



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT  
MÓVIL PARA LA APLICACIÓN DE LIMPIEZA DE TUBERÍAS DE PVC  
DE 200 MILÍMETROS DE DIÁMETRO**

**AUTORES: CÁRDENAS IZQUIERDO, GERMÁN ALEJANDRO  
FIALLOS ALARCÓN, MAURICIO ANDRÉS**

**DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA LA APLICACIÓN DE LIMPIEZA DE TUBERÍAS DE PVC DE 200 MILÍMETROS DE DIÁMETRO” realizado por los señores GERMÁN ALEJANDRO, CÁRDENAS IZQUIERDO y FIALLOS ALARCÓN, MAURICIO ANDRÉS, el mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se sustente públicamente.

  
MSc. DAVID CÉSAR LOZA MATONELLE



Manabí, 12 de marzo de 2018

C.C.: 170866154



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **CÁRDENAS IZQUIERDO, GERMÁN ALEJANDRO** con cédula de identidad N° 171699395-9 y **FIALLOS ALARCÓN, MAURICIO ANDRÉS** con cédula N° 171596080-1, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA LA APLICACIÓN DE LIMPIEZA DE TUBERÍAS DE PVC DE 200 MILÍMETROS DE DIÁMETRO”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 12 de marzo de 2018

  
.....  
**GERMÁN A. CÁRDENAS IZQUIERDO**

C.C.: 171699395-9

  
.....  
**MAURICIO A. FIALLOS ALARCÓN**

C.C.: 171596080-1



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

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **CÁRDENAS IZQUIERDO, GERMÁN ALEJANDRO** y **FIALLOS ALARCÓN, MAURICIO ANDRÉS** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA LA APLICACIÓN DE LIMPIEZA DE TUBERÍAS DE PVC DE 200 MILÍMETROS DE DIÁMETRO**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 12 de marzo de 2018

  
.....  
**GERMÁN A. CÁRDENAS IZQUIERDO**

C.C.: 171699395-9

  
.....  
**MAURICIO A. FIALLOS ALARCÓN**

C.C.: 171596080-1

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente proyecto a mi abuelo Jorge Alarcón(+), quién fue mi guía, a mis padres Mauricio y María Dolores, quienes han sido el pilar fundamental, tanto humano como académico, a mi hermana María Beatriz, quien siempre ha sido mi ejemplo, a mis abuelos Gustavo, Beatriz(+) y Teye, a cada uno de los miembros de mi familia, quienes me dieron todo su apoyo y cariño para cumplir esta meta. A mis amigos, quienes han aportado positivamente en mi vida, superando juntos todo lo que nos hemos propuesto.

*Mauricio Fiallos*

## AGRADECIMIENTO

Principalmente quiero agradecer a Nietzsche, quien por medio de sus enseñanzas e ideales me ha permitido tener una visión clara de la vida que quiero seguir, siendo gran parte de la inspiración para crear a la persona que soy. Agradezco a mi amigo Marcelo por su apoyo, su confianza y su honestidad los cuales me permiten ver mis errores y me ayudan a seguir creciendo como persona. Deseo agradecer a mi madre por su apoyo económico y moral a lo largo de toda mi carrera. Por último, deseo agradecer a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo, tanto directa como indirectamente

*Germán Cárdenas*

Me siento muy agradecido con mis padres, Mauricio y María Dolores, por ser mis pilares, por darme su tiempo, dedicación, enseñanza de valores y principios. A mi hermana María Beatriz, por ser mi consejera e inspirarme todos los días a ser una persona de bien.

A toda mi familia, quienes han estado pendientes de todo lo que me he propuesto, brindándome sabios consejos y momentos alegres. A mis abuelos Gustavo, Bachita(+), Teye, quienes siempre aportaron con sus enseñanzas, en especial a Jorge(+), quien es mi modelo a seguir. A mi tía Lissette, a quien considero mi segunda mamá.

A mis amigos Diana Armijos, Maurie Franco, Michell Medina, a mis hermanos Sebastián Andrade e Israel Proaño, por todos sus consejos y apoyo cuando más los he necesitado.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, a sus maestros, en especial al Ingeniero David Loza, por ser el guía en el proyecto final. A mi compañero de tesis, Germán Cárdenas.

*Mauricio Fiallos*

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xxi</b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....</b>	<b>1</b>
1.1.    Presentación .....	1
1.2.    Definición del problema.....	3
1.3.    Justificación e Importancia.....	4
1.4.    Objetivos específicos.....	4
1.4.1.  Objetivo general .....	4
1.4.2.  Objetivos específicos.....	5
1.5.    Alcance.....	5

1.6. Estructura del documento .....	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>8</b>
Alcance .....	8
2.1.1. Historia de los robots móviles .....	9
2.1.2. Clasificación de los robots móviles .....	10
Robots móviles aplicados al uso en tuberías .....	15
2.1.3. Robots de limpieza .....	16
2.1.4. Robots de inspección .....	22
Sistemas de locomoción para robots móviles .....	27
2.1.5. Locomoción diferencial .....	27
Sistemas de limpieza de tuberías .....	31
Resumen .....	34
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>DISEÑO MECATRÓNICO .....</b>	<b>36</b>
3.1. Matriz de la Calidad .....	36
3.1.1. Definición de necesidades .....	36
3.1.2. Definición de las características técnicas .....	37
3.1.3. Matriz QFD .....	38
3.2. Factibilidad y planeación .....	40
3.2.1. Estructura funcional .....	40
3.3. Subsistema: Estructura y locomoción .....	41
3.3.1. Eslabón motor .....	57



3.3.6.	Cálculo Energías de locomoción .....	67
3.4.	Subsistema: Herramientas de limpieza .....	68
3.4.1.	Herramienta de limpieza superficial.....	69
3.4.2.	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos.....	79
3.5.	Subsistema: Alimentación y recolección .....	92
3.6.	Subsistema: Control .....	94
3.6.1.	Lazo de control .....	95
3.7.	Subsistema: Inspección .....	96
3.7.1.	Cámara.....	96
3.8.	Subsistema: Comunicación .....	101
3.8.1.	Diseño de la HMI .....	102
3.8.2.	Comunicación Controlador-HMI .....	105
3.8.3.	Comunicación Cámara IP-HMI.....	109
3.9.	Resumen .....	110
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN .....</b>		<b>112</b>
4.1.	Subsistema: Estructura y locomoción .....	112
4.1.1.	Corte en plasma y chorro de agua .....	113
4.1.2.	Maquinado de piezas .....	117
4.1.3.	Soldadura de piezas .....	118
4.1.4.	Ensamble .....	122
4.2.	Subsistema: Actuador de limpieza .....	124
4.2.1.	Herramienta de limpieza superficial.....	124
4.2.2.	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos.....	125

4.3.	Subsistema: Alimentación Eléctrica y recolección .....	126
4.3.1.	Elaboración de la placa del circuito.....	126
4.3.2.	Manufactura de la coraza del circuito y reductor de voltaje.....	127
4.3.3.	Manufactura del recolector .....	127
4.3.4.	Manufactura tablero de control.....	128
4.4.	Subsistema: Inspección .....	129
4.5.	Resumen .....	131
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>		<b>132</b>
4.1.	Pruebas .....	132
4.1.1.	Pruebas Tablero de Control .....	132
4.1.2.	Pruebas de comunicación .....	134
4.1.3.	Pruebas de Servomotores y motor de limpieza .....	135
4.1.4.	Pruebas del Mecanismo de Locomoción .....	136
4.1.5.	Pruebas del Sistema de recolección del cable. ....	137
4.1.6.	Pruebas de operación dentro la tubería.....	139
4.2.	Resumen .....	147
<b>CAPÍTULO VI</b>		
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>149</b>
6.1.	Conclusiones .....	149
6.2.	Recomendaciones.....	150
6.3.	Trabajo futuro.....	151
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>153</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Evolución de los robots móviles</i> .....	9
<b>Tabla 2</b> <i>Comparación de robots de limpieza comerciales</i> .....	20
<b>Tabla 3</b> <i>Comparación de robots de inspección comerciales</i> .....	25
<b>Tabla 4</b> <i>Tipos de efectores de limpieza</i> .....	32
<b>Tabla 5</b> <i>Necesidades del cliente</i> .....	37
<b>Tabla 6</b> <i>Especificaciones técnicas</i> .....	38
<b>Tabla 7</b> <i>Resultados de la matriz QFD</i> .....	40
<b>Tabla 8</b> <i>Subsistema del diseño</i> .....	41
<b>Tabla 9</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 1</i> .....	43
<b>Tabla 10</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 2</i> .....	44
<b>Tabla 11</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 3</i> .....	45
<b>Tabla 12</b> <i>Criterio de evaluación para la selección del subsistema de estructura y</i> ..... <i>y locomoción</i> .....	45
<b>Tabla 13</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Manufactura”</i> .....	46
<b>Tabla 14</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Costo”</i> .....	46
<b>Tabla 15</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Peso”</i> .....	46
<b>Tabla 16</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Diámetro variable”</i> ..	47
<b>Tabla 17</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Mantenimiento”</i> .....	47

<b>Tabla 18</b> <i>Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Facilidad de giro”</i> .....	47
<b>Tabla 19</b> <i>Conclusión de la selección del tipo de estructura del robot</i> .....	48
<b>Tabla 20</b> <i>Tipos de eslabones planos</i> .....	51
<b>Tabla 21</b> <i>Comportamiento de las variables ángulos y distancias en el Estado 1 y Estado 2</i> .....	55
<b>Tabla 22</b> <i>Comportamiento de las fuerzas en el Estado 1 y Estado 2</i> .....	57
<b>Tabla 23</b> <i>Resultados de esfuerzo crítico y factor de seguridad en el desplazamiento</i> .....	
<i>mínimo de la rueda</i> .....	66
<b>Tabla 24</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 1 de limpiador</i> .....	70
<b>Tabla 25</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 2 de limpiador</i> .....	71
<b>Tabla 26</b> <i>Ventajas y desventajas del Concepto 3 de limpiador</i> .....	72
<b>Tabla 27</b> <i>Criterios de evaluación para la selección del subsistema de limpieza</i> .....	72
<b>Tabla 28</b> <i>Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Manufactura”</i> .....	73
<b>Tabla 29</b> <i>Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Costo”</i> .....	73
<b>Tabla 30</b> <i>Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Peso”</i> .....	74
<b>Tabla 31</b> <i>Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de</i> .....	
<i>“Consumo Energético”</i> .....	74
<b>Tabla 32</b> <i>Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Mantenimiento”</i> .....	74
<b>Tabla 33</b> <i>Conclusión de la selección del tipo efector de limpieza</i> .....	75
<b>Tabla 34</b> <i>Resultados de los esfuerzos en la zona crítica</i> .....	81
<b>Tabla 35</b> <i>Características de los microcontroladores</i> .....	86
<b>Tabla 36</b> <i>Criterio de evaluación para la selección del microcontrolador</i> .....	86
<b>Tabla 37</b> <i>Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Tamaño”</i> .....	87
<b>Tabla 38</b> <i>Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Costo”</i> .....	87

<b>Tabla 39</b> <i>Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “No I/O”</i> .....	87
<b>Tabla 40</b> <i>Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Resolución”</i> .....	88
<b>Tabla 41</b> <i>Conclusión de la selección del microcontrolador</i> .....	88
<b>Tabla 42</b> <i>Corrientes consumidas por los diferentes elementos del robot</i> .....	90
<b>Tabla 43</b> <i>Características de la cámara IP seleccionada</i> .....	97
<b>Tabla 44</b> <i>Criterios para elaboración de la HMI</i> .....	102
<b>Tabla 45</b> <i>Parámetros y resultados de pruebas del Tablero de Control</i> .....	133
<b>Tabla 46</b> <i>Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y Cámara IP</i> .....	134
<b>Tabla 47</b> <i>Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y Tarjeta de control</i> .....	134
<b>Tabla 48</b> <i>Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y HMI</i> .....	135
<b>Tabla 49</b> <i>Parámetros y resultados de pruebas a los servomotores</i> .....	135
<b>Tabla 50</b> <i>Parámetros y resultados de pruebas del motor de limpieza</i> .....	136
<b>Tabla 51</b> <i>Parámetros y resultados de pruebas del mecanismo de locomoción</i> .....	136
<b>Tabla 52</b> <i>Parámetros y resultados de pruebas del mecanismo manivela</i> .....	138
<b>Tabla 53</b> <i>Pruebas de velocidad</i> .....	139
<b>Tabla 54</b> <i>Tabla comparativa de los tipos de remoción de sólidos de obstrucción</i> .....	
<i>y sus herramientas</i> .....	143
<b>Tabla 55</b> <i>Tabla comparativa de la limpieza de las paredes internas de la tubería</i> .....	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Tubo de PVC con residuos.....	2
<i>Figura 2</i> Limpiador (marrano) de tuberías metálicas .....	2
<i>Figura 3</i> Clasificación de los robots móviles .....	11
<i>Figura 4</i> Robot móvil con ruedas .....	12
<i>Figura 5</i> Robot móvil con orugas .....	12
<i>Figura 6</i> Robot móvil con patas.....	13
<i>Figura 7</i> Robot acuático marino .....	13
<i>Figura 8</i> Robot acuático submarino.....	14
<i>Figura 9</i> Robot aéreo de despegue vertical.....	15
<i>Figura 10</i> Robot aéreo de despegue horizontal .....	15
<i>Figura 11</i> Clasificación de robots móviles aplicados al uso en tuberías .....	16
<i>Figura 12</i> Robot Manipulador .....	17
<i>Figura 13</i> Pipeline Cleaning Robot .....	17
<i>Figura 14</i> Multi-Diameter PIG Robot Multi-Diameter PIG Robot.....	18
<i>Figura 15</i> DeWaLoP Robot.....	19
<i>Figura 16</i> Robot Jetty .....	21
<i>Figura 17</i> Multi purpose robot.....	21
<i>Figura 18</i> CW-T18 .....	21
<i>Figura 19</i> Diseño CAD Inspector de Tuberías .....	22
<i>Figura 20</i> Robot de Inspección de Tuberías .....	23

<i>Figura 21</i> Robot Explorador de Ductos.....	24
<i>Figura 22</i> Robot S-100 CRAWLER.....	26
<i>Figura 23</i> Robot R300T3.....	26
<i>Figura 24</i> Robot ARI-100.....	26
<i>Figura 25</i> Sistema Diferencial.....	27
<i>Figura 26</i> Sistema Ackerman.....	28
<i>Figura 27</i> Sistema Síncrono.....	29
<i>Figura 28</i> Sistema Omnidireccional.....	29
<i>Figura 29</i> Locomoción mediante orugas.....	30
<i>Figura 30</i> Locomoción por patas.....	31
<i>Figura 31</i> Robot aspiradora.....	33
<i>Figura 32</i> Tipos de cepillos de limpieza de tuberías.....	33
<i>Figura 33</i> Robot para limpiar tuberías usando chorro de agua.....	33
<i>Figura 34</i> Robot para limpiar tuberías con taladro.....	34
<i>Figura 35</i> Matriz QFD.....	39
<i>Figura 36</i> Leyenda de la matriz QFD.....	40
<i>Figura 37</i> Concepto 1 (Eje).....	42
<i>Figura 38</i> Concepto 2 (Circular).....	43
<i>Figura 39</i> Concepto 3 (Hexágono).....	44
<i>Figura 40</i> Diseño del concepto seleccionado.....	49
<i>Figura 41</i> Diseño del cuerpo del robot.....	49
<i>Figura 42</i> Junta del robot.....	50
<i>Figura 43</i> Motor en biela.....	51

<b>Figura 44</b> Representación esquelética del mecanismo .....	52
<b>Figura 45</b> Esquema del mecanismo de tracción .....	54
<b>Figura 46</b> Variación del desplazamiento entre anillos .....	55
<b>Figura 47</b> Descripción del movimiento de cada eslabón en el mecanismo .....	56
<b>Figura 48</b> Diagrama de fuerzas externas sobre el mecanismo de locomoción.....	57
<b>Figura 49</b> Eslabón motor .....	58
<b>Figura 50</b> Fuerza Cortante y Momento Flector de Eslabón motor.....	58
<b>Figura 51</b> Análisis de Esfuerzos Eslabón de 100mm .....	59
<b>Figura 52</b> Eslabón pequeño .....	60
<b>Figura 53</b> Análisis de Esfuerzos Eslabón de 50mm .....	60
<b>Figura 54</b> Placa del anillo.....	61
<b>Figura 55</b> Análisis de Esfuerzos Placa anillo .....	62
<b>Figura 56</b> Eje circular .....	62
<b>Figura 57</b> Análisis de esfuerzos Eje .....	63
<b>Figura 58</b> Pasador.....	64
<b>Figura 59</b> Fuerza Cortante y Momento Flector del Pasador .....	64
<b>Figura 60</b> Análisis Esfuerzos del Pasador .....	65
<b>Figura 61</b> Procedimiento para hallar fuerzas cortantes y momentos flectores .....	66
<b>Figura 62</b> Esquema para identificar las energías del sistema.....	67
<b>Figura 63</b> Portaherramientas en eje descentrado .....	69
<b>Figura 64</b> Portaherramientas en eje centrado .....	70
<b>Figura 65</b> Conjunto de discos abrasivos.....	71
<b>Figura 66</b> Esquema de fuerzas que actúan con el limpiador .....	75



