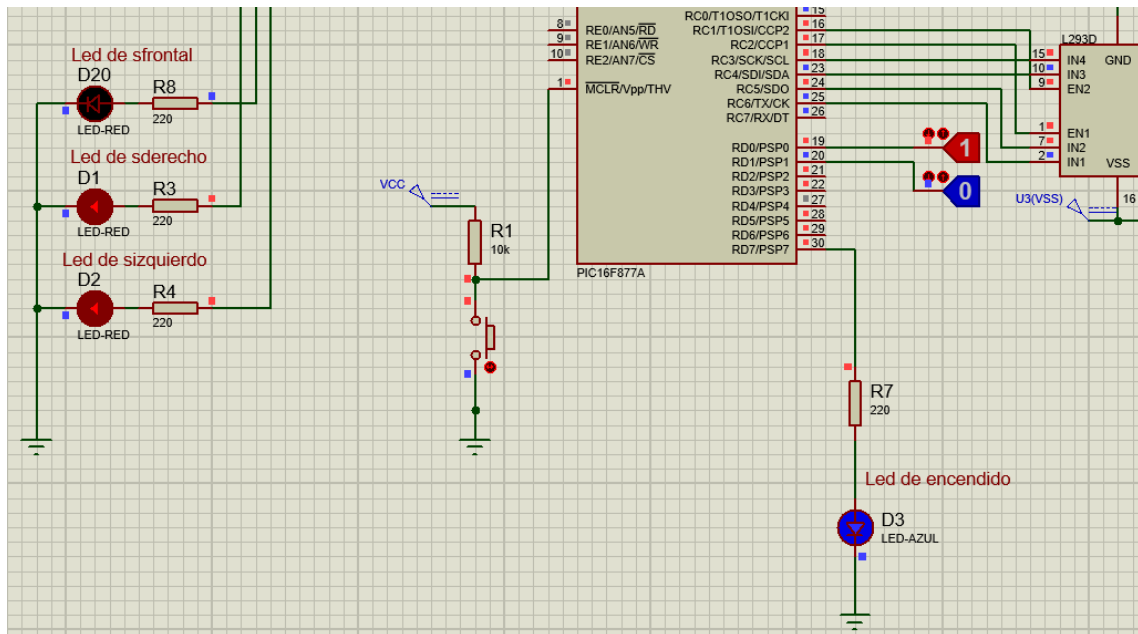
Al estar el robot encerrado deberá retroceder para realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario	✓	
Giro antihorario	✓	



- Caso 3: sensor derecho e izquierdo activado


Detección de pared (1 detecta 0 no detecta)			Ubicación en laberinto
Sensor frontal	Sensor derecho	Sensor izquierdo	
0	1	1	