<b>Figura 67</b> Eje de los cepillos plásticos .....	76
<b>Figura 68</b> Esquema Euler-Lagrange para sistema de limpieza .....	77
<b>Figura 69</b> Distancia en fase del robot .....	79
<b>Figura 70</b> Herramienta de limpieza para remoción de sólidos .....	80
<b>Figura 71</b> Análisis de esfuerzo limpiador remoción de sólidos .....	81
<b>Figura 72</b> Esquema de distancias para análisis de esfuerzos.....	82
<b>Figura 73</b> Motor AngelANQI0001GB .....	83
<b>Figura 74</b> Servomotor LW-20MG.....	84
<b>Figura 75</b> Sensor DHT21 .....	85
<b>Figura 76</b> ATmega 328.....	89
<b>Figura 77</b> Esquema general de conexiones .....	89
<b>Figura 78</b> Esquema de distribución de la corriente .....	90
<b>Figura 79</b> Sección cuadrada vs Corriente (IPC-2221).....	91
<b>Figura 80</b> Conductor interno vs corriente.....	91
<b>Figura 81</b> Distribución de pistas de la placa.....	92
<b>Figura 82</b> Estructura de recolector .....	93
<b>Figura 83</b> Mecanismo de manivela con carrete.....	93
<b>Figura 84</b> Esquema de conexión del tablero.....	94
<b>Figura 85</b> Algoritmo de control.....	95
<b>Figura 86</b> Lazo de control Servomotores .....	96
<b>Figura 87</b> YYP2P Smart Home Security IP Camera.....	97
<b>Figura 88</b> Coraza Superior.....	98
<b>Figura 89</b> Coraza Inferior .....	99

<b>Figura 90</b> Anillo de Sujeción.....	100
<b>Figura 91</b> Placa y Tapa Base .....	100
<b>Figura 92</b> Esquema general de la comunicación .....	101
<b>Figura 93</b> Esquema de distribución de objetos de la HMI .....	103
<b>Figura 94</b> HMI del robot .....	104
<b>Figura 95</b> Esquema de funcionamiento de la HMI.....	105
<b>Figura 96</b> Arquitectura de la red.....	106
<b>Figura 97</b> Algoritmo de comunicación del módulo ESP8266.....	107
<b>Figura 98</b> Algoritmo implementado para la comunicación del HMI y módulo ESP8266 .....	108
<b>Figura 99</b> Algoritmo de funcionamiento de la comunicación de la cámara IP con el HMI... ..	110
<b>Figura 100</b> Máquina CNC de corte con plasma .....	112
<b>Figura 101</b> Procedimiento para la construcción del robot de limpieza .....	113
<b>Figura 102</b> Piezas de 2 mm cortadas por plasma .....	114
<b>Figura 103</b> Piezas de 3 mm cortadas por plasma .....	114
<b>Figura 104</b> Eslabón de 50 mm con rebabas y aristas vivas .....	115
<b>Figura 105</b> Orejas del anillo con rebabas y aristas vivas .....	115
<b>Figura 106</b> Eslabón de 50 mm requerido .....	115
<b>Figura 107</b> Piezas de 3 mm cortadas con chorro de agua.....	116
<b>Figura 108</b> Eslabón del motor .....	116
<b>Figura 109</b> Reducción del diámetro del cilindro metálico .....	117
<b>Figura 110</b> Fresado de ranuras guías en el cilindro metálico .....	118
<b>Figura 111</b> Ranuras guías para colocar las orejas .....	118
<b>Figura 112</b> Eje de los cuerpos del robot .....	119

<b>Figura 113</b> Pieza “anillo” acabada .....	119
<b>Figura 114</b> Estructura del acople del motor para la limpieza de la tubería .....	120
<b>Figura 115</b> Estructura de soporte del motor para limpieza de tubería soldada al eje.....	
del robot.....	120
<b>Figura 116</b> Eslabón.....	121
<b>Figura 117</b> Uso de una escuadra para impedir el desfase de las orejas entre los dos.....	
cuerpos del robot.....	121
<b>Figura 118</b> Cuerpos del robot unidos utilizando un resorte .....	122
<b>Figura 119</b> Esquema ensamble mecanismo tracción.....	123
<b>Figura 120</b> Robot ensamblado: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral .....	123
<b>Figura 121</b> Pieza manufacturada en forma de hexágono.....	124
<b>Figura 122</b> Herramienta de limpieza superficial .....	125
<b>Figura 123</b> Herramienta de limpieza para remoción de sólidos .....	125
<b>Figura 124</b> Diseño de la PCB del circuito electrónico .....	126
<b>Figura 125</b> Placa electrónica del robot .....	126
<b>Figura 126</b> Coraza del circuito y reductor de voltaje: (a) Caja, (b) tapa 1, (c) tapa 2.....	127
<b>Figura 127</b> Planos de diseño de la estructura metálica del recolector .....	127
<b>Figura 128</b> Recolector ensamblado: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral .....	128
<b>Figura 129</b> Puerta del tablero .....	129
<b>Figura 130</b> Distribución de elementos y cableado de los elementos del tablero.....	129
<b>Figura 131</b> Coraza Anillo de sujeción (a) Vista frontal, (b) Vista lateral .....	130
<b>Figura 132</b> Coraza Superior (a) Vista frontal, (b) Vista lateral.....	130
<b>Figura 133</b> Placa Base (a) Vista frontal, (b) Vista lateral.....	131

<b>Figura 134</b> Tablero de Control: (a) Selector 1, (b) Selector 2.....	133
<b>Figura 135</b> Prueba en tubería vertical: a) esquema, b) acercamiento.....	141
<b>Figura 136</b> Tubería horizontal con un accesorio tipo codo de radio largo de 90° .....	141
<b>Figura 137</b> Inspección de tubería sin sólidos .....	142
<b>Figura 138</b> Inspección de tubería con sólidos .....	142
<b>Figura 139</b> Inspección de la tubería entre la unión del codo de 90° y la tubería recta.....	142
<b>Figura 140</b> Suciedad inicial dentro de la tubería.....	144
<b>Figura 141</b> Trabajo realizado por el robot.....	145
<b>Figura 142</b> Resultados de la primera limpieza del robot dentro de la tubería.....	145
<b>Figura 143</b> Herramienta luego de la primera limpieza.....	146
<b>Figura 144</b> Diseño recomendado a futuro .....	152

## **RESUMEN**

El presente proyecto presenta el diseño y manufactura de un prototipo de robot móvil para la limpieza de tuberías de PVC de 200 mm de diámetro, teleoperado inalámbricamente por una interfaz gráfica desde un computador y una distancia máxima de trabajo de 15 metros. En primera instancia, se procedió a establecer los objetivos a cumplir y las limitaciones que tendrá el proyecto. Posteriormente, se mencionó una breve historia y desarrollo de los robots móviles, especialmente cuya aplicación es el campo de las tuberías. Para iniciar la etapa de diseño, se procedió a cuantificar y calificar las necesidades del cliente para la generación y selección de conceptos que mejor se adapte a los objetivos propuestos. A continuación se realizó un diseño y análisis mecánico para las estructuras del cuerpo del robot y recolector, teniendo en cuenta una locomoción que permita un agarre óptimo al interior de la tubería y admita el ascender diferentes pendientes. Se diseñó una interfaz gráfica en software libre, bajo las normas GEDIS, la cual se comunica con el robot por medio inalámbrico (wifi), para la comunicación con la tarjeta de control y una cámara IP para la adquisición de video en tiempo real. Las pruebas realizadas demostraron la capacidad del robot para sobrepasar pendientes de hasta 90 grados gracias a su locomoción. Además se cumplió el objetivo principal, el cual requería limpiar una tubería de PVC, obteniendo una limpieza del 90%.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ROBOT MÓVIL**
- **TUBERÍA**
- **LIMPIEZA**
- **TELEOPERADO**

## **ABSTRACT**

The actual project presents the design and manufacturing of a mobile robot prototype for in-pipe cleaning of 200 mm diameter, Wireless tele-operated by a graphic interface from a computer and a maxim distant of 15 meters. First, the main objectives to fulfill and the limitations of the project were established. A brief history and development of the field of mobile robotics was mention, especially about robots for in-pipe cleaning and inspection. In-pipe cleaning commercial robots and scientific advances in the field were discuss too. To begin the design, it was necessary the quantification and calcification of the client's necessities allowing the generation and selection of optimal concepts that cover the expectancies of the client; information which was used to provide a mechanical design and to analyze of the robot's structure. The locomotion was considering of great importance due to accomplish a movement in slopes. A graphic interface was design in free software, following the GEDIS normative. This interface links wireless with the cleaning robot by WIFI. It is also used a wireless communication card for the control board and an IP camera that provides Real time video. The test proved the robot's capacity to surpass slopes of 90° due to its locomotion. Finally, the main objective was fulfilled by cleaning a PVC pipe with results of 90% of cleaning.

### **KEYWORDS:**

- **MOBILE ROBOT**
- **PIPE**
- **CLEANING**
- **TELEOPERATED**

## CAPÍTULO I

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El capítulo presenta una introducción del proyecto de titulación “Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil para la aplicación de limpieza de tuberías de PVC de 200 milímetros de diámetro” en donde se explica el problema a resolver, los objetivos planteados a cumplir, como el alcance y limitaciones del proyecto. También se explica brevemente la situación actual del mantenimiento de tuberías de la industria y la tecnología que se utiliza para cumplir el mismo.

#### 1.1. Presentación

Actualmente, se implementa tuberías dentro de la industria para el transporte de fluidos, elaboradas con materiales como hierro, acero, hormigón, PVC, entre otros; dependiendo de las características del fluido a transportar y el medio donde este se encuentre. Sin embargo, requieren de mantenimiento periódico, el cual se busca que sea rápido, eficiente y económico.

El tipo de mantenimiento se puede categorizar como preventivo o correctivo, las causas que pueden disminuir la eficiencia de las tuberías son: la corrosión, erosión, acumulación de sólidos, presencia de microorganismos (ver Figura 1). El mantenimiento preventivo tiene como objetivo la preservación de canales mediante la inspección y reparación para garantizar su funcionamiento óptimo. El mantenimiento correctivo consiste en corregir y reparar las averías o defectos una vez son localizados.

Los equipos comúnmente utilizados son los raspadores también conocido como “marrano” o “chancho” (ver Figura 2), el cual es un equipo cilíndrico que busca remover los sólidos por medio de los principios de fricción y presión. Existen tres tipos de raspadores, siendo (a) de espuma de poliuretano, (b) monocasco y (c) mandril de acero.



**Figura 1** Tubo de PVC con residuos  
Fuente: (Hidrotec, 2016)



**Figura 2** Limpiador (marrano) de tuberías metálicas  
Fuente: (Girard Industries, 2017)

El proyecto propone el diseño y construcción de un dispositivo electromecánico, teleoperado, para la limpieza de tuberías de PVC de 200 mm de diámetro, usando como base los principios de



funcionamiento de los equipos raspadores. Además, se implementa un sistema de inspección de la tubería por medio de cámaras y un sistema de suministro energético externo.

## **1.2. Definición del problema**

El difícil acceso a zonas de tamaño limitado, exposición a ambientes peligrosos, impide al operador la realización de actividades como el mantenimiento e inspección de tuberías y conductos. En muchos casos los dispositivos actuales para mantenimiento son propensos a atorarse, desviarse, o deformarse dentro de las tuberías. Además, ciertos protocolos de mantenimiento, requieren la separación de secciones completas de la tubería, dificultando el mantenimiento en tuberías subterráneas. Dicho problema promueve el diseño y la manufactura de equipos mecánicos y electromecánicos para suplir esta necesidad.

Las empresas petroleras y las compañías que instalan y realizan mantenimiento de conductos domésticos y de oficinas presentan problemas para limpiar sus canales de transporte a través de tuberías metálicas y/o PVC, lo que genera rutas de difícil acceso, lo que promueve el diseñar dispositivos móviles para ejecutar procesos de limpieza de canales con ayuda de robots.

Actualmente las empresas utilizan varios medios para el mantenimiento preventivo de tuberías siendo los más comunes, (a) limpieza de barrido por medio de aire comprimido o chorro de agua a presión, (b) eliminación de sólidos por medio de raspadores (marranos) y (c) purga de tuberías por medio de un flujo de gases químicos constante. (Ingasoil, 2017)

### **1.3. Justificación e Importancia**

El desarrollo del proyecto permite el fácil acceso a tuberías favorece al mantenimiento e inspección por medio un robot móvil teleoperado, el cual ingresa internamente a la tubería y el operador selecciona la ruta a seguir, equipado a con un actuador rotativo para la limpieza, cámaras destinadas para la inspección, y un sistema externo para la alimentación, control y recuperación del dispositivo. El proyecto soluciona problemas como la separación de secciones para funcionamiento, limpieza en tuberías tipo ‘Y’, y un suministro energético más eficiente. En consecuencia, el proyecto genera alternativas para el mantenimiento de tuberías, en especial en industrias que transporten fluidos gaseosos, y carentes de compresores.

El proyecto sigue una línea de investigación, buscando promover el desarrollo tecnológico en el país y la generación de empresas de mantenimiento aplicando el uso de tecnologías. Además, esto se encuentra alineado con los objetivos establecidos en el Plan del Buen Vivir.

El proyecto se fundamenta bajo el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 (Senplades, 2013), presentando el objetivo No.10 “Impulsar la transformación de la matriz productiva”, en el que dispone los siguientes artículos: (a) Artículo 10.1 y (b) Artículo 10.2, en los que se menciona la diversificación de la producción nacional e intensificar la tecnología en la producción primaria del país.

### **1.4. Objetivos específicos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

- Diseñar y construir un prototipo de robot móvil para la aplicación de limpieza de tuberías de PVC de 200 mm de diámetro.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de limpieza y eliminación de obstrucciones en tuberías.
- Elaborar un sistema de tracción para el desplazamiento del robot.
- Implementar una HMI para la teleoperación y visualización de cámaras para inspección.
- Implementar un circuito electrónico para el control de motores.

### 1.5. Alcance

El prototipo es un dispositivo explorador que cumple como objetivo la limpieza y la inspección de tuberías. Es importante delimitar los parámetros por los que se va a operar, el robot está limitado a limpiar conductos de 200 milímetros (mm) de diámetro externo, siendo tuberías rectas de PVC, con codos de máximo de 45° y acoples tipo “Y”. El prototipo podrá ascender ductos con una pendiente no superior a los 15°.

El desplazamiento total del robot, depende de factores como la cantidad de suciedad (obstrucción de sólidos), de la distancia de la tubería, del largo de los cables. La comunicación y suministro energético, provienen de un cordón umbilical de hasta 15 metros de longitud. El sistema será controlado por una HMI visualizada en un computador, el cual contiene los videos de operación, la información de sensores, actuador de limpieza, dirección y tracción del dispositivo.

El dispositivo posee un sistema de tracción desfasado a 120°, permitirá que el robot se estabilice en la tubería, el uso de una cabeza y una cola interconectadas por un mecanismo, permitirá al prototipo cambiar de dirección. Adicionalmente, el sistema de limpieza utilizado es de tres brazos

en forma de “L”, promoviendo la limpieza de las paredes internas de la tubería y eliminando sólidos en el centro del conducto.

## **1.6. Estructura del documento**

El presente proyecto está estructurado en 5 capítulos, en los cuales se realizará el diseño, análisis, construcción y pruebas. El primer capítulo presenta una introducción del proyecto realizado, en donde se explica el problema a resolver, los objetivos a cumplir, su alcance y limitaciones del mismo.

En el segundo capítulo abordará una descripción del estado del arte, mencionando conceptos generales sobre robots móviles, su historia, su clasificación, su funcionamiento y aplicaciones. Se presentarán detalladamente robots para la limpieza e inspección de tuberías industriales y de investigación, estableciendo un análisis de robots comerciales, sus ventajas y limitaciones.

En el tercer capítulo se realizará el diseño mecatrónico del prototipo de robot que permita la limpieza e inspección de tuberías. También, se elaborará la matriz QFD partiendo de las necesidades del cliente. Además se desarrollará la selección de componentes mecánicos y electrónicos, considerando sus características técnicas.

En el capítulo 4 se detallará el proceso de manufactura de los elementos mecánicos, ensamble de las partes mecánicas y electrónicas. También se realizará la fabricación de la tarjeta electrónica y la conexión de actuadores.

En el capítulo 5 se elaborarán las diferentes pruebas sobre el tablero de control y el robot, evaluando sus resultados. Las pruebas a realizar son: funcionamiento del mecanismo de

locomoción, la comunicación de los módulos inalámbricos, la correcta operación de los servomotores y el motor que permite la limpieza de las tuberías.

En el capítulo 6 se abordará las conclusiones y recomendaciones del proyecto de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el capítulo 5. Se mencionan los datos técnicos como velocidad dentro de la tubería en vertical y horizontal, y los factores de seguridad de los eslabones.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

El capítulo presenta conceptos generales sobre robots móviles, su historia, su clasificación, su funcionamiento y aplicaciones. Adicionalmente, se trata temas como robots para la limpieza e inspección de tuberías en la industria y de investigación. Por último, incluye un análisis de robots comerciales, detallando sus ventajas y limitaciones.

#### **Alcance**

Un robot es un dispositivo mecánico y/o electrónico, diseñado para cumplir una o varias funciones de manera autónoma, las cuales pueden ser reprogramadas. Los robots pueden ser clasificados por su arquitectura en: (a) androides o humanoides, (b) móviles, (c) zoomórficos, (d) teleoperados, (e) médicos, (f) industriales, (g) híbridos. Varios robots permiten la manipulación y/o transportación de material, a través de secuencias programadas.

Según la asociación argentina de control automático, los robots móviles son dispositivos de transporte automático, dotados de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento portando cargas. Sus aplicaciones pueden ser muy variadas y siempre están relacionadas con tareas que normalmente son riesgosas o nocivas para la salud humana, en áreas como la agricultura, en el transporte de cargas peligrosas o en tareas de exploración solitarias.

### 2.1.1. Historia de los robots móviles

El desarrollo de los robots móviles inició en década de los 40s, teniendo como enfoque la investigación y uso militar. Posteriormente, al final de la Segunda Guerra Mundial, se encontró el potencial de esta tecnología en otros usos además de la militar, por lo cual se empezó a hacer investigación en robots de exploración, detección y evasión de obstáculos, la puede se puede observar en la Tabla 1. Hoy en día, la tecnología se ha desarrollado obteniendo robots móviles con mejores funciones, que permiten detección de todo su entorno, seres humanos, aspectos hostiles y capacidad de tomar decisiones propias.

**Tabla 1**

*Evolución de los robots móviles*

Año	Descripción
1939 - 1945	Aparecen robots móviles durante la Segunda Guerra Mundial. Estos robots eran bombas volantes, con sistemas de guía y control radar.
1948 -1949	Se construye el robot 'Speculatrix Machina', robots de exploración, contruidos por W. Grey Walter. Estos robots estaban equipados con una señal de luz, evitaban o movían los obstáculos en su destino.
1961 - 1963	Se desarrolla el robot 'La Bestia', diseñado por la Universidad John Hopkings, el cual utiliza un sonar para poder movilizarse.
1969	Aparición del robot 'Shakey', desarrollado por la Universidad de Standford. Es el primer robot controlado por visión.
1976	NASA envía 2 naves no tripuladas a Marte, en el programa Viking.
1979	Surge el 'Standford Cart', robot móvil capaz de seguir una línea por medio de una cámara.
1989	Mark Tilden inventa el robot 'BEAM'.
1990	Joseph Engelberger, empieza un diseño de brazos de robot móvil en el proyecto MDARS-I.
1993 - 1994	Se desarrolla en la Universidad de Carnegie Mellon, el robot 'Dante I' y 'Dante II', utilizados para la exploración de volcanes activos.
1994	El robot vehículo 'VAMP' y 'VITA', tienen la capacidad de conducción básica autónoma.

CONTINÚA 

<b>1996 - 1997</b>	La NASA envía rover 'Sojourner' a Marte, robot diseñado para la exploración de la superficie, siendo teleoperado desde la Tierra o de manera autónoma.
<b>1999</b>	Se presenta el robot 'Aibo', desarrollado por Sony. Es un robot con forma de perro, capaz de ver, caminar e interactuar con su entorno.
<b>2001</b>	Nace el proyecto 'Swarm-bots'. Robots enjambres que simulan las colonias de insectos. Estos robots individuales simples son capaces de comunicarse entre sí y realizar variables complejas.
<b>2002</b>	Aparece el 'Roomba', robot móvil con función de limpieza para el suelo.
<b>2004</b>	Inicia el proyecto 'Centibots', el cual está compuesto de 10 robots autónomos para la elaboración de un mapa de un entorno desconocido.
<b>2008</b>	Boston Dynamics presenta su generación de robots 'BigDog', los cuales pueden ser capaces de caminar en terreno helado y recuperar su equilibrio. (Boston Dynamics, 2017)
<b>2010</b>	Se realiza el reto internacional de múltiples robots terrestres autónomos para el mapeo de zonas urbanas dinámicas e identificación y seguimiento de humanos. (DST Group, 2017)
<b>2012</b>	El robot 'Curiosity' llega a Marte para determinar las posibilidades para soportar vida en Marte. (NASA, 2017)
<b>2016</b>	El robot 'MARCbot' es el primer robot empleado por la policía estadounidense para la detención mortal, de un individuo peligroso. (Exponent, 2017)
<b>2017</b>	ARGOS Challenge desarrolla investigaciones para robots móviles autónomos para el trabajo en extremas condiciones para instalaciones en mar abierto. (ARGOS Challenge, 2017)

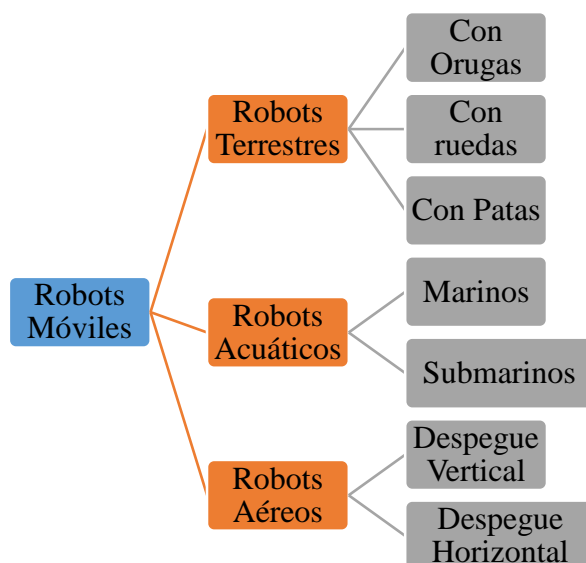
Fuente: (Instituto Superior Técnico, 2002)

### 2.1.2. Clasificación de los robots móviles

Los robots móviles pueden ser clasificados de diferentes formas como: (a) número de piernas del robot, (b) tipo de ruedas del robot, (c) su medio en el que se transporta, (d) algoritmo de guía, (e) teleoperados o autónomos, siendo la categoría más común el medio en el que se transporta, los cuales se dividen en:



- Terrestres.
- Aéreos.
- Acuáticos.



**Figura 3** Clasificación de los robots móviles

### 2.1.2.1. Terrestres

Los robots móviles terrestres, también conocidos como “vehículos terrestres no tripulados” (UGV, por sus siglas en inglés Unmanned Ground Vehicle), es un dispositivo que opera en contacto con la tierra y sin necesidad de un ser humano, a bordo del mismo. Pueden ser utilizados en aplicaciones inconvenientes, peligrosas o imposibles para la presencia de un humano. Generalmente, los robots están equipados con sensores que le permiten observar su medio ambiente y poseen la capacidad de tomar decisiones autónomas o ser teleoperadas desde una localización remota.

Los robots terrestres pueden ser clasificados por su forma de locomoción, siendo estas por:

- Ruedas (ver Figura 4).
- Orugas (ver Figura 5).
- Patas (ver Figura 6).



**Figura 4** Robot móvil con ruedas  
Fuente: (Robotnik, 2017)



**Figura 5** Robot móvil con orugas  
Fuente: (Balamrobots, 2017)



**Figura 6** Robot móvil con patas  
Fuente: (Boston Dynamics, 2017)

### 2.1.2.2. Acuáticos

Los robots móviles acuáticos, son dispositivos que viajan a través de un fluido líquido, ya sea en la superficie (marinos) o en su interior (submarinos). Se caracterizan por la ausencia de un piloto que controle al equipo. Poseen sensores para la toma de decisiones en su ruta, ya sea por medio de teleoperador o seleccionada por el mismo dispositivo.

Los robots acuáticos se clasifican en:

- Marinos (ver Figura 7).
- Submarinos (ver Figura 8).



**Figura 7** Robot acuático marino  
Fuente: (Maritime Robotics, 2017)



**Figura 8** Robot acuático submarino  
Fuente: (National Ocean Service, 2015)

### 2.1.2.3. Aéreos

Los robots aéreos o también conocidos como “vehículos aéreos no tripulados” (UAV, por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle). Estos dispositivos pueden ser operados por radio control o a través de un programa previamente cargado. Tienen como objetivo entrega de suministros, turismo, entretenimiento, búsqueda, rescate, y aplicaciones militares.

Los robots aéreos se clasifican en:

- Despegue vertical (ver Figura 9).
- Despegue horizontal (ver Figura 10).



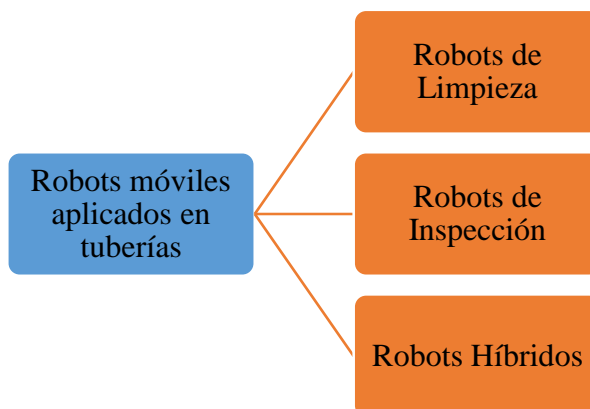
**Figura 9** Robot aéreo de despegue vertical  
Fuente: (Amazon, 2017)



**Figura 10** Robot aéreo de despegue horizontal  
Fuente: (Amazon, 2017)

### **Robots móviles aplicados al uso en tuberías**

Una de las aplicaciones de los robots móviles se encuentra en el campo industrial para el mantenimiento de tuberías. Dentro de la aplicación de mantenimiento los robots pueden ser clasificados en: (a) robots de limpieza, (b) robots de inspección y (c) robots híbridos. Creando líneas de investigación y mercado para el desarrollo de dispositivos móviles para las aplicaciones que trabajan en tuberías.

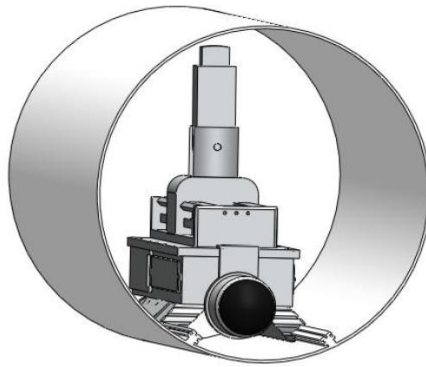


*Figura 11* Clasificación de robots móviles aplicados al uso en tuberías

### 2.1.3. Robots de limpieza

Los robots de limpieza de tuberías en el ámbito investigativo buscan mayor movilidad y flexibilidad para recorrer una tubería, existiendo dispositivos para varias formas de tuberías, y dispositivos capaces solo de actuar dentro de una tubería recta. En general el funcionamiento básico que poseen son efectores rotativos que permiten por medio de fricción, la eliminación de elementos en la superficie de las tuberías.

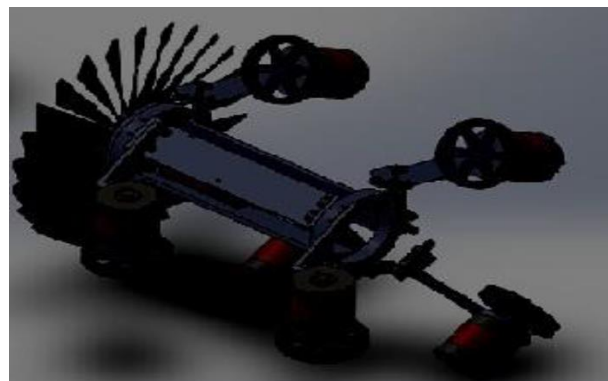
La facultad de ingeniería electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana elaboró un trabajo de grado titulado “Control de un robot manipulador aplicado a la reparación de tuberías hidrosanitarias” (Patiño Guevara, Colorado Montano, & Orozco Martínez, 2015), en el cual se diseñó un dispositivo manipulador electromecánico (ver Figura 12), para la limpieza de las paredes internas de una tubería de 53 cm de diámetro, el cual se traslada a través de una riel.



**Figura 12** Robot Manipulador

Fuente: (Patiño Guevara, Colorado Montano, & Orozco Martínez, 2015)

El departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Kongu, diseñó y manufacturó un robot de limpieza de tuberías de 1200 mm de diámetro (Kongu College, 2016), con el objetivo de facilitar un transporte seguro de bienes químicos a través de tuberías, las cuales están expuestas a daño por elementos medioambientales, motivo por el cual se requiere de un mantenimiento fácil, eficiente, seguro para los operadores y de bajo costo. (ver Figura 13).

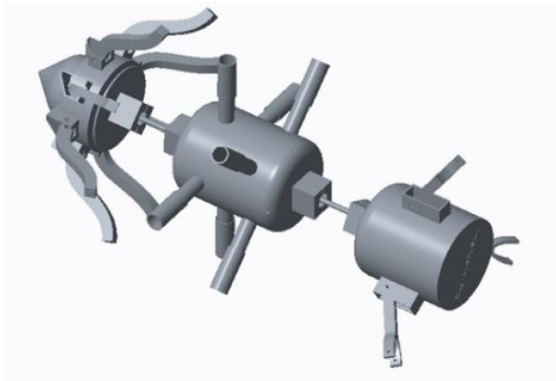


**Figura 13** Pipeline Cleaning Robot

Fuente: (Kongu College, 2016)

Como proyecto de investigación se elaboró un raspador (Pig) multi diámetro para la detección de grietas ultrasónico, (Ahmadian Mazraeh, Khaksar, B. Ismail, & Sahari, 2016), un robot móvil articulado diseñado para la movilización dentro de una tubería entre diámetros de 8 a 10 pulgadas

(ver Figura 14), montado con sensores de (a) temperatura, (b) distancia (c) ultrasónicos, para la detección, ubicación y estado de zonas con fallas.

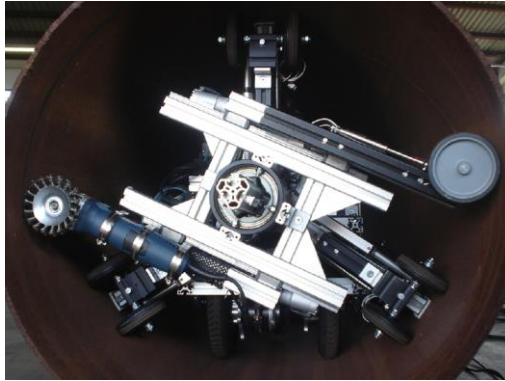


**Figura 14** Multi-Diameter PIG Robot Multi-Diameter PIG Robot

Fuente: (Ahmadian Mazraeh, Khaksar, B. Ismail, & Sahari, 2016)

El robot DeWaLoP (ver Figura 15), fue desarrollado por European Regional Development Fund, es un robot móvil para el mantenimiento de tuberías de agua de 800 a 1000 mm de diámetro, el dispositivo realiza limpieza de las paredes de la tubería por medio de un efector que se incorpora al robot, dicho efector es una herramienta de mantenimiento general como una moledora, dremel u otros, el cual es montado en un porta herramientas con la capacidad de rotar permitiendo que el efector este en contacto con toda la superficie.





**Figura 15** DeWaLoP Robot  
Fuente: (A. Mateos & Vincze, 2013)

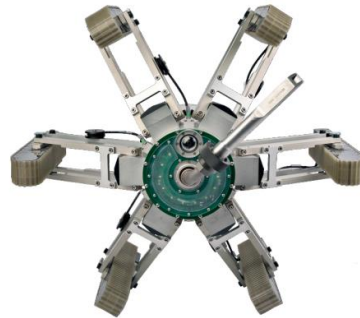
La robótica al ir evolucionando día a día, genera un nicho de mercado en varias áreas, una de ellas es la limpieza de tuberías, considerando el tipo de material que fue elaborado (metálicas o plásticas), el tipo de sección (circular o cuadrada), el fluido que transporta (aire o líquido), la temperatura, la presión de las mismas, los diámetros internos – externos y los tipos de accesorios utilizados.

La utilización de robots móviles para la limpieza ha promovido la creación de empresas en todo el mundo, tanto para aplicaciones industriales como para domésticas. Adicionalmente, es importante mencionar que las empresas se encuentran ubicadas principalmente en países como Estados Unidos, Canadá, España, Francia, Alemania, Italia, Tailandia y Japón.

Existen varios tipos de robots aplicados para limpieza considerando su efector final, su sistema de locomoción, el uso de diferentes sensores, su sistema de comunicación, el tipo de tubería en la cual pueden operar. En la Tabla 2, se puede observar la comparación de 3 tipos de robots comerciales de diferentes marcas.

**Tabla 2***Comparación de robots de limpieza comerciales*

<b>Características</b>	<b>Robot Jetty (Neovision, 2017)</b>	<b>Multi purpose robot (Danduct Clean, 2013)</b>	<b>CW-T18 (Cumond, 2014)</b>
<b>Modelo</b>	Jetty	Multi purpose robot	CW-T18
<b>Función</b>	Limpieza e inspección	Limpieza e inspección	Limpieza e inspección
<b>Sistema de locomoción</b>	6 orugas	4 ruedas (2 en cada lado)	2 orugas
<b>Peso</b>	Aprox. 35 kg	Aprox. 21 kg	Aprox. 18.2 kg
<b>Iluminación</b>	No	3 focos alógenos	2 led
<b>Dimensión</b>	Diámetro mínimo 360 mm, diámetro máximo 710 mm	760 x 300 x 145 mm	330 x 270 x 200 mm
<b>Alimentación</b>	Cableado externo	Batería interna	Externa por cable
<b>Distancia recorrida</b>	50 m	50 m	100 m
<b>Clase de protección</b>	IP 68	Sin especificar	IP 66
<b>Cámaras</b>	Si	Si	Si
<b>Tipo de control</b>	Alámbrico	Alámbrico	Alámbrico
<b>Adicionales</b>	Soplador	Soplador con aire comprimido, juego de brochas.	Soplador con aire comprimido, juego de brochas.
<b>Costo</b>	Sin especificar	Sin especificar	10.450 USD



**Figura 16** Robot Jetty  
Fuente: (Neovision, 2017)



**Figura 17** Multi purpose robot  
Fuente: (Danduct Clean, 2013)

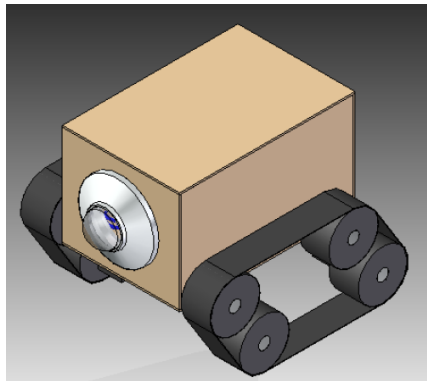


**Figura 18** CW-T18  
Fuente: (Cumond, 2014)

#### 2.1.4. Robots de inspección

Los robots de inspección de tuberías en el ámbito investigativo buscan mayor movilidad y flexibilidad para recorrer una tubería. Los dispositivos para la detección de fallas deben ser capaces de cubrir la mayoría de la superficie para realizar el análisis y determinar el estado de la misma, por lo cual se usa equipos como cámaras, sensores capacitivos, ultrasónicos además de otros.