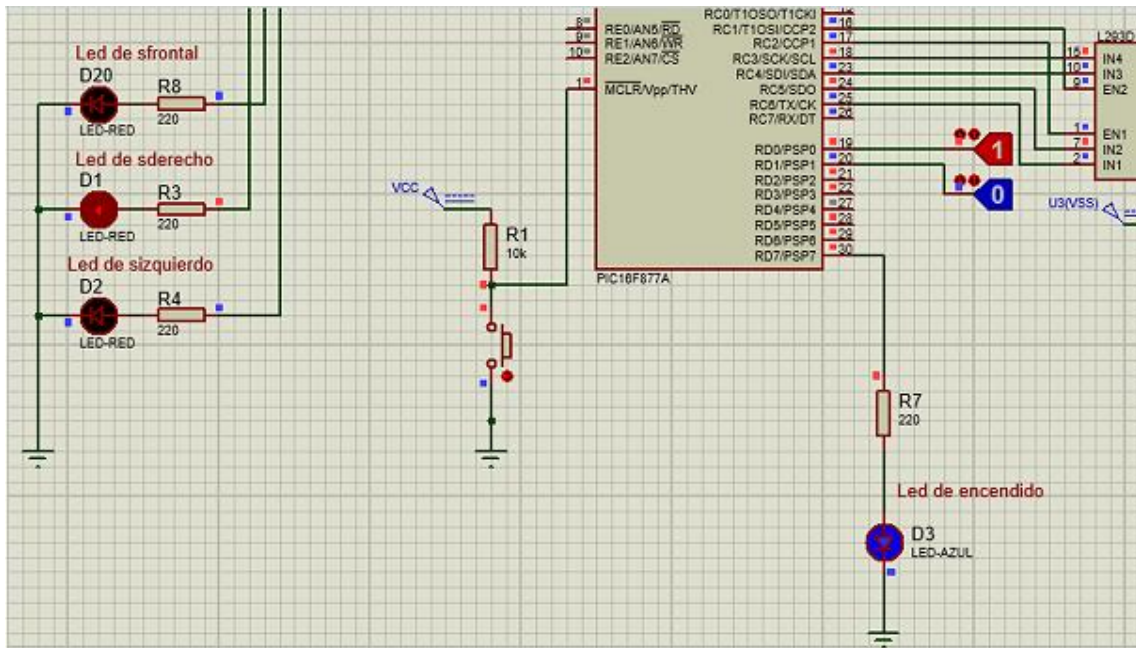


Se debe mover el prototipo hacia adelante hasta encontrar otras paredes para realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario	✓	✓
Giro antihorario		

- Caso 4: sensor derecho activado

Detección de pared (1 detecta 0 no detecta)			Ubicación en laberinto
Sensor frontal	Sensor derecho	Sensor izquierdo	
0	1	0	



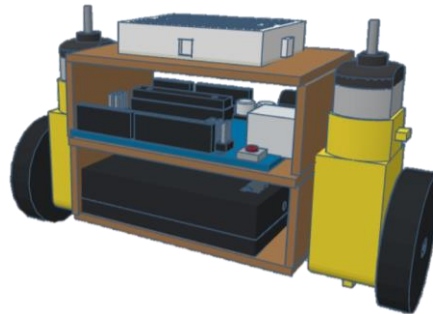
Se debe mover el prototipo hacia adelante hasta encontrar otras paredes para realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario	✓	✓
Giro antihorario		

De acuerdo a las pruebas realizadas los movimientos del robot son los adecuados en un laberinto (sin islas internas) por lo que se comprobó que el algoritmo de la mano derecha es adecuado para este tipo de categoría .