El proyecto realizado en la Escuela de Ingenieros de Antioquia (Ramirez Molina, 2013), se enfocó en desarrollar un diseño conceptual (ver Figura 19) sobre un vehículo que puede ser utilizado para realizar una inspección visual en los sistemas de alcantarillado. En él se analizó diferentes métodos de tipo de locomoción, alimentación energética, método de movimiento, modo de control para el vehículo, tipo de cámara y transmisión de la imagen.

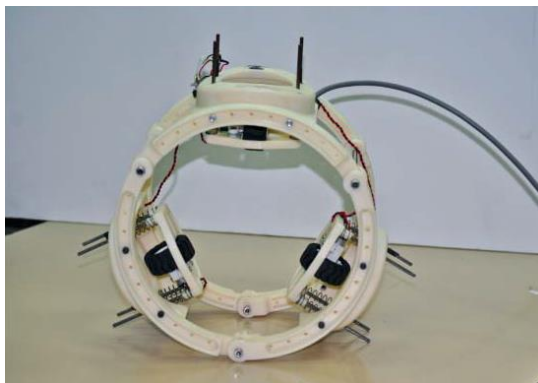


**Figura 19** Diseño CAD Inspector de Tuberías  
Fuente: (Ramirez Molina, 2013)

En la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires se desarrolló un robot para exploración de tuberías (Di Matteo, Verrastro, & Roitman, 2010). Su objetivo la detección de defectos en el interior de tuberías capaces de encontrar sólidos adheridos a la superficie que impidan la circulación correcta de los fluidos. El robot se moviliza con alta precisión y exactitud

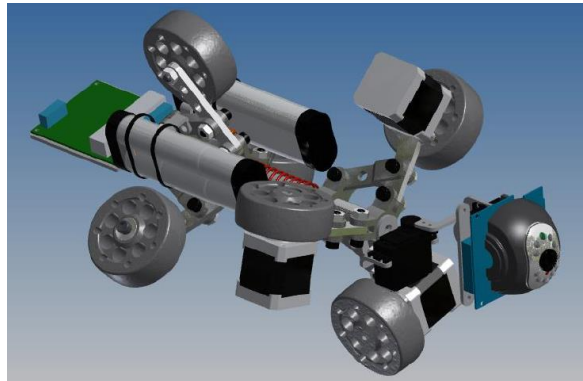
en su edometría, para la búsqueda y detección de fallas por medio mini-cámaras incorporadas en el cuerpo del robot.

Un proyecto para el diseño de un robot de inspección de tuberías externo RETOV (ver Figura 20), fue diseñado por la Universidad Politécnica de Madrid (Urdaneta Lima, 2012). El dispositivo es capaz de moverse a lo largo de una tubería externamente, ya sea en posicionamiento vertical u horizontal y detectar fallas en la superficie de esta, y primordialmente en las juntas del ducto.



**Figura 20** Robot de Inspección de Tuberías  
Fuente: (Urdaneta Lima, 2012)

La Universidad de Azuay realizó un proyecto para el diseño y manufactura de un robot de inspección llamado “Estudio y diseño de un robot explorador de ductos mediante la captura de imágenes en tiempo real utilizando un interface gráfico remoto” (Díaz Andrade & Sarmiento Astudillo, 2015). Capaz de inspeccionar tuberías de diámetros entre 9 y 11 pulgadas, por medio de la captura de imágenes, comunicación inalámbrica entre el dispositivo y el operador. (ver Figura 21).



**Figura 21** Robot Explorador de Ductos  
Fuente: (Díaz Andrade & Sarmiento Astudillo, 2015)

Evolución diaria de la robótica ha ido generando posibilidades de crear negocios que cumplan las necesidades de los clientes, promoviendo el desarrollo e investigación tecnológica, impulsando la competencia, mejorando las funciones que ofertan las empresas y sus factores de calidad.

El aparecimiento de robots móviles para la inspección de tuberías, ha promovido que empresas ofrezcan servicios a nivel mundial, estableciendo como cliente objetivo tanto industriales como domésticos. Es importante mencionar que las empresas que dan estos servicios se encuentran en países como Estados Unidos, España, Holanda, Francia, Alemania, India, Corea del Sur, Japón y China.

Para el uso de los robots de inspección se debe considerar varios factores como (a) efector final, (b) tipo de tubería, (c) diámetro de la tubería. (d) distancia total del canal, (e) presencia o no de fluido o sustancias sólidas. En la Tabla 3, se puede observar la comparación de 3 tipos de robots comerciales de diferentes marcas.

**Tabla 3***Comparación de robots de inspección comerciales*

<b>Características</b>	<b>S-100 Crawler (IPS Robot, 2017)</b>	<b>R300T3 (ID-tec, 2017)</b>	<b>ARI-100 (Robotics Design, 2017)</b>
<b>Modelo</b>	S-100 Crawler	R300T3	ARI-100
<b>Función</b>	Inspección de alcantarillado	Inspección de alcantarillado	Inspección de alcantarillado
<b>Sistema de locomoción</b>	6 ruedas (3 a cada lado)	4 ruedas (2 a cada lado)	Orugas
<b>Peso</b>	Aprox. 7 kg	Aprox. 7 kg	Aprox. 8 kg
<b>Iluminación</b>	14 luces led.	2 luces led.	1 luz led.
<b>Dimensión</b>	ø 90mm	L650 x B170 x H170 mm	115. x 5.0 x 8.5 (pulgadas)
<b>Alimentación</b>	Cableado externo	Batería interna	Batería interna
<b>Distancia recorrida</b>	120 m hasta 300 m	Sin especificar	100 pies
<b>Clase de protección</b>	IP 68	IP 68	Sin especificar
<b>Cámaras</b>	Si	Si	Si
<b>Tipo de control</b>	Inalámbrico	Inalámbrico	Inalámbrico
<b>Adicionales</b>	Protección contra explosiones (opcional)	Limpieza de tuberías	Limpieza de tuberías, sistema modular
<b>Costo</b>	Sin especificar	Sin especificar	Sin especificar



**Figura 22** Robot S-100 CRAWLER  
Fuente: (IPS Robot, 2017)



**Figura 23** Robot R300T3  
Fuente: (ID-tec, 2017)



**Figura 24** Robot ARI-100  
Fuente: (Robotics Design, 2017)

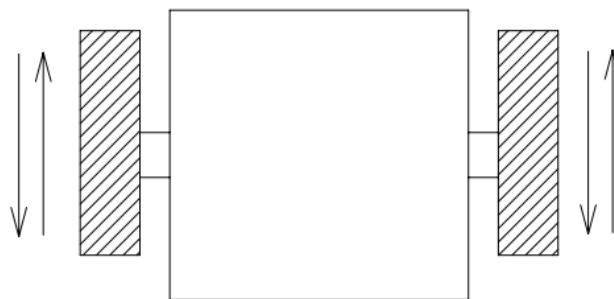


## Sistemas de locomoción para robots móviles

Locomoción hace referencia al movimiento que realiza una persona, un animal, un microorganismo, un aparato o máquina para lograr desplazarse. En la robótica los tipos de locomoción mayormente implementados son: (a) por patas, (b) ruedas, y (c) cintas de deslizamiento, el tipo de locomoción posee relación con la aplicación del robot, las características físicas, y las especificaciones a cumplir.

### 2.1.5. Locomoción diferencial

Los Robots Móviles de Locomoción Diferencial (RMLD) están conformados por un cuerpo rígido y 2 llantas fijas montadas sobre un eje en común cada una con su propio motor (ver Figura 25). El tipo de locomoción puede rotar sobre sí mismo, moverse hacia adelante o hacia atrás pero no puede moverse lateralmente sin cambiar la orientación. Las principales ventajas de estos robots son la sencillez de su diseño y la facilidad de su construcción. (Dudek & Jenkin, 2000)

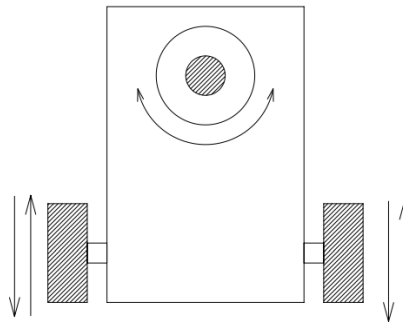


**Figura 25** Sistema Diferencial

Fuente: (Aguilar, 2012)

### 2.1.6. Locomoción Ackerman

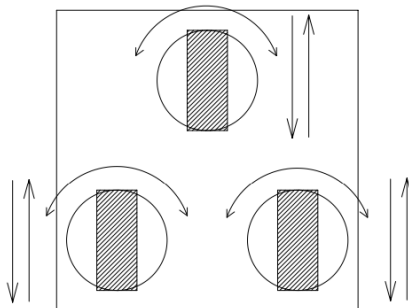
El tipo de locomoción es utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales, el cual consta con un sistema de dos ruedas con la capacidad de rotación para el direccionamiento del equipo, mientras 2 o las 4 ruedas reciben potencia para la tracción del equipo. El sistema permite al equipo cambiar de dirección sin la necesidad de rotar sobre sí mismo (ver Figura 26), la ventaja de esta configuración es la facilidad para su implementación en el código del controlador.



**Figura 26** Sistema Ackerman  
Fuente: (Aguilar, 2012)

### 2.1.7. Locomoción síncrona

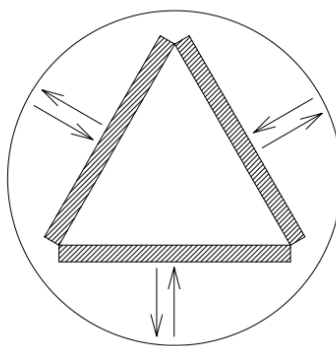
Es un sistema conformado por 3 ruedas que se movilizan sincrónicamente tanto en velocidad como en orientación (ver Figura 27), es un sistema que permite mayor libertad en el movimiento del equipo debido al uso de motores separados para rotación y traslación, además de un control simplificado. Su diseño es más complejo que los sistemas asíncronos. (Aguilar, 2012)



**Figura 27** Sistema Síncrono  
Fuente: (Aguilar, 2012)

### 2.1.8. Locomoción Omnidireccional

El sistema consta de 3 ruedas omnidireccionales (ver Figura 28). Los equipos con un sistema de locomoción omnidireccional tienen máxima maniobrabilidad en el plano, debido a que permiten un movimiento constante en cualquier dirección sin necesidad de reorientarse, requiere de un control más especializado. Debido al funcionamiento de las ruedas el movimiento en línea recta no es garantizado. (Aguilar, 2012)



**Figura 28** Sistema Omnidireccional  
Fuente: (Aguilar, 2012)

### 2.1.9. Locomoción por cintas de deslizamiento

También conocido como locomoción mediante orugas o cadenas. Las orugas se construyen uniendo una cadena que rodea las llantas del equipo (ver Figura 29), el objetivo de este sistema es aumentar la superficie de contacto entre el robot y el suelo para obtener mayor tracción, además permite sobrepasar obstáculos y en ciertas configuraciones subir escaleras. Para la realización de giro se requiere de un movimiento diferencial. (Serrano Perez, 2010)



*Figura 29* Locomoción mediante orugas

### 2.1.10. Locomoción por patas

El sistema por medio de patas se utiliza en robots para la imitación de formas de desplazamiento de animales dentro de la naturaleza, este tipo de sistema es muy complejo debido la posición y velocidad del equipo todos sus elementos, para así lograr que el robot se mantenga en equilibrio. Generalmente la aplicación del sistema se da con motores en las articulaciones de las patas, pero también se utiliza otro tipo de actuadores. (Serrano Perez, 2010)



**Figura 30** Locomoción por patas

### **Sistemas de limpieza de tuberías**

Para realización de la tarea de limpieza, se debe considerar varios factores para la selección de actuador que permita cumplir con este trabajo. Los aspectos sobresalientes son: (a) material de la tubería, (b) sección de la tubería. (c) dimensiones de la tubería, (d) estado de la tubería, (e) fluido que transporta, (f) estado del fluido, (g) temperatura, (h) humedad.

Los efectores más usados de limpieza aplicables para un mantenimiento de tuberías son:

- Aspiradora (ver Figura 31).
- Cepillos (ver Figura 32).
- Chorro de agua (ver Figura 33).
- Chorro de aire.
- Aspas.
- Taladro (ver Figura 34).
- Soplador.

Los diferentes tipos de actuadores tienen como objetivo remover partículas sólidas dentro de la tubería, basados en diferentes tipos de fundamentos para la limpieza. En Tabla 4, se presentan efectores para la limpieza de tuberías, el funcionamiento y requerimiento de cada uno.

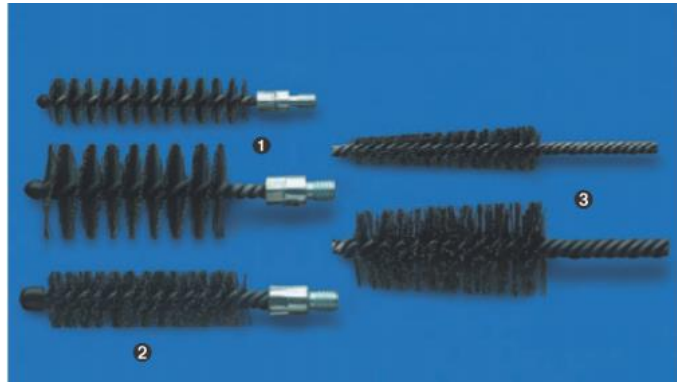
**Tabla 4**

*Tipos de efectores de limpieza*

<b>Efector</b>	<b>Funcionamiento</b>	<b>Requiere</b>
Aspiradora	Utiliza una bomba de aire para aspirar el polvo y otras partículas pequeñas de suciedad.	Bomba de Aire
Cepillos	Elemento conformado por cerdas que permite el desplazamiento de partículas. Existen varias configuraciones, cepillos planos, radiales, cilíndricos, circulares y escobillones.	Cepillos
Chorro de Agua	Sistema de limpieza en el cual las partículas se adhieren al fluido y se desprenden de la superficie por la alta velocidad del fluido.	Toma de agua, Compresor, Tanque de Almacenamiento
Chorro de Aire	Sistema de limpieza en el cual las partículas se desprenden de la superficie por la alta velocidad del fluido	Compresor, Tanque de Almacenamiento
Aspas	el conjunto de aspas rotativas permite la eliminación de solidos por medio de fricción y separación del solido en fragmentos.	Aspas, Motor
Taladro	Su funcionamiento busca perforar los sólidos de obstrucción reduciéndolos en solidos más pequeños y manejables.	Brocas, Motor
Soplador	Utiliza una bomba de aire para expulsar el polvo y otras partículas pequeñas de suciedad.	Bomba de aire



**Figura 31** Robot aspiradora  
Fuente: (iRobot, 2017)



**Figura 32** Tipos de cepillos de limpieza de tuberías  
Fuente: (Lessmann, 2017)



**Figura 33** Robot para limpiar tuberías usando chorro de agua  
Fuente: (Hokuryo, 2017)



**Figura 34** Robot para limpiar tuberías con taladro

Fuente: (Environmental Expert, 2017)

## Resumen

Los robots móviles son dispositivos de transporte dotado con cierto nivel de autonomía concebidos en los años 40s. Su objetivo es reemplazar la presencia de operadores en tareas riesgosas o nocivas para la salud humana. Las aplicaciones de los robots móviles comprenden: (a) agricultura, (b) transporte de cargas, (c) exploración, (d) inspección, (e) tareas militares, entre otras.

La clasificación más común para los robots móviles, es según el medio en el que se transporta: (a) terrestres, (b) Aéreos y (c) acuáticos. Los robots terrestres son dispositivos terrestres no tripulados, con un tipo de locomoción por: (a) ruedas, (b) orugas, (c) patas y (d) ápoda.

Los robots aéreos son robots que se trasportan por aire. Sus aplicaciones varían en la entrega de suministros, turismo, entretenimiento, búsqueda, rescate y aplicaciones militares. Los robots aéreos se clasifican en: (a) despegue vertical y (b) despegue horizontal.

Los robots acuáticos, son dispositivos que viajan a través de un fluido líquido. Se clasifican en: (a) vehículos marinos (viajan sobre el fluido) y (b) vehículos submarinos (viajan dentro del fluido). Las aplicaciones más usadas para los robots marinos son: (a) monitoreo, (b) inspección, (c) recolección de muestras, (d) rescate entre otras.



Una de las aplicaciones de los robots móviles se encuentra en el campo industrial para el mantenimiento de tuberías. Dentro de la aplicación de mantenimiento los robots pueden ser clasificados en: (a) robots de limpieza, (b) robots de inspección y (c) robots híbridos. Los robots híbridos en el campo de tuberías son aquellos con la capacidad de inspección y limpieza.

Los sistemas de locomoción hacen referencia al movimiento en que un ser vivo o artificial se desplaza. En la robótica existen los siguientes tipos de locomoción: (a) por patas, (b) ruedas, y (c) cintas de deslizamiento. La locomoción por ruedas se divide en: (a) locomoción diferencial, (b) locomoción Ackerman, (c) locomoción síncrona y (d) locomoción omnidireccional, las cuales muestran el tipo de configuración para la tracción y dirección de las ruedas.

Los sistemas de limpieza para tuberías son el conjunto de equipos o mecanismos que permiten la limpieza en una tubería. Los más destacados son los sistemas de: (a) aspiradora, (b) cepillos, (c) chorro de agua, (d) chorro de aire, (e) aspás, (d) taladro y (e) soplador. El objetivo de los sistemas de limpieza es movilizar las partículas sólidas y expulsarlas de la tubería.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO MECATRÓNICO**

El presente capítulo se enfoca en el diseño mecatrónico de un prototipo de robot móvil para la limpieza e inspección de tuberías. Se explica el funcionamiento de la matriz QFD (por sus siglas en inglés Quality Function Deployment), las necesidades del cliente, las características técnicas y la relación de ellos entre sí. Se plantean varias alternativas de conceptos para la aproximación al diseño de cada uno de los elementos del proyecto estableciendo ventajas y desventajas, seleccionando la mejor opción. Posteriormente se procede a dimensionamiento, análisis de elementos mecánicos y electrónicos que conforman al proyecto.