### Pruebas y resultados: Robot balancín

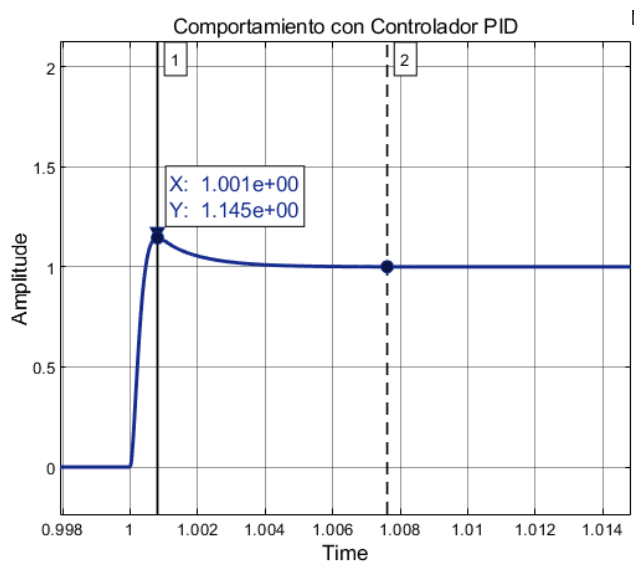
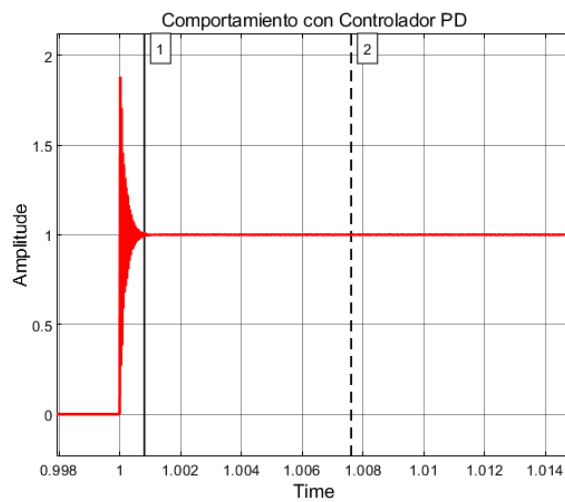
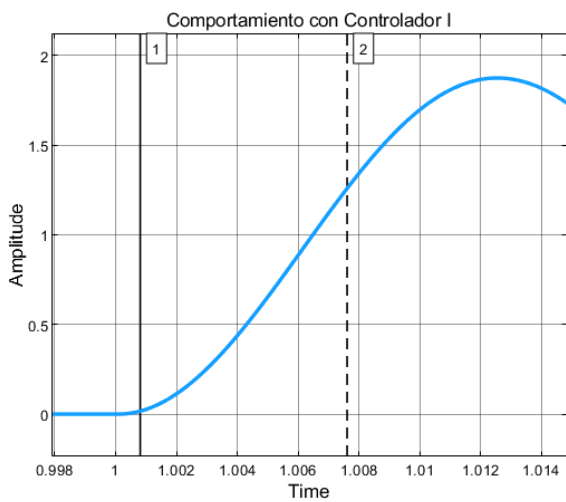
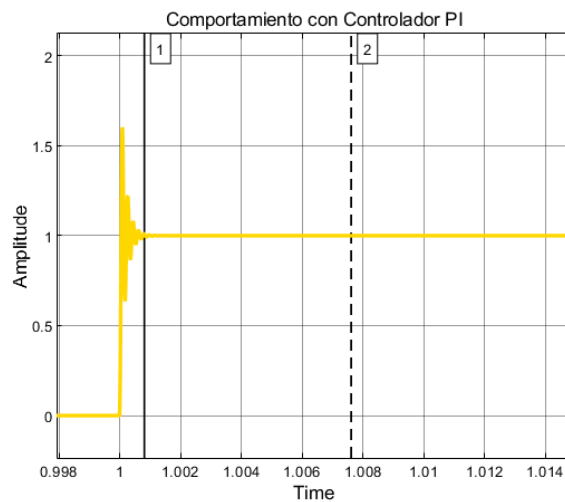
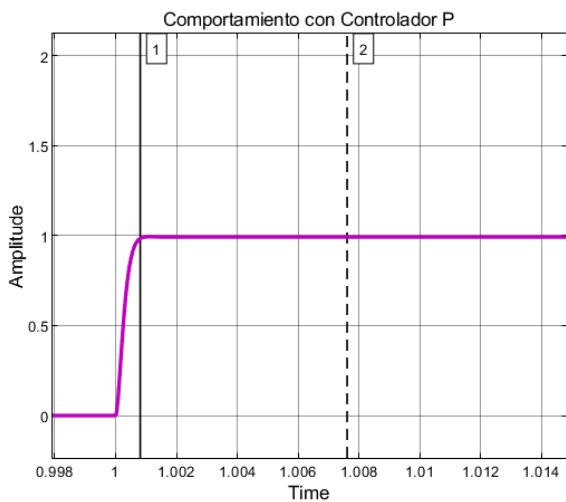
Con el fin de analizar los algoritmos de control aplicables para un robot balancín se realizaron simulaciones con la función de transferencia de un robot disponible comercialmente.



Función de transferencia del robot balancín:

$$G(s) = \frac{1}{0,15s^2 - 9,8}$$

Tipo de controlador	$k_p$	$k_i$	$k_d$	Función de transferencia del controlador
P	1,32	-	-	$C(s) = 1,32$
I	-	29,25	-	$C(s) = \frac{29,25}{s}$
PD	253,1	-	7,33	$C(s) = 253,1 + 7,33s$
PI	52,23	18,58	-	$C(s) = \frac{146,766s + 52,23}{2,81s}$
PID	1,85	1268,11	0,000063	$C(s) = \frac{0,000063s^2 + 1,85s + 1268,11}{s}$



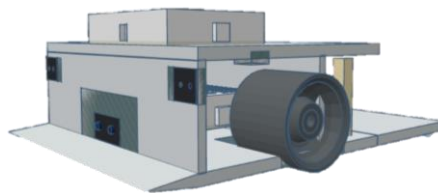
Con las pruebas de los controladores diseñados se obtuvo información indispensable en la respuesta del robot como son: tiempo de establecimiento, sobreimpulso y tiempo de asentamiento.

Controlador	P	I	PD	PI	PID
$t_s$ (seg)	1,002	1,881	1,32	1,002	1,008
$M_p$ (%)	0	87	89	60	14
$t_p$ (seg)	1,001	1,013	1	1	1,001

De acuerdo con los diseños de los controladores y los comportamientos mostrados en la tabla lo más recomendable para este caso de estudio es implementar un controlador PID ya que converge al valor deseado en corto tiempo y cuenta con un sobre impulso aceptable.

#### **Pruebas y resultados: Robot mini sumo**

Debido al enfoque de ingeniería de concepto, básica y a detalle de este proyecto para comprobar el diseño del robot mini sumo se realizó un análisis de comportamiento a nivel de software; es decir una emulación en el software Proteus.



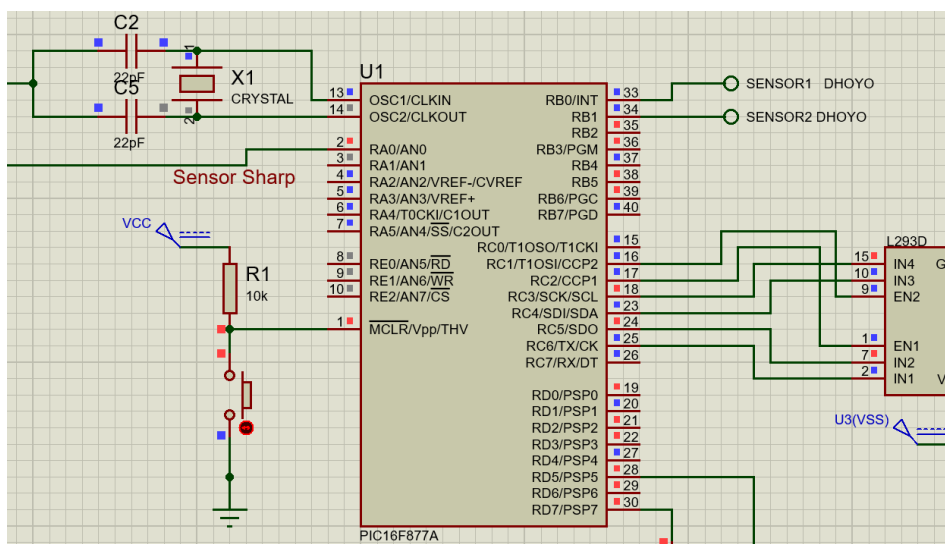
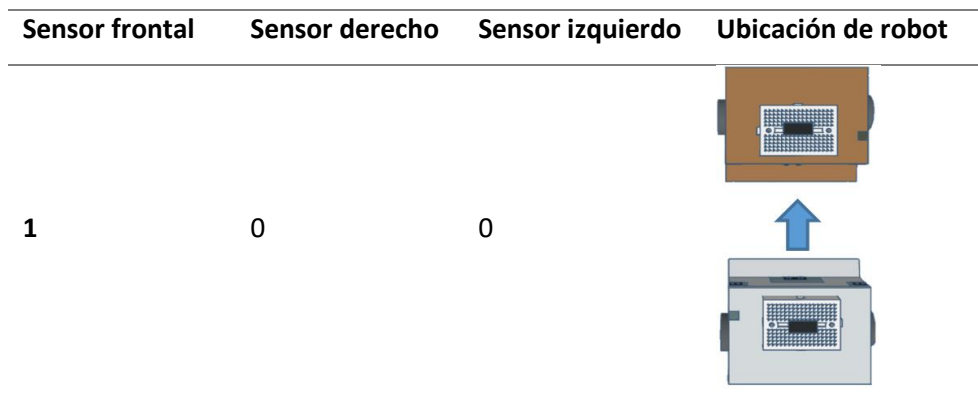
Para realizar pruebas en el prototipo del robot mini sumo se requiere emular la lectura de sensores para así comprobar los giros que realizará el robot, de acuerdo al datasheet del controlador de los motores el control de giro del motor 1 (motor derecho) se realiza con el PIN 15 Y PIN 10, y el control de giro del motor 2 (motor izquierdo) con el PIN 7 Y PIN 2.