#### **3.1. Matriz de la Calidad**

El despliegue de la función de calidad (o QFD, por sus siglas inglesas) es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operativas satisfactorias (Yacuzzi, 2003).

##### **3.1.1. Definición de necesidades**

El QFD contribuye a integrar estas áreas y actividades, descubriendo las necesidades de los clientes, orientando la integración de equipos de diseño y fabricación de productos, y, en un proceso de mejora continua, respondiendo a los requerimientos del mercado con costos decrecientes,

menores plazos para el lanzamiento de nuevos productos y otros criterios competitivos (Yacuzzi, 2003).

En la Tabla 5 se establecen necesidades que permiten determinar un punto inicial para el diseño de un robot móvil para la limpieza e inspección de tuberías, con el objetivo de generar conceptos factibles, escogiendo el más adecuado, brindando una solución funcional, eficiente y económica.

**Tabla 5**

*Necesidades del cliente*

No	Necesidad
1	Robusto
2	Diámetro variable
3	Compacto
4	Observación en tiempo real
5	Larga durabilidad
6	Teleoperar a largas distancias
7	HMI amigable al usuario
8	Versátil
9	Fácil acceso a repuestos (Mantenimiento)
10	Fácil manejo del robot
11	Económico

### 3.1.2. Definición de las características técnicas

En la Tabla 6, se presenta las especificaciones técnicas que se consideraron importantes para el cumplimiento de las necesidades establecidas por el cliente. Las especificaciones determinadas serán utilizadas como lineamiento guía para la generación del diseño para el proyecto.

**Tabla 6***Especificaciones técnicas*

No	Especificaciones Técnicas
1	Resistencia de materiales
2	Tipo de locomoción
3	Tipo de comunicación
4	Alimentación eléctrica
5	Circuito de potencia
6	Tipo de control
7	Uso de software libre para el control
8	HMI normalizado
9	Actuador de limpieza

### 3.1.3. Matriz QFD

Con las especificaciones técnicas y las necesidades del cliente establecidas previamente se procede a la elaboración de la matriz QFD (ver Figura 35), estableciendo la relación entre ellos y la importancia de cada uno de ellos.



Leyenda			
Relación		Interacción	
Muy correlacionado	9	Alta interacción	++
Correlacionado	3	Baja Interacción	+
Poco Relacionado	1	Ninguna	
Ninguno	0		

*Figura 36* Leyenda de la matriz QFD

**Tabla 7**

*Resultados de la matriz QFD*

Hito	Especificación técnica	Puntuación
1	Actuador de limpieza	145
2	Resistencia	141
3	Tipo de locomoción mecánica	127
4	Software libre para el control	126
5	Circuito de potencia	97
6	Tipo de comunicación	90
7	Tipo de control eléctrico y digital	82
8	HMI normalizado	81
9	Alimentación eléctrica	58

## 3.2. Factibilidad y planeación

### 3.2.1. Estructura funcional

Los resultados de la matriz de la calidad, son 6 subsistemas: (a) Estructura y locomoción, (b) Actuador de limpieza, (c) Alimentación Eléctrica y recuperación, (d) Inspección, (e) Control y (f) Comunicación. Cada subsistema y las funciones que cada uno cumple se indican en la Tabla 8 junto con los hitos de obtenidos de la matriz QFD.

**Tabla 8***Subsistemas del diseño*

No	Subsistema	Funciones	Hitos
1	Estructura y locomoción	Transportar el robot dentro de una tubería.	2,3,4,5,7
2	Actuador de limpieza	Eliminación de obstrucción de sólidos, limpieza de tubería.	1,2,4,5,7
3	Alimentación Eléctrica y recuperación	Suministra la energía eléctrica al robot.	2,5,6,9
4	Inspección en tiempo real	Captura de imágenes en tiempo real.	4,5,6,7
5	Componentes eléctricos	Conexión entre actuadores y controlador	1,5,6,9
6	Comunicación	Comunica el control central con el robot, contiene HMI.	4,5,6,7,8
7	Control	Control del sistema, adquisición de datos, envío y recepción de señales, sensores.	4,5,6,7

Para el diseño del robot de limpieza se dividió en varios subsistemas, permitiendo un diseño modular. Los subsistemas del robot son: (a) estructura y locomoción, (b) actuador de limpieza, (c) alimentación eléctrica y recuperación, (d) inspección, (e) control y (f) comunicación. Los subsistemas permiten cumplir los hitos previamente obtenidos y un diseño independiente entre subsistemas.

### 3.3. Subsistema: Estructura y locomoción

El subsistema de estructura y locomoción es el encargado del soporte, transporte y direccionamiento del robot. Requiere una estructura que soporte cargas y permita minimizar vibraciones, establecido por dos segmentos y un dispositivo de conexión entre ambos. Un mecanismo de tracción para el movimiento, además de un sistema para el direccionamiento del robot dentro de una tubería.

Para el diseño del sistema de estructura y locomoción del robot se planearon 3 conceptos para su selección. Los conceptos buscan el implemento de diferentes ideas en aspectos como: (a) forma, (b) tipo de locomoción, (c) mecanismo de direccionamiento, (d) sujeción de locomoción entre otras.

El concepto 1 (ver Figura 37) es una estructura conformada de dos cuerpos unidos entre sí por una junta de dos grados de libertad. Cada cuerpo se encuentra conformado por un eje principal, el cual soporta y conforma el mecanismo de apoyo para la locomoción por ruedas. El mecanismo biela-manivela sirve de soporte al motor y permite un cambio de diámetro del robot por medio del desplazamiento de un anillo parte del mecanismo en el eje como corredera. El mecanismo se estabiliza por medio de un resorte que fuerza al robot a su diámetro máximo, permitiendo así que las ruedas siempre estén en contacto con la superficie de la tubería PVC. Debido a la forma de diamante de cada cuerpo facilita el giro dentro de la tubería.



**Figura 37** Concepto 1 (Eje)

En la Tabla 9, se puede observar una tabla comparativa entre ventajas y desventajas del concepto 1, estableciendo parámetros como: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) diámetro variable, (e) mantenimiento, (f) facilidad de giro.



**Tabla 9***Ventajas y desventajas del Concepto 1*

Concepto 1	
Ventajas	Desventajas
Diámetro variable	Susceptible a bloqueos de mecanismo
Fácil giro dentro de tubería	Mecanismo requiere protección
Ligero	
Fácil manufactura	

El concepto 2 (ver Figura 38), presenta un cuerpo en forma de tubo, conformado por perfiles cuadrados doblados estableciendo una estructura circular. El robot está diseñado con un sistema de locomoción a través de orugas, separadas a  $120^\circ$  con el objetivo de ubicar al robot siempre en el centro de la tubería. El sistema de orugas está formado por 2 rodillos templadores, siendo uno de ellos quien transmite el movimiento a través de cintas de deslizamiento y 2 rodillos guía que están en contacto directo con la tubería. El cuerpo del robot está conformado por 2 planchas metálicas pequeñas y 2 planchas grandes, formando el diseño circular del robot. Para su mantenimiento, las 2 planchas pequeñas permiten moverse a través del uso de bisagras. El robot presenta limitantes como: (a) diámetro variable, (b) facilidad de giro. Debido al peso del robot, para ayudar al sistema de locomoción, se establece un mecanismo de juego de engranes con el objetivo de transmitir el torque a las cintas de deslizamiento y reducir la velocidad con la que se mueve el robot.

**Figura 38** Concepto 2 (Circular)

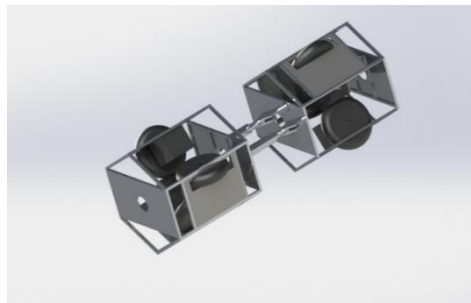
En la Tabla 10, se puede observar una tabla comparativa entre ventajas y desventajas del concepto 2, estableciendo parámetros como: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) diámetro variable, (e) mantenimiento, (f) facilidad de giro.

**Tabla 10**

*Ventajas y desventajas del Concepto 2*

Concepto 2	
Ventajas	Desventajas
Ligero	Diámetro fijo
Costo	Incapaz de girar en tubería
Fácil mantenimiento	Difícil manufactura

El concepto 3 (ver Figura 39) es una estructura conformada por dos cuerpos unidos entre sí por medio de dos ejes telescópicos, los cuales permiten el giro del cuerpo en un grado de libertad. Cada cuerpo está conformado por una estructura hexagonal elaborada por barras cuadradas. Cada cuerpo contiene tres conjuntos de motores y ruedas para su locomoción, los cuales se encuentran posicionados en 3 de las caras no adyacentes entre sí del hexágono. Los cuerpos se encuentran cubiertos por placas para la seguridad de los componentes internos.



**Figura 39** Concepto 3 (Hexágono)



Se compara los 3 conceptos entre sí. La comparación de los conceptos por criterio individual se encuentra en las Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18.

**Tabla 13**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Manufactura”*

Manufactura	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	0	1	0.06
Concepto 3	0	5	-	6	0.33
<b>Total</b>				18	1.00

**Tabla 14**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Costo”*

Costo	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	0	1	0.06
Concepto 3	0	5	-	6	0.33
<b>Total</b>				18	1.00

**Tabla 15**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Peso”*

Peso	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	0	1	0.06
Concepto 3	0	5	-	6	0.33
<b>Total</b>				18	1.00

**Tabla 16**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Diámetro variable”*

Diámetro Variable	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	0	1	0.06
Concepto 3	0	5	-	6	0.33
<b>Total</b>				18	1.00

**Tabla 17**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Mantenimiento”*

Mantenimiento	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	2.5	3.5	0.19
Concepto 3	0	2.5	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18	1.00

**Tabla 18.**

*Ponderación de tipos de estructuras utilizando el criterio de “Facilidad de giro”*

Facilidad de Giro	Concepto 1	Concepto 1	Concepto 3	Suma + 1	Ponderación
Concepto 1	-	5	5	11	0.61
Concepto 2	0	-	2.5	3.5	0.19
Concepto 3	0	2.5	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18	1

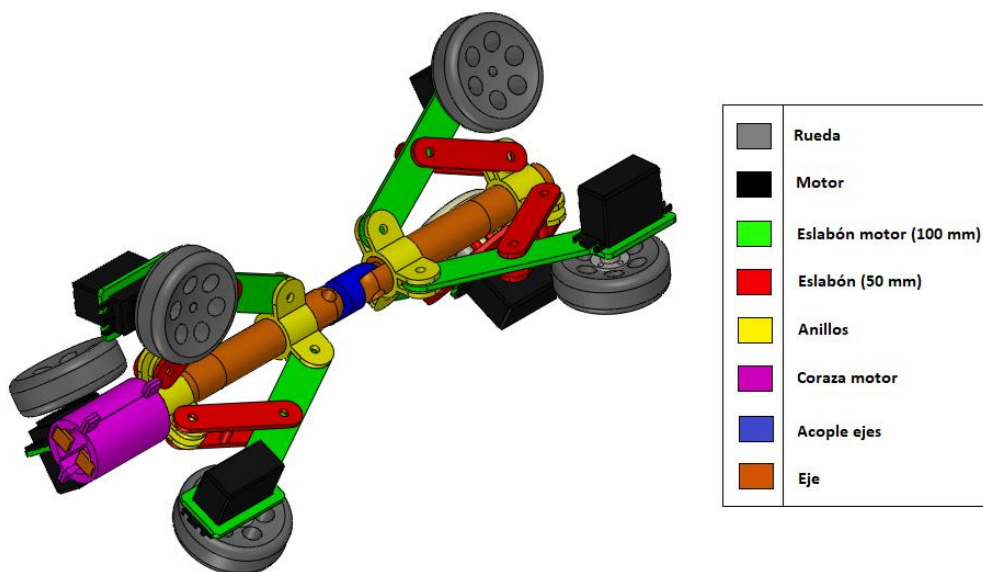
En la Tabla 19 se encuentran los resultados de la selección de conceptos. El concepto más adecuado para el diseño es el concepto 1 (Eje). Permite procesos de manufactura sencillos, es ligero, posee la capacidad de diámetro variable, además de facilidad en el giro.

**Tabla 19**

*Conclusión de la selección del tipo de estructura del robot*

	Manufactura	Costo	Peso	Diámetro Variable	Mantenimiento	Facilidad de Giro	Suma	Prioridad
<b>Concepto 1</b>	0.08	0.10	0.16	0.05	0.12	0.10	0.61	1
<b>Concepto 2</b>	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.11	3
<b>Concepto 3</b>	0.05	0.06	0.09	0.02	0.04	0.03	0.28	2
<b>Total</b>							1	

El diseño seleccionado concepto 1 (ver Figura 40), permite al robot movilizarse dentro de una tubería de 200 mm de diámetro manteniendo una estructura ligera. El diseño se conforma de dos cuerpos. Cada cuerpo se conforma de un eje principal conformado por un tubo de 20 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor.



**Figura 40** Diseño del concepto seleccionado

En el eje se incorporan 2 anillos con placas separadas a  $120^\circ$  para la sujeción de eslabones. En cada cuerpo un anillo se encuentra fijo al eje y el otro es móvil. Cada anillo se encuentra unido a 3 eslabones del mismo tipo por medio de pasadores, mientras que los eslabones están unidos entre si formando un mecanismo biela-manivela (ver Figura 41). Cada cuerpo contiene 3 mecanismos biela-manivela.



**Figura 41** Diseño del cuerpo del robot

El mecanismo biela-manivela, permite a las 3 ruedas de cada cuerpo mantenerse siempre a una misma distancia entre ellas. Cada mecanismo se conforma de 2 eslabones (15 mm ancho, 3 mm espesor), 2 anillos (fijo y móvil), un eje y un resorte. El mecanismo asegura la equidistancia de las ruedas entre si además de contacto con la superficie de la tubería.

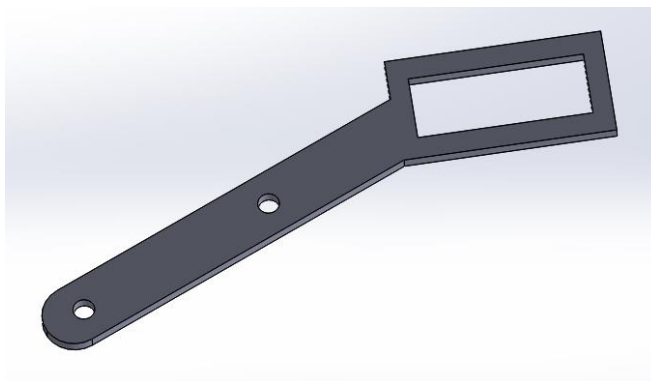
Los cuerpos se encuentran unidos entre sí por medio de un resorte de 0.01962 Nm. Permite a los cuerpos girar en la tubería y hacer que los ejes de los cuerpos estén siempre en el centro de la tubería. Se puede observar en la Figura 42.



**Figura 42** Junta del robot

Para la locomoción del robot se utiliza servomotores LW-20MG con capacidad de torque de 20 Kg/cm a 6,0 V. Se requieren de 6 motores localizados en cada uno de los eslabones ternarios del mecanismo biela-manivela. (ver Figura 43)






*Figura 43* Motor en biela

### **Análisis del movimiento del mecanismo para la locomoción**

El análisis de movimiento de un mecanismo consiste en determinar el número de eslabones y nodos que están presentes en la cadena cinemática. Para el análisis de movimiento, se establece un diagrama cinemático (también conocido como esqueleto cinemático), el cual es una representación gráfica del mecanismo en 2 dimensiones, determinando el número de eslabones y nodos presentes en la cadena cinemática, considerando los movimientos relativos. En la Tabla 20 se puede observar los diferentes tipos de eslabones.

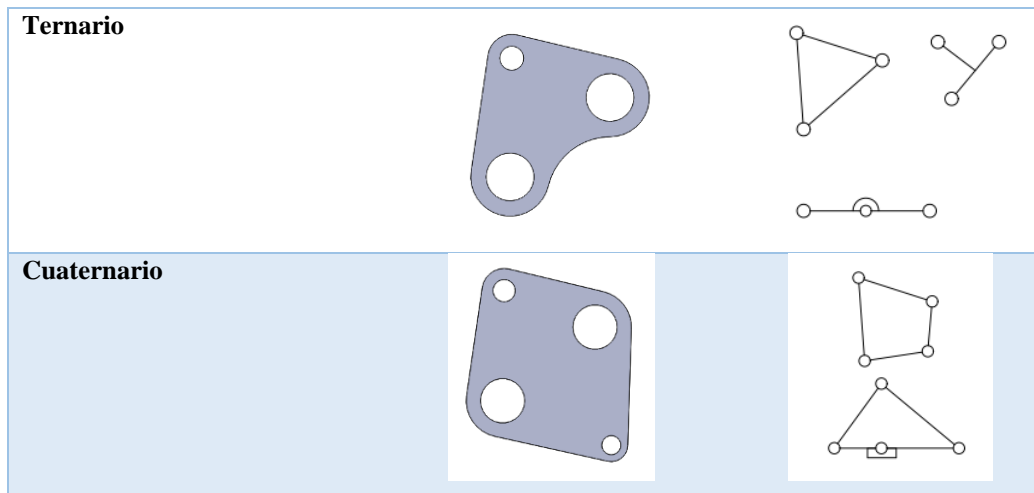
**Tabla 20**

*Tipos de eslabones planos*

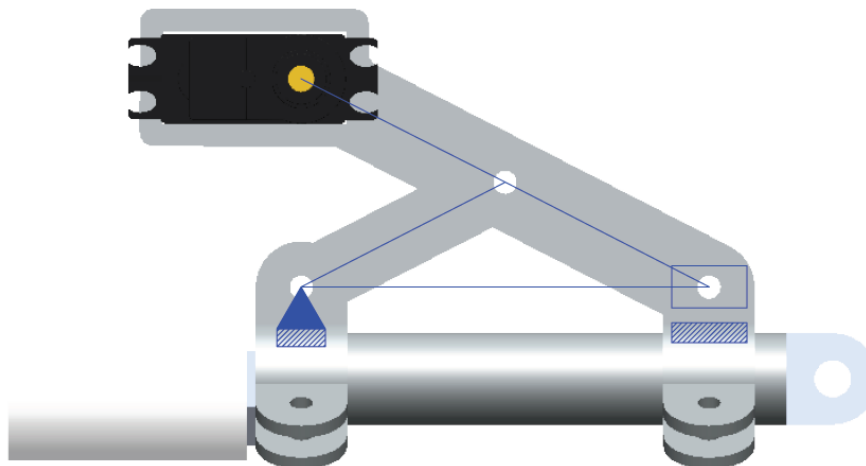
Tipos de eslabón	Forma típica	Diagrama esquelético
<b>Binario</b>		

CONTINÚA





Para la locomoción se diseñó un mecanismo con 4 barras y un pasador, permitiendo al mecanismo adaptarse a las irregularidades dentro de las tuberías como consecuencia de la limpieza de sólidos. El uso de un resorte será importante para ubicar al mecanismo en su estado natural, en dónde la rueda tendrá contacto directo a la pared interna de la tubería. En la Figura 44, se puede observar la representación esquelética del mecanismo.



**Figura 44** Representación esquelética del mecanismo

Los grados de libertad se pueden determinar a través de la ecuación de Gruebler modificada o Kutzbach (ver 3.1).

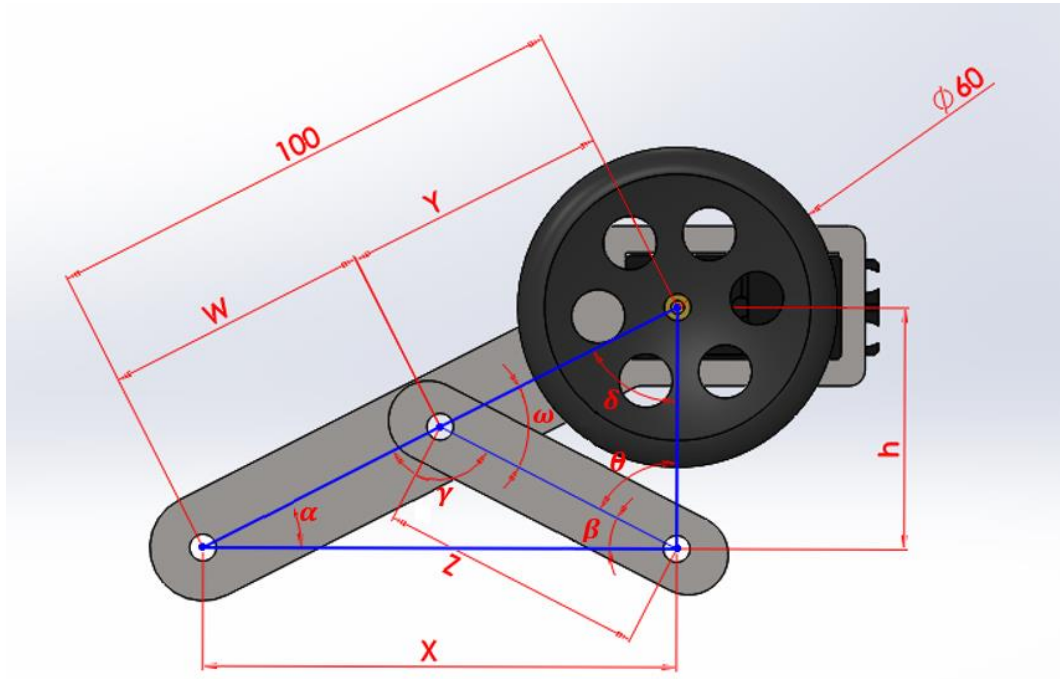
$$M = 3 \cdot (L - 1) - 2 \cdot J_1 - J_2 \quad (3.1)$$

Utilizando la Ecuación (3.1, se procede a determinar Figura 44),  $J_1$  es 4 (considerando las letra de la figura anterior),  $J_2$  es 0 del mecanismo de locomoción, L es 4 del número de eslabones y donde M es el grado de libertad.

$$M = 3(4 - 1) - 2(4) - 0 = 1$$

El mecanismo para la locomoción presenta 1 grado de libertad. Para el dimensionamiento de los eslabones, se establece un diagrama cinemático considerando los valores fijos y variables. Los valores fijos corresponden a la medida del largo del eslabón. Los valores variables, corresponden a distancias que recorren los eslabones y los ángulos que se forman entre 2 ellos.

En el diseño se debe considerar dos estados en el sistema. El primer estado se establece cuando la rueda topa directamente con la tubería, generando un desplazamiento mínimo entre los anillos que mueven los eslabones del mecanismo. El segundo estado se lo considera cuando existe un desplazamiento vertical de 10 mm entre la superficie de rueda y la pared interna de la tubería debido sólidos que van a ser limpiados. Además en este estado existirá un desplazamiento entre los anillos. El mecanismo puede ser visualizado en la Figura 45.



**Figura 45** Esquema del mecanismo de tracción

Con los datos de 100mm entre puntos extremos en el eslabón del motor del mecanismo, y la altura h conocida se determina la distancia X mínima necesaria para el mecanismo.

$$\text{lado adyacente} = X_{\min} = 89.03 \text{ mm}$$

En el estado 2 del mecanismo, el radio de la rueda se encuentra a 10 mm de la pared interna de la tubería. Habiendo conocido los valores de las longitudes de los eslabones, se puede conocer el desplazamiento máximo entre anillos ( $X_{\max}$ ).

$$X_{\max} = 93.67 \text{ mm}$$

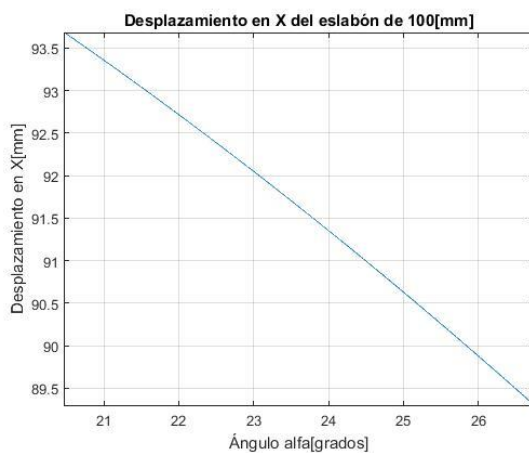
Al ser un triángulo rectángulo, se puede conocer los ángulos  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta, \omega$ , aplicando seno, coseno y ángulos complementarios. La distribución de los ángulos se la puede observar en el la Figura 45. En la Tabla 21, se encuentran los valores de los variables en los Estados 1 y 2.

**Tabla 21**

*Comportamiento de las variables ángulos y distancias en el Estado 1 y Estado 2*

Variable	Estado 1	Estado 2
$\alpha$	26.74°	20.48°
$\beta$	26.74°	20.48°
$\gamma$	126.52°	139.04°
$\delta$	63.26°	69.52°
$\theta$	63.26°	69.52°
$\omega$	53.48°	40.96°
$h$	45 mm	35 mm
$X$	89.03 mm	93.67 mm
$W$	50 mm	50 mm
$Y$	50 mm	50 mm
$Z$	50 mm	50 mm

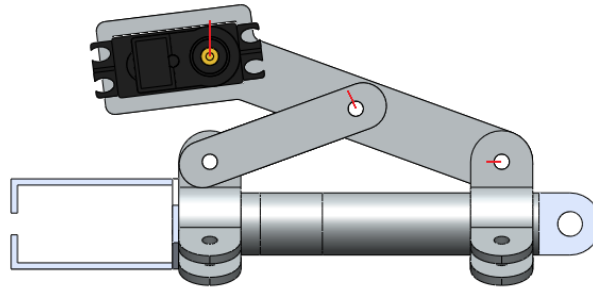
En la Figura 46, se muestra la relación de distancia entre los anillos de sujeción del mecanismo y el ángulo  $\alpha$  del mecanismo.



**Figura 46** Variación del desplazamiento entre anillos

El análisis de la trayectoria de los eslabones del mecanismo es de fundamental importancia, debido a que permitirá conocer cómo se desplazan cada eslabón y poner encontrar posibles fallos

o bloqueos del sistema. En la Figura 47, se puede observar el desplazamiento de los eslabones, siendo representados por líneas rectas y la rueda como una circunferencia ubicada en la parte superior izquierda.

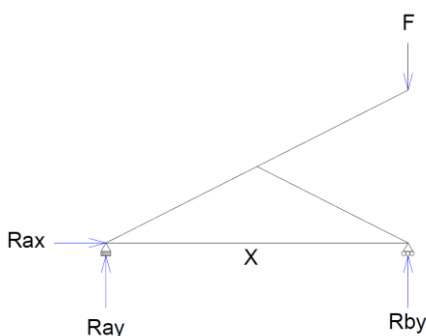


**Figura 47** Descripción del movimiento de cada eslabón en el mecanismo

### **Análisis del mecanismo en su posición máxima**

En siguiente es un análisis de esfuerzos y fuerzas del mecanismo de locomoción para el posicionamiento de las ruedas. En el análisis actual se realizan los cálculos considerando fuerza sobre el motor de 100 N, así mismo como un desplazamiento  $X_{min}$  de 89,3 mm.

Para el análisis del mecanismo se procede al análisis estático del mismo considerando como fuerza  $F$  que soportará el sistema de 100 N (ver Figura 48). Se obtienen las reacciones del mecanismo.



**Figura 48** Diagrama de fuerzas externas sobre el mecanismo de locomoción

En la Tabla 22, se muestra los valores de las reacciones y las fuerzas que intervienen en el sistema de locomoción en los Estado 1 y Estado 2.

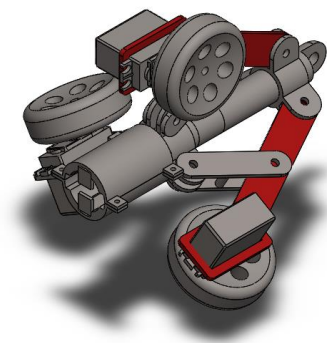
**Tabla 22**

*Comportamiento de las fuerzas en el Estado 1 y Estado 2*

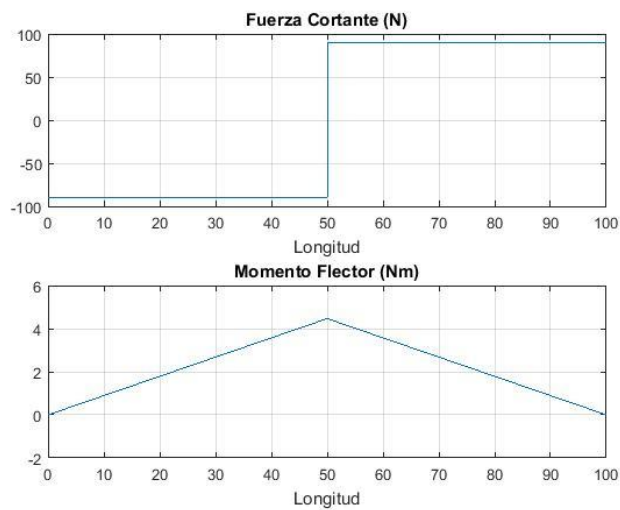
Fuerza	Estado 1	Estado 2
<b><i>R<sub>ay</sub></i></b> [N]	0.00	0.00
<b><i>R</i></b> [N]	198.44	267.62
<b><i>T</i></b> [N]	222.21	285.70
<b><i>F</i></b> [N]	100.00	100.00
<b><i>R<sub>by</sub></i></b> [N]	100.00	100.00

### 3.3.1. Eslabón motor

Para el análisis de esfuerzos del eslabón del motor (ver Figura 49) se obtiene los diagramas de distribución de fuerzas y momentos como se muestra en la Figura 50. Determinamos el punto crítico en la mitad del eslabón a 50 mm.



**Figura 49** Eslabón motor



**Figura 50** Fuerza Cortante y Momento Flector de Eslabón motor

Se procede al cálculo de esfuerzo en flexión del eslabón del motor utilizando la Ecuación (3.2).

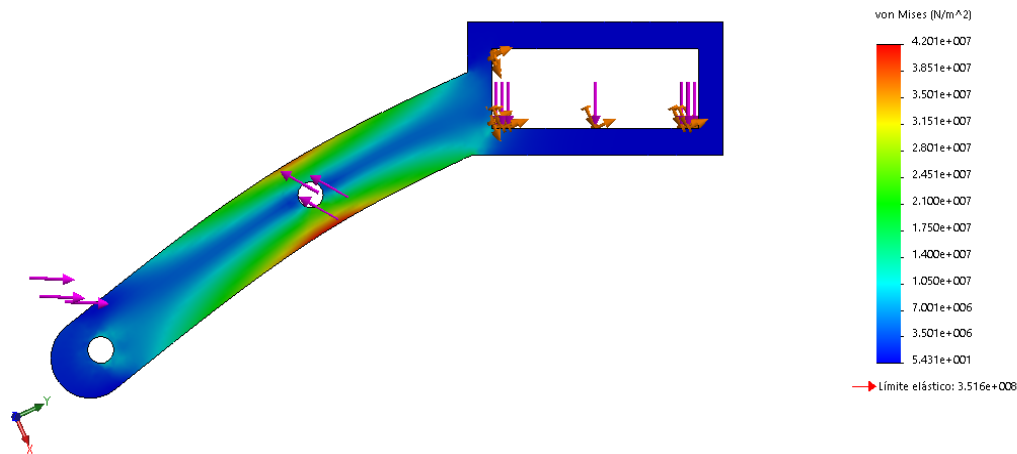
$$\sigma_f = \frac{M \cdot \left(\frac{5}{1000}\right)}{\left(\frac{1}{12}\right) \cdot \left(\frac{3}{1000}\right) \cdot \left(\frac{10}{1000}\right)^3} = 39.60 \text{ MPa} \quad (3.2)$$



$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{39.6 \text{ MPa}} = 8.89$$

Se obtiene un factor de seguridad de 8.89 para el eslabón de motor utilizando acero ASTM 1020.

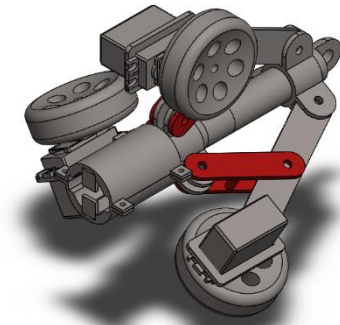
Se realiza el análisis de esfuerzos mediante un software (ver Figura 51).



**Figura 51** Análisis de Esfuerzos Eslabón de 100mm

### 3.3.2. Eslabón

En el análisis de esfuerzos para el eslabón 2 (ver Figura 52). Se considera al eslabón trabajando a compresión, se analiza la compresión en su concentrador de esfuerzo (agujero). Para determinación del esfuerzo con concentrador de esfuerzo se utiliza la constante  $K_t$  obtenida de la Figura A-15 del libro “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” (Budynas & Nisbett, 2012)



**Figura 52** Eslabón pequeño

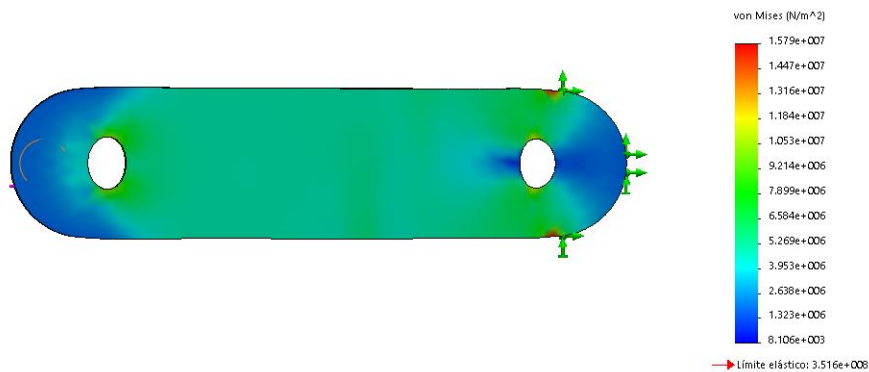
$$Kt = 2.3$$

$$\sigma_c = Kt \cdot \left( \frac{T}{\frac{15-5}{1000} \cdot \frac{3}{1000}} \right) = 17.03 \text{ MPa} \quad (3.3)$$

$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{17.03 \text{ MPa}} = 20.60$$

Se obtiene un factor de seguridad de 20.6 para el eslabón de motor utilizando acero ASTM 1020.