Motor 1	PIN 15	PIN 10
Giro horario	Activado	Desactivado
Giro antihorario	Desactivado	Activado

Motor 2	PIN 7	PIN 2
Giro horario	Activado	Desactivado
Giro antihorario	Desactivado	Activado


- Caso 1: sensor frontal activado (detecta rival)

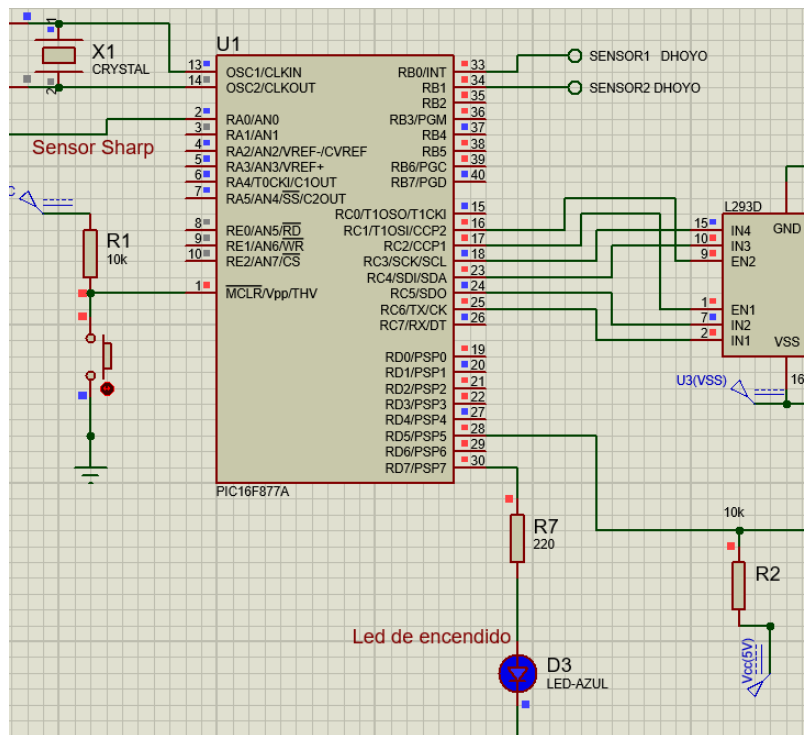


Se debe mover el prototipo hacia adelante para intentar sacar a su contrincante del dhoyo para realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario	✓	✓
Giro antihorario		

- Caso 2: sensor izquierdo y derecho activados (detecta dhoyo)

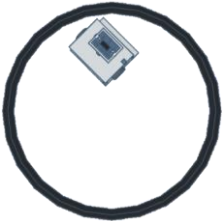
Sensor frontal	Sensor derecho	Sensor izquierdo	Ubicación de robot
0	1	1	