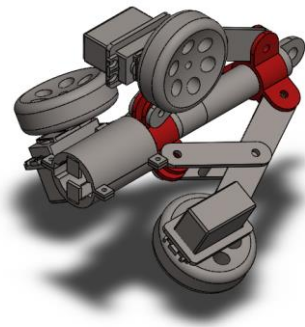
Se realiza el análisis de esfuerzos mediante un software. (ver Figura 53)



**Figura 53** Análisis de Esfuerzos Eslabón de 50mm

### 3.3.2. Placa Anillo

Para el análisis del factor de seguridad en la placa del anillo (ver Figura 54) del mecanismo se utiliza la constante de concentración de esfuerzos  $K_t$ , así como el cálculo de esfuerzo de von-Mises. (ver Ecuación 3.4)

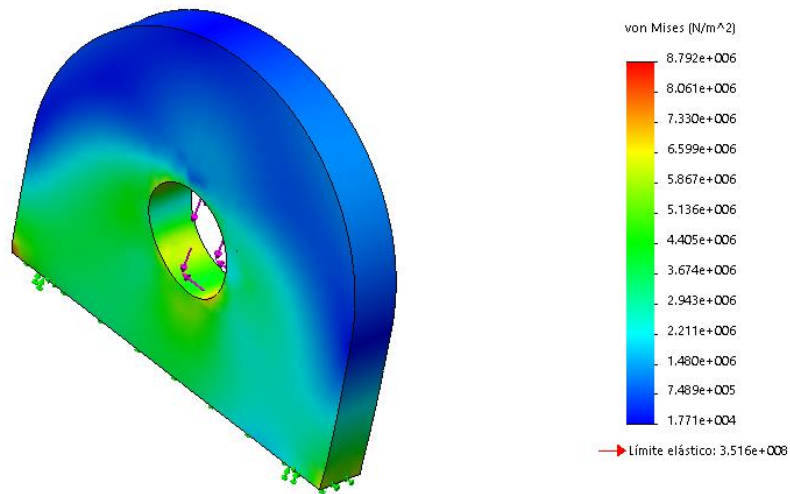


**Figura 54** Placa del anillo

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 8.87 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{8.87 \text{ MPa}} = 39.56$$

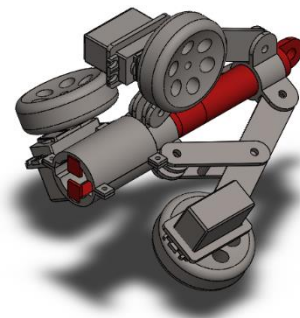
Se obtiene un factor de seguridad para la placa del anillo de 39,56. Se realiza el análisis de esfuerzos mediante un software. (ver Figura 55)



**Figura 55** Análisis de Esfuerzos Placa anillo

### 3.3.4. Eje

Para el análisis en el tubo circular (ver Figura 56) que conforma el cuerpo se analiza la reacción que recibe el mecanismo, debido a la conformación del sistema por medio de 3 mecanismos desfasados se analiza con 3 fuerzas de 100 N radiales separadas 120° entre sí.

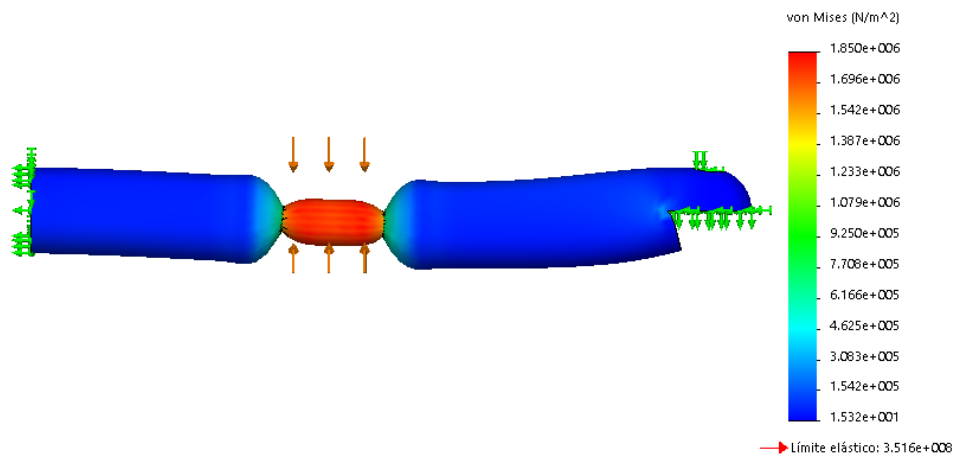


**Figura 56** Eje circular

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 1.90 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{1.9 \text{ MPa}} = 183.53$$

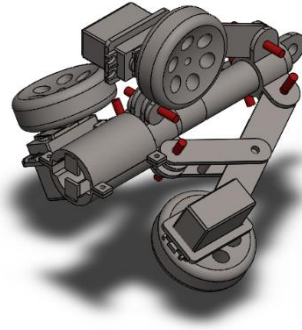
Se obtiene un factor de seguridad para el eje del cuerpo de 183,53 con la aplicación de acero ASTM 1020. Se realiza el análisis de esfuerzos mediante un software. (ver Figura 57)



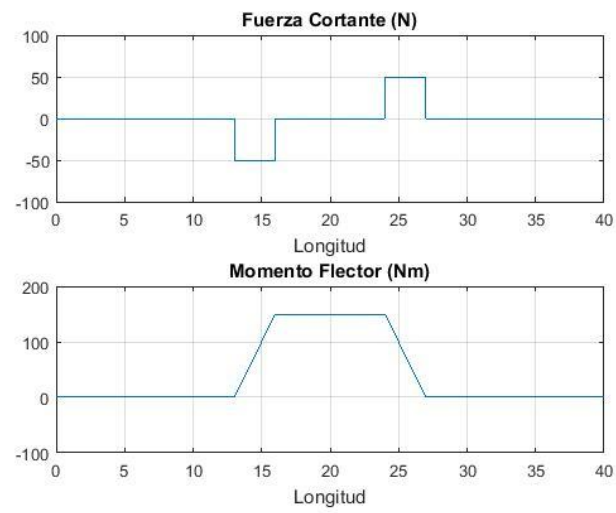
**Figura 57** Análisis de esfuerzos Eje

### 3.3.5. Pasador

Se analiza un pasador (ver Figura 58) en el nodo de anillo móvil, el pasador se considera la reacción del anillo sobre él, y la reacción del eslabón 2 (ver Figura 59).



**Figura 58** Pasador



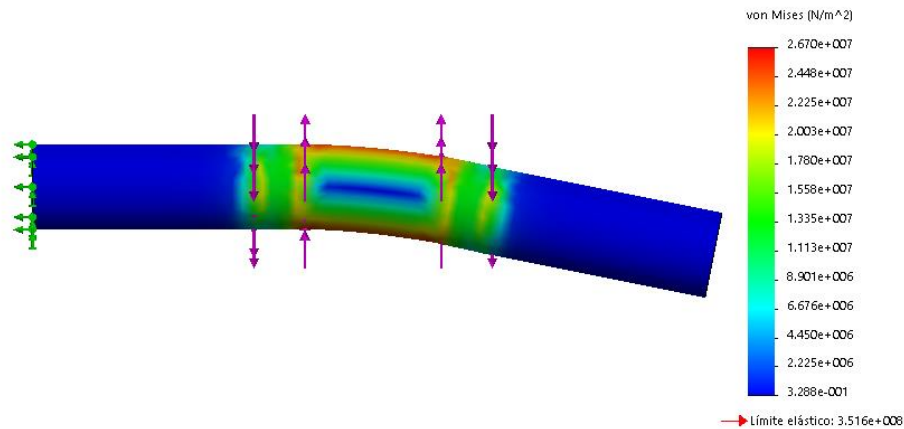
**Figura 59** Fuerza Cortante y Momento Flector del Pasador

$$\sigma_f = \frac{M \cdot \left(\frac{2.5}{1000}\right)}{\frac{\pi}{64} \cdot D^4} = 24.40 \text{ MPa} \quad (3.6)$$

$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{24.4 \text{ MPa}} = 14.35$$

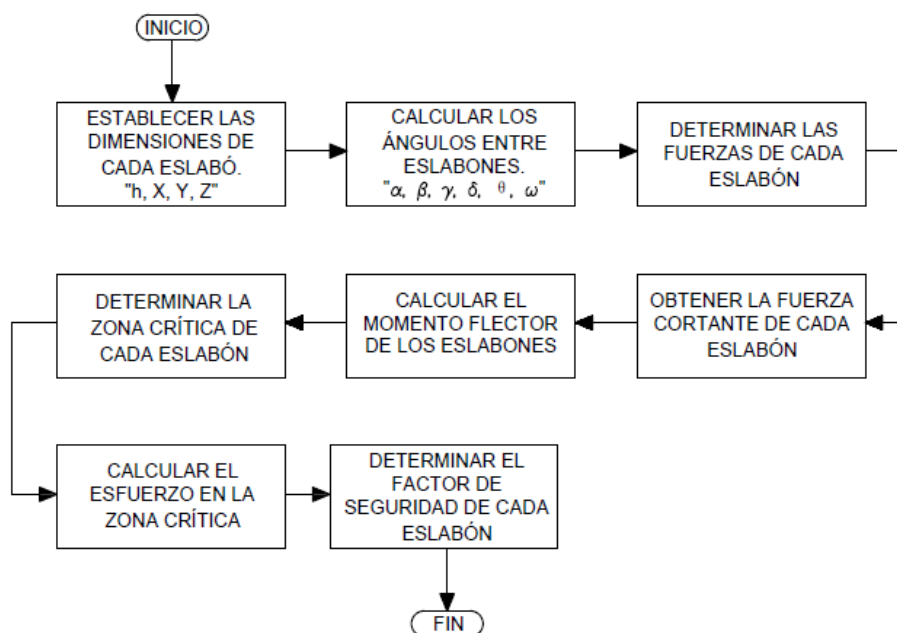
Se determinó un factor de seguridad en el pasador de 14,35 si se aplica el material ASTM 1020.

Mediante un software se realiza el análisis de esfuerzos. (ver Figura 60).



**Figura 60** Análisis Esfuerzos del Pasador

Los cálculos realizados anteriormente corresponden al estado 1 del mecanismo considerando su desplazamiento mínimo. En el estado 2 se presentan los resultados utilizando las ecuaciones del estado 1, siguiendo el procedimiento para obtener las distancias de eslabones, ángulos entre eslabones, fuerzas de los eslabones, fuerzas cortantes, momentos flectores y factores de seguridad (ver Figura 61).



**Figura 61** Procedimiento para hallar fuerzas cortantes y momentos flectores

En la Tabla 23, se presentan los resultados del esfuerzo crítico y el factor de seguridad de cada elemento del mecanismo, considerando el desplazamiento mínimo de la rueda con respecto al eje del robot.

**Tabla 23.**

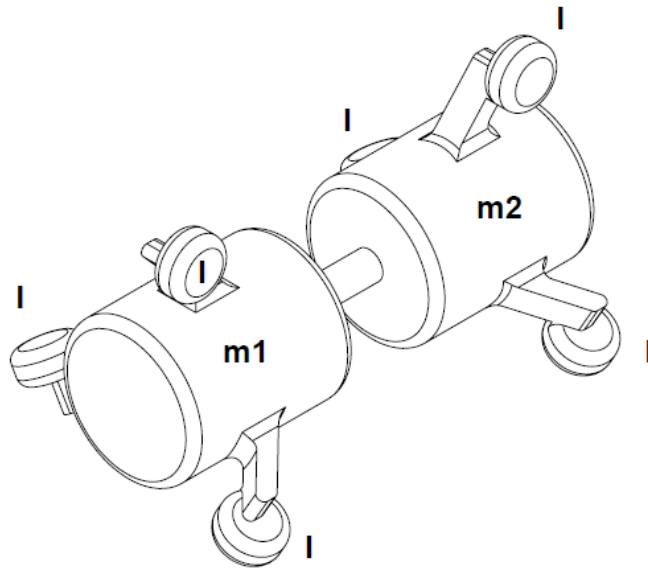
*Resultados de esfuerzo crítico y factor de seguridad en el desplazamiento mínimo de la rueda*

Análisis Desplazamiento mínimo		
Parte	Esfuerzo Crítico [MPa]	Factor de Seguridad
Eslabón Motor	41.67	8.43
Eslabón	21.90	16.02
Anillos	12.22	28.71
Pasador	24.40	14.35
Eje	1.90	183.50



### 3.3.6. Cálculo Energías de locomoción

El diagrama (ver Figura 62) es un esquema del sistema de locomoción para la determinación de potencia necesaria para la selección de motores. El sistema consta de dos masas impulsadas por 6 motores. La masa 1 consta de 5 Kg mientras que la masa 2 de 3 Kg.



**Figura 62** Esquema para identificar las energías del sistema

Para el cálculo de los motores requeridos se considera una carga de 3 Kg (cable umbilical) que se opondrá a la dirección de los motores. Se procede a aplicar la ecuación de Euler-Lagrange para energías.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial x} = F \quad (3.7)$$

$$L = T - V$$

$$L = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I\left(\frac{\dot{x}}{R_{rueda}}\right)^2$$

$$\left(M + \frac{I}{R_{rueda}^2}\right)\ddot{x} = 6 \cdot F_{motor} - F_{cable}N$$

$$I = 6\left(\frac{1}{2}m_{rueda} \cdot R_{rueda}^2\right)$$

$$\frac{6 \cdot F_{motor} - F_{cable}}{\left(M + \frac{6\left(\frac{1}{2}m_{rueda} \cdot R_{rueda}^2\right)}{R_{rueda}^2}\right)} \geq \ddot{x}$$

$$\frac{6 \cdot \frac{T_{motor}}{R_{rueda}} - F_{cable}}{\left(M + \frac{6\left(\frac{1}{2}m_{rueda} \cdot R_{rueda}^2\right)}{R_{rueda}^2}\right)} \geq 0$$

$$T_{motor} \geq 0.147 Nm$$

Se requiere 6 generadores de torque mínimo de 0.147 Nm para movilizar la estructura de 5 Kg establecidos del robot, permitiendo superar una tensión de 29 N del cable umbilical. Para la selección de motores para el robot se establece un porcentaje de potencia de trabajo máximo del motor de 60% por lo que se requieren 6 motor de torque mínimo de 0,245 Nm.

### 3.4. Subsistema: Herramientas de limpieza

El subsistema de actuador de limpieza es el encargado de la limpieza y eliminación de obstrucciones de la tubería por medio de 2 herramientas de limpieza. La limpieza se divide en: (a)

remover sólidos y (b) limpiar la superficie interna de la tubería. Para lo cual se diseñan dos herramientas de limpieza para cada uno de los propósitos.

### 3.4.1. Herramienta de limpieza superficial

En el mercado existen robots que utilizan diferentes mecanismos para la limpieza de las tuberías. De entre ellos, se puede recalcar los siguientes sistemas: (a) portaherramientas en eje descentrado, (b) portaherramientas en eje centrado, (c) conjunto de discos abrasivos.

El concepto 1 (ver Figura 63) se encuentra conformado por un rodamiento principal. Dos eslabones lo rodean generando presión sobre el rodamiento creando una sujeción. Cada eslabón consta de dos placas perpendiculares al rodamiento, las placas poseen orificios para la ubicación de motores (servomotor y motor DC). El eslabón que posee el servomotor está unido a una rueda omnidireccional la cual se encontrará en contacto con la superficie del tubo y permitirá el giro del actuador de limpieza. El motor DC contendrá una herramienta de limpieza que podrá ser remplazada o intercambiada con facilidad.



**Figura 63** Portaherramientas en eje descentrado

En Tabla 24, se puede observar una tabla comparativa entre ventajas y desventajas del concepto 1, estableciendo parámetros como: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) cambio de herramienta, (e) mantenimiento, (f) diámetro variable.

**Tabla 24**

*Ventajas y desventajas del Concepto 1 de limpiador*

Concepto 1	
Ventajas	Desventajas
Uso de dos motores DC	Diámetro no variable
Fácil mantenimiento	Peso
Sistema modular (cambio de herramienta)	
Fácil acople al robot	
Fácil manufactura	
Bajo costo	

El concepto 2 (ver Figura 64) se encuentra conformado por 3 brazos desfasados a  $120^\circ$  los cuales soportan 3 cepillos cilíndricos de plástico, que permiten la limpieza de la superficie interna de la tubería. El sistema se encuentra alimentado por medio de un motor DC.



**Figura 64** Portaherramientas en eje centrado

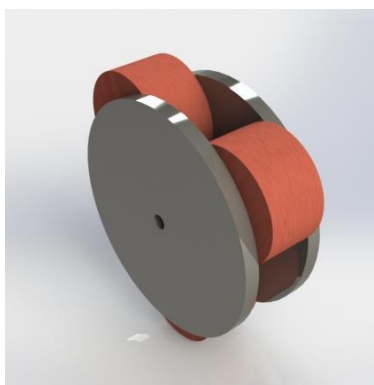
En Tabla 25, se puede observar una tabla comparativa entre ventajas y desventajas del concepto 2, estableciendo parámetros como: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) cambio de herramienta, (e) mantenimiento, (f) diámetro variable.

**Tabla 25**

*Ventajas y desventajas del Concepto 2 de limpiador*

Concepto 2	
Ventajas	Desventajas
Único motor DC	Diámetro no variable
Fácil mantenimiento	Compleja manufactura
Sistema modular (cambio de herramienta)	Peso
Fácil acople al robot	Alto costo

El concepto 3 (ver Figura 65) se encuentra conformado por medio de 3 discos abrasivos equidistanciados. Los discos abrasivos se encontrarán en contacto con la tubería permitiendo la eliminación de sólidos en la superficie. Los discos se encuentran alimentados por medio de un motor DC y un sistema de engranes que trasmite a los 3 ejes de los discos. Para la eliminación de obstrucciones se procede a remover la capa principal de acero permitiendo el uso de las caras frontales de los discos para desintegrar los sólidos.



**Figura 65** Conjunto de discos abrasivos

En Tabla 26, se puede observar una tabla comparativa entre ventajas y desventajas del concepto 3, estableciendo parámetros como: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) cambio de herramienta, (e) mantenimiento, (f) diámetro variable.

**Tabla 26**  
*Ventajas y desventajas del Concepto 3 de limpiador*

<b>Concepto 3</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Uso de un solo motor DC	Diámetro no variable
Fácil acople al robot	Peso
	Difícil mantenimiento
	Manufactura compleja
	No es un sistema modular (cambio de herramienta)
	Alto costo

Para la selección del concepto a diseñar se toma a consideración los siguientes criterios: (a) manufactura, (b) costo, (c) peso, (d) consumo energético, (e) mantenimiento. Se busca un diseño que requiera procesos de manufactura simples, mantener un peso relativamente bajo, la capacidad de cambio permite mayor versatilidad al subsistema. En la Tabla 27 se encuentra la ponderación de los criterios previamente seleccionados.