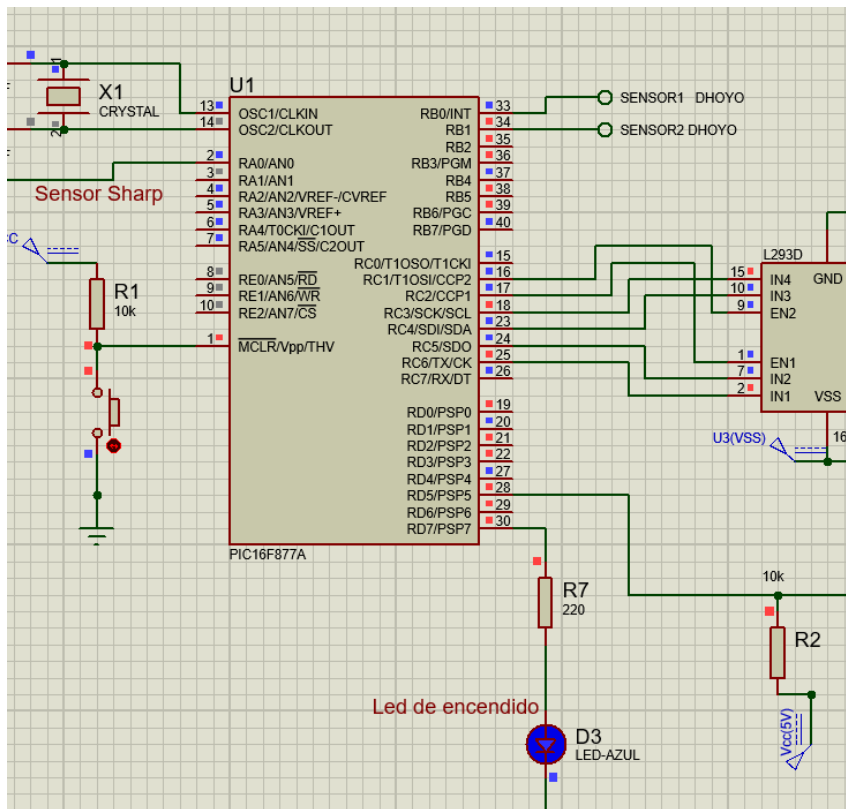


Se debe mover el prototipo hacia atrás para evitar salir del dhoyo y realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario		
Giro antihorario	✓	✓

- Caso 3: sensor izquierdo activado (detecta dhoyo)

Sensor frontal	Sensor derecho	Sensor izquierdo	Ubicación de robot
0	0	1	



Se debe girar el prototipo para evitar salir del dhoyo y realizar un sensado nuevamente.

	MOTOR DERECHO	MOTOR IZQUIERDO
Giro horario	✓	
Giro antihorario		✓



## Capítulo V

### Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

#### Conclusiones

- Se desarrolló la ingeniería de concepto básica y a detalle que permite realizar un prototipo básico de robot de competencia en categoría seguidor de línea velocista, destreza, resuelve laberintos, balancín y mini sumo.
- Se diseñó diferentes algoritmos de control para el robot seguidor de línea categoría destreza y categoría velocista cumpliendo con los objetivos de control adecuados para una competencia. Además, se comprobó su respuesta con la función de transferencia de motores usados en estos prototipos.
- Se programó un algoritmo para un robot resuelve laberintos sin memoria que cumple con los requerimientos en software y hardware para una competencia. Además, se comprobó su funcionamiento con el uso de un emulador.
- Se diseñó un algoritmo de control que cumple con objetivos de control específicos para el robot balancín. Además, se comprobó su respuesta con la función de transferencia calculada de un robot balancín.
- Se programó un algoritmo para un robot mini sumo que cumple con los requerimientos en software y hardware para una competencia. Además, se comprobó su funcionamiento con el uso de un emulador.
- Se realizó una guía metodológica de un software para batallas simuladas que permite al jugador comprender el funcionamiento de robots de competencia, elementos necesarios y su estructura básica.

### **Recomendaciones**

- Es recomendable verificar el funcionamiento y disponibilidad en el país de los elementos eléctricos y electrónicos antes de la implementación de prototipos robóticos.
- Se recomienda verificar conexiones y comunicación entre elementos antes de iniciar pruebas de los prototipos.
- Se recomienda utilizar un chasis resistente y adecuado para cada prototipo que permita un fácil acceso a los elementos electrónicos y al controlador para realizar cambios si es necesario.
- No se recomienda realizar pruebas con prototipos comerciales sin antes leer un instructivo o conocer su correcto funcionamiento.

### **Trabajos Futuros**

Al existir diversas categorías en competencias de robótica se pueden realizar varias modificaciones estructurales o en programación a los diseños presentados de acuerdo a las necesidades y objetivos de cada prototipo.

Para la categoría resuelve laberintos o mini sumo se pueden implementar técnicas de control más robustas que permitan respuestas más rápidas en competencias; además se pueden utilizar sensores de alta gama que permitan lecturas más exactas.

Muchos de los programas utilizados en batallas simuladas permiten que los jugadores entiendan de manera clara el funcionamiento de robots por lo que podría ser una herramienta adecuada enfocada en la ingeniería educativa para entidades educativas.

### Fuentes Bibliográficas

- Aliaga, I., & Carhuaricra, J. (2018). Programa de robótica educativa para mejorar el aprendizaje significativo en estudiantes del cuarto grado del área de Ciencia y Ambiente de la institución educativa San Roque. *Educa*(11), 147-16.
- Amazon. (s.f.). Recuperado el 2 de 12 de 2020, de <https://www.amazon.com/-/es/dp/B00007M5CW>
- Aragona, R. (2000). *Le vertigini del labirinto*. Italia: Edizioni scientifiche italiane.
- Asociación Mexicana de Mecatrónica. (s.f.). Recuperado el 21 de 11 de 2020, de <http://www.mecamex.net/congreso/Competencias/Minisumo.pdf>
- Azcon, A. (2003). *Análisis y diseño del control de posición de un robot móvil con tracción diferencial*. España: Memoria de la Universidad Rovira I Virgili.
- Barrientos Sotelo, V. R., García Sánchez, J. R., & Silva Ortigoza, R. (2007). Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. *Polibits*(35), 12/17.
- Beltrán Alonso, J. L. (2010). *Simulación de un péndulo invertido*. Valencia.
- Berenguel Soria, M., Rodríguez Díaz, F., Moreno Úbeda, J. C., Guzmán Sánchez, J. L., & González Sánchez, R. (2012). La robótica como materia integradora en los estudios universitarios de informática. La experiencia de la Universidad de Almería. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 13(3), 220-239.
- Bernal Hernández, P. (2017). *Aportes de los concursos de robótica al aprendizaje de la tecnología en estudiantes pertenecientes a grupos de robótica estudio de caso*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Borja Conde, J. (2018). *Desarrollo de un robot autoequilibrado basado en Arduino con motores paso a paso*. Sevilla.

- Brengi, D., Mariño, N., & Huy, C. (2010). Competencia de sumo robot para la enseñanza de electrónica y robótica práctica. Buenos Aires.
- Caiza, V. (2016). *Implementación de dos robots autónomos y uno controlado mediante tecnología Bluetooth para las categorías seguidor de línea con obstáculos, laberinto y balancín*. Guayaquil.
- Carrillo Romero, M. (2007). Sistema de control y arquitectura de un robot seguidor de línea. *Cultura Científica y Tecnológica*(59), 115-128.
- FAULHABER. (s.f.). *FAULHABER*. Recuperado el 20 de 02 de 2021, de [https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN\\_1741\\_CXR\\_DFF.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_1741_CXR_DFF.pdf)
- García, Y., & Reyes, D. (2012). Robótica educativa y su potencial mediador en el desarrollo de las competencias asociadas a la alfabetización científica. *Revista Educación y Tecnología*(2), 42-55.
- Gil Vázquez, P., Jara, C., Puente Méndez, S., Candelas, F., & Torres, F. (2012). Recursos y herramientas didácticas para el aprendizaje de la robótica. *Revista Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 13(2), 18-47.
- Gómez, O., & Gómez, U. (2017). Simulación Cinemática de un Robot Seguidor de Línea para el Desarrollo del Videojuego de Programación Rusty Roads en el Framework Unity. *Información Tecnológica*, 28(5), 55-64.
- Gonzalez, R., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2015). Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(1), 3-12.
- Guasmayan, F., & Gonzalez, N. (2019). Estado del arte de redes educativas para el intercambio de conocimientos en robótica educativa. *Ingeniería E Innovación*, 7(2), 5-7.