**Tabla 27**  
*Criterios de evaluación para la selección del subsistema de limpieza*

<b>Criterio</b>	<b>Manufactura</b>	<b>Costo</b>	<b>Peso</b>	<b>Consumo Energético</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Manufactura</b>	-	2.5	0.0	2.5	2.5	8.5	0.155
<b>Costo</b>	2.5	-	2.5	2.5	2.5	11.0	0.200
<b>Peso</b>	5.0	2.5	-	5.0	2.5	16.0	0.291
<b>Consumo Energético</b>	2.5	2.5	0.0	-	5.0	11.0	0.200

CONTINÚA



<b>Mantenimiento</b>	2.5	2.5	2.5	0.0	-	8.5	0.155
<b>Total</b>						55.0	1.000

En las Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32, se encuentran la comparación y ponderación de cada uno de los conceptos según un criterio individual.

**Tabla 28**

*Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Manufactura”*

<b>Manufactura</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Concepto 1</b>	-	0.0	2.5	3.5	0.19
<b>Concepto 2</b>	5.0	-	5.0	11.0	0.61
<b>Concepto 3</b>	2.5	0.0	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 29**

*Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Costo”*

<b>Costo</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Concepto 1</b>	-	0.0	5.0	6.0	0.33
<b>Concepto 2</b>	5.0	-	2.5	8.5	0.47
<b>Concepto 3</b>	0.0	2.5	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 30**

*Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Peso”*

<b>Peso</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Concepto 1</b>	-	2.5	0.0	3.5	0.19
<b>Concepto 2</b>	2.5	-	0.0	3.5	0.19
<b>Concepto 3</b>	5.0	5.0	-	11.0	0.61
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 31**

*Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Consumo Energético”*

<b>Consumo Energético</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Concepto 1</b>	-	2.5	5.0	8.5	0.47
<b>Concepto 2</b>	2.5	-	5.0	8.5	0.47
<b>Concepto 3</b>	0.0	0.0	-	1.0	0.06
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 32**

*Ponderación de tipos de limpiadores utilizando el criterio de “Mantenimiento”*

<b>Mantenimiento</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Concepto 1</b>	-	5.0	5.0	11.0	0.61
<b>Concepto 2</b>	0.0	-	2.5	3.5	0.19
<b>Concepto 3</b>	0.0	2.5	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18.0	1.00



En la Tabla 33 se encuentran los resultados de selección de concepto para el actuador de limpieza. El concepto más adecuado para el diseño de un robot limpiador de tuberías es el de portaherramientas con eje centrado.

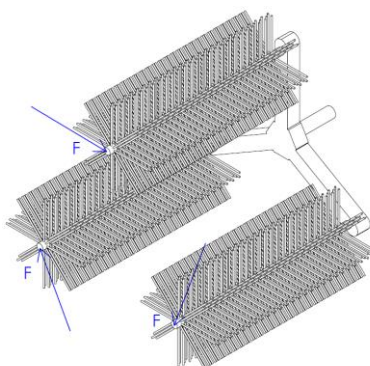
**Tabla 33**

*Conclusión de la selección del tipo efector de limpieza*

Criterio	Manufactura	Costo	Peso	Consumo Energético	Mantenimiento	Suma	Prioridad
Concepto 1	0.03	0.07	0.06	0.09	0.09	0.34	2
Concepto 2	0.09	0.09	0.06	0.09	0.03	0.37	1
Concepto 3	0.03	0.04	0.18	0.01	0.03	0.29	3
<b>Total</b>						1.00	

### Esfuerzo herramienta

En la herramienta se analiza la fricción con la superficie interna de la tubería y la deflexión máxima de los cepillos cilíndricos. Se evalúa el sistema con 3 fuerzas de 0.25 N cada una (Fuerza máxima del motor). Se puede observar en la Figura 66.



**Figura 66** Esquema de fuerzas que actúan con el limpiador

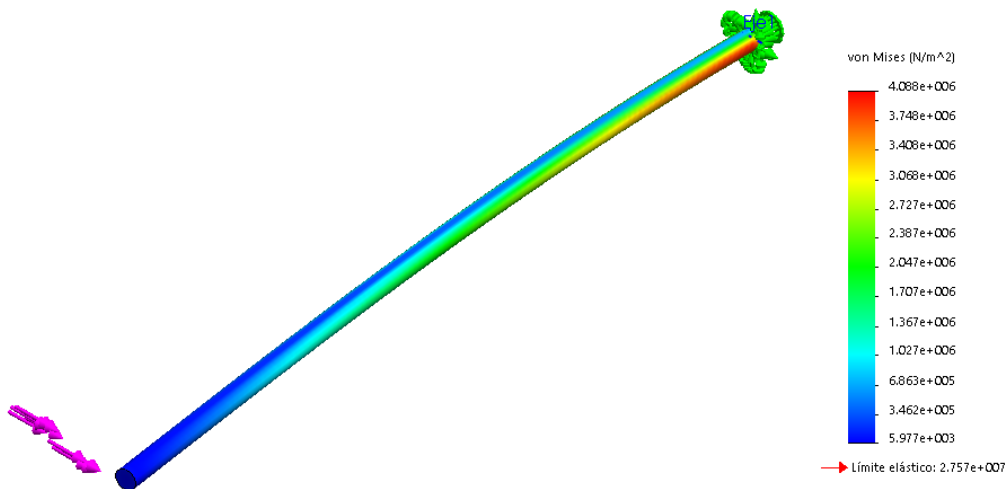
La deflexión de los cepillos se considera la fuerza máxima del motor en el eje del cepillo de 0,25 N. El eje del cepillo está conformado por aluminio H1060. Se determina el esfuerzo de deflexión de MPa.

$$\sigma_f = \frac{M \cdot \left(\frac{200}{1000}\right)}{\pi \cdot \left(\frac{\frac{1000}{2}}{2}\right)^4} = 3.75 \text{ MPa}$$

Con el esfuerzo calculado se obtiene la deformación máxima en el extremo del limpiador.

$$Y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} = 0.328 \text{ mm}$$

Los cepillos cilíndricos sufren una deflexión máxima 0.314 mm sufriendo un esfuerzo máximo en la junta de unión con la estructura de 4 MPa (ver Figura 67) resultando con un factor de seguridad de 6,7.



**Figura 67** Eje de los cepillos plásticos

## Fatiga Herramienta

Por medio del esfuerzo que sufre el eje se procede a determinar el número de ciclos de vida de la herramienta considerando un peso de herramienta de 10 N.

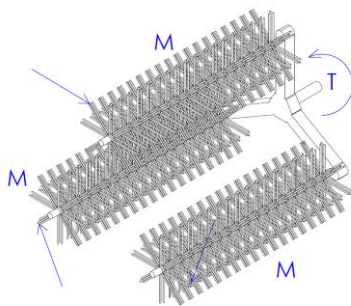
$$\sigma_{rev} = \frac{Mc}{I} = 4.97 \text{ MPa} \quad (3.8)$$

$$N = \left(\frac{\sigma_{rev}}{a}\right)^{\frac{1}{b}} = 3.39 \cdot 10^9 \quad (3.9)$$

Considerando el diagrama SN del acero se determina que el número de ciclos obtenidos en el análisis, coloca a la herramienta dentro de la zona de vida infinita para la fatiga.

## Cálculo motor limpiador

Para la selección del motor para el actuador de limpieza se procede al cálculo por medio de Euler-Lagrange. Se considera al actuador como 3 barras en rotación con por medio de un torque. Debido a que las cerdas del cepillo tienen un área de contacto mínimo con la superficie y no se encuentran a presión no se considera la fricción.



**Figura 68** Esquema Euler-Lagrange para sistema de limpieza

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \theta} = F \quad (3.10)$$

$$L = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (3.11)$$

Para el cálculo de inercia se aplica el teorema de Steiner (Ecuación 3.12).

$$I = 3 \cdot \frac{1}{3} mL^2 + 3 \left[ \frac{1}{3} ML^2 + ML^2 \right] = 0.0000250 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.12)$$

$$I \ddot{\theta} = \tau \quad (3.13)$$

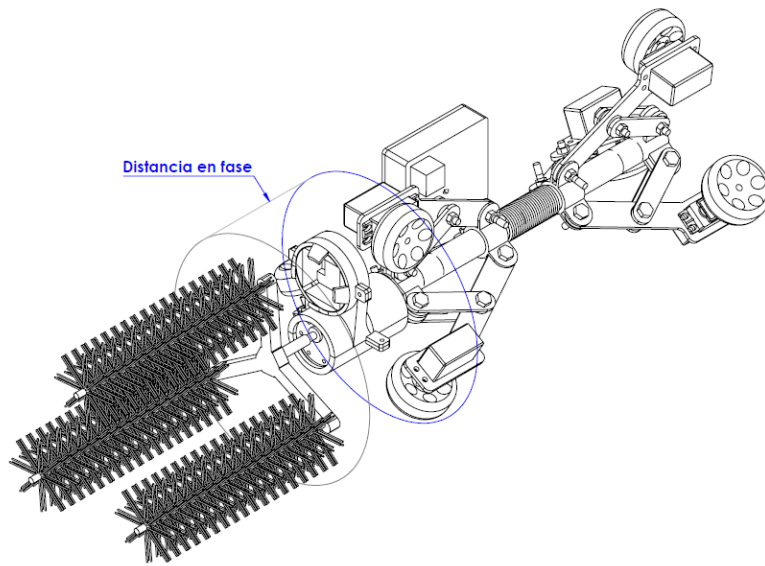
El motor a considerar posee un torque de 12 Kg-cm (1,18 N-m) y una velocidad nominal de 366 RPM. Para consideración de diseño se desea utilizar el 60% de la potencia total del motor por lo que se usa los valores de torque y velocidad de 7.2 Kg-cm (0.71 N-m) y 183 RPM (19.16 Rad/s) respectivamente.

$$\ddot{\theta} = 28400 \frac{\text{Rad}}{\text{seg}}$$

Se determina el tiempo necesario para llegar a la velocidad de del motor de diseño de 60%.

$$t = \frac{\dot{\theta}}{\ddot{\theta}} = 0.6 \text{ mSeg}$$

La configuración de las ruedas para en los dos cuerpos se disponen de manera simétrica. Colocando el anillo móvil de los cuerpos en la parte adyacente a al resorte, que cumple la función de acople de ejes y dar giro al robot. Esta disposición permite al cuerpo uno reducir la distancia entre los puntos en fase más externos al centro del eje del robot (ver Figura 69), facilitando al robot la movilización dentro de giros (codos) en el trayecto.

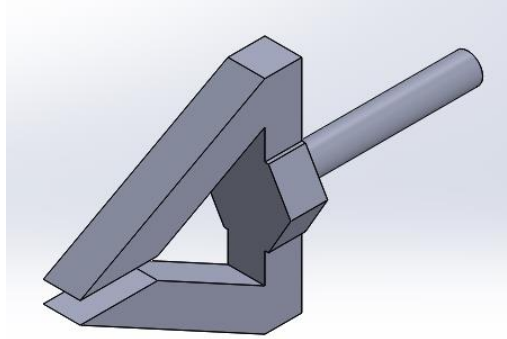


**Figura 69** Distancia en fase del robot

### 3.4.2. Herramienta de limpieza para remoción de sólidos

La herramienta de limpieza para remoción de sólidos se encarga de la remoción de sólidos. La herramienta se diseña de mucho menor diámetro que la tubería debido a la rigidez necesaria para la remoción de sólidos, y evitar colisión con la tubería en curvatura. La herramienta se enfoca en la eliminación de sólidos en el centro de la tubería.

El diseño propuesto como limpiador de remoción consta de 2 brazos metálicos desfasados  $180^\circ$  (ver Figura 70). Permitiendo un ataque con la menor superficie de contacto entre el objeto de obstrucción y la herramienta reduciendo la potencia del actuador de limpieza.



**Figura 70** Herramienta de limpieza para remoción de sólidos

### Análisis de esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos se considera fuerza del motor de 15 Kg-cm. La zona crítica del limpiador de remoción es el eje de sujeción al acople del robot. El análisis se lo realiza en la zona media del cono del limpiador por lo cual se obtiene la fuerza del ese punto.

$$F = \frac{T_{Motor}}{R_{punto}} = \frac{15 \text{ Kgcm} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}}{3 \text{ cm}} = 49.05 \text{ N}$$

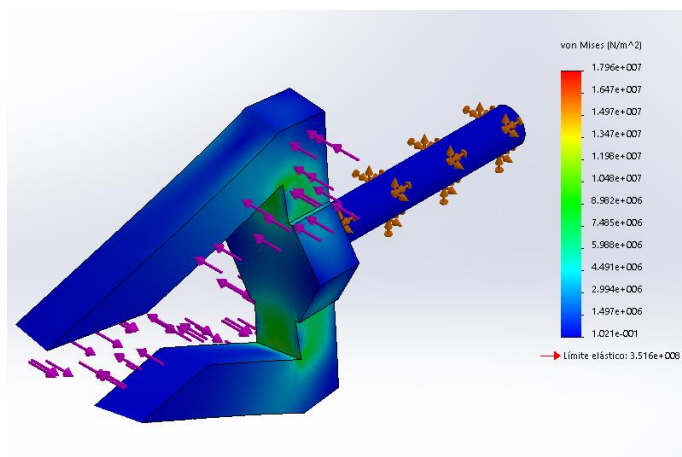
En el análisis se considera una fuerza de 49 N. a fuerza obtenida es la representante del par torsor que sufre la herramienta a una distancia de 35 mm de inserción de cono. Se obtiene el esfuerzo generado por el par en la superficie del eje.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{32 \cdot L \cdot F}{\pi \cdot D^3} = 17.53 \text{ MPa}$$

El elemento se manufactura con acero ASTM A36 con lo que se obtiene un factor de seguridad de 10,25.

$$n = \frac{351 \text{ MPa}}{17.53 \text{ MPa}} = 20.02$$

Se realiza un análisis computacional del elemento con lo que se obtiene un esfuerzo de 17.96 MPa en la zona crítica previamente descrita (ver Figura 71) y un factor de seguridad de 20.



**Figura 71** Análisis de esfuerzo limpiador remoción de sólidos

En la siguiente tabla se muestra los resultados de los esfuerzos en la zona crítica dependiendo de la profundidad del cono (ver Tabla 34). Donde la distancia L1 es la distancia horizontal de la zona crítica a la zona de contacto y L2 es la distancia vertical del eje a la zona de contacto (ver Figura 72).

**Tabla 34**

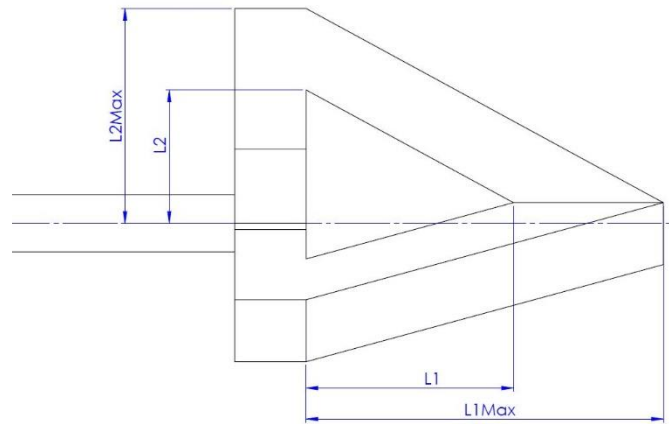
*Resultados de los esfuerzos en la zona crítica*

L1 [mm]	L2 [mm]	$\sigma_x$ [MPa]	$\tau$ [MPa]	$\sigma_{Mises}$ [Mpa]	n
0	30	0.00	14.62	16.16	21.71
5	27	4.87	13.16	14.87	23.59
10	24	9.74	11.69	14.35	24.45
15	21	14.62	10.23	14.66	23.92
20	18	19.49	8.77	15.77	22.24

CONTINÚA



25	15	24.37	7.31	17.53	20.02
30	12	29.24	5.84	19.75	17.76
35	9	34.11	4.38	22.31	15.73
40	6	38.99	2.92	25.09	13.98
45	3	43.86	1.46	28.04	12.51
50	0	48.74	0.00	31.11	11.28



**Figura 72** Esquema de distancias para análisis de esfuerzos

Se visualiza que la herramienta sufre mayor esfuerzo durante la penetración inicial de un sólido con un factor de seguridad mínimo de 5,12.

### 3.5. Subsistema: Componentes electrónicos

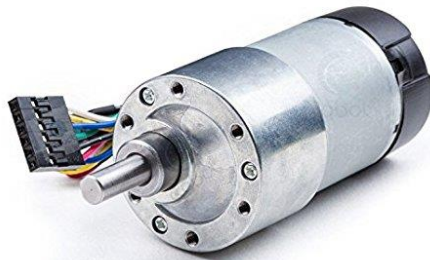
El subsistema de potencia tiene como objetivo la transición de energía a los diferentes actuadores del robot. Los circuitos permiten el acondicionamiento para señales tales como: (a) control y (b) adquisición de datos. El subsistema se compone de: (a) sensores, (b) motor de



limpieza, (c) motores de tracción, (d) actuadores lumínicos, (e) tarjeta de control, (f) placa PCB y (g) caja electrónica.

### 3.5.1. Motor de limpieza

El motor para el subsistema de limpieza seleccionado es el AngelANQI0001GB (ver Figura 73). El motor proporciona un torque nominal de 12 Kg-cm y una velocidad nominal de 366 RPM, su consumo energético es de 6,0 A a 12 V.



*Figura 73* Motor AngelANQI0001GB

### 3.5.2. Motores de tracción

Los motores para tracción son 6 servomotores LW-20MG (ver Figura 74), los cuales proveen un torque nominal de 20 Kg-cm (En el literal 3.3.6 se calculó torque nominal requerido de 0.147 Nm). Con un consumo energético de 2 A a 7,2 V. Los servomotores son controlados por modulación