- Katrib, M., Paneque, L., Leonard, L., Piad, A., Sánchez, L., & Tamayo, A. (2017). *Empiece a programar un enfoque multiparadigma con C#*. Independently Published.
- Knuth, D. (2002). *El arte de programar ordenadores. Volumen I. Algoritmos fundamentales*. España: Reverté.
- Korte, B., & Vygen, J. (2011). *Ottimizzazione Combinatoria: Teoria e Algoritmi*. Italia: Springer-Verlag.
- Lau, N., & Pereira, A. (1996). Ciber-Rato: Um ambiente de simulação de robots móveis e autónomos. *DETUA*, 1(6), 5-8.
- Mendoza, L., Alarcón, H., & Monroy, L. (2020). La robótica como recurso educativo para desarrollar las competencias del alumnado en el siglo XXI. *UNO Sapiens Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 1*, 3(5), 5-11.
- Mideros Mora, A., & Carvajal Aquirre, M. (22 de Septiembre de 2017). *Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://www.planificacion.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo-2017-2021-toda-una-vida/>
- Mieles Medina, J. R. (2020). *Diseño de algoritmos de control PID utilizando microcontroladores ATMEL para su implementación en robots minisumo*. Guayaquil.
- Moreno, I., Muñoz, L., Serracín, J. R., & Quintero, J. (2012). La robótica educativa, una herramienta para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias y las tecnologías. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 13(2), 74-90.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona: AlfaOmega.

- Portales Rioseco, A. C., García Olmos, V. F., Luna Domínguez, E., Rivero Guzmán, M. E., Valdivieso Méndez, N., & Vera Bravo, A. (2015). Robline: Robot seguidor de línea. *XXIII Concurso universitario Feria de las ciencias, la tecnología y la innovación*. México .
- Posrtescap. (s.f.). *Posrtescap*. Recuperado el 22 de 02 de 2021, de <https://www.portescap.com/en/products/brush-dc-motors/all-dc-motors>
- Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica. Control de robots manipuladores*. México: Alfaomega.
- Ribeiro, P. (1996). YAM (Yet Another Mouse) – Um Robot Virtual com Planeamento de Caminho a Longo Prazo . *DETUA*, 1(6), 1-3.
- ROBOMATRIX, C. o. (s.f.). *Robomatrix*. Recuperado el 20 de 11 de 2020, de <http://robomatrix.org>
- ROBOUAQ, C. (s.f.). Recuperado el 20 de 11 de 2020, de <https://coniinuaq.wordpress.com/robouaq/>
- Rodríguez, M., Sandobalin, S., Pozo, D., Morales, L., Rosero, J., & Rosales, A. (2014). Mapeo de Laberintos y Búsqueda de Rutas Cortas Mediante Tres Mini Robots Cooperativos. *REVISTA EPN*, 34(1), 1-6.
- RUNIBOT, C. (2019). *rUNIBOT*. Recuperado el 20 de 11 de 2020, de <https://www.runibot.com/reglamento>
- Sedgewick, R. (1992). *Algoritmos en C++*. Massachusetts: Addison Wesley .
- Silva Ortigoza, R., García Sánchez, J. R., Barrientos Sotelo, V. R., Molina Vilchis, M. A., Hernández Guzmán, V. M., & Silva Ortigoza, G. (2007). Una panorámica de los robots móviles. *Télématique*, 6(3), 1-14.

- Świącki, M., Szymelewicz, J., Matusiewicz, J., & Grądzki, R. (2020). Tests of Selected Sensors Applicable in Autonomous Mini Sumo Robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(8), 1145-1151.
- Tapeiro Santa, Y. D. (2019). *Diseño e implementación de un robot seguidor de línea de competencia para la categoría velocista*. Ibagué: Facultad de Ingeniería Electrónica.
- Torres Cueva, A. (2019). *Implementación de un robot resuelve laberintos con algoritmos de toma de decisiones*. Quito.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta ed.). México: Mc Graw Hill.
- Vera Arenas, A., & Proaño, E. (2016). *Diseño e implementación de dos robots seguidores de línea modalidad velocista y destreza para participaciones en concursos de robótica*. Guayaquil.
- XI, C. o.-B. (s.f.). Recuperado el 20 de 11 de 2020, de <https://umeepn.wordpress.com/batalla-simulada/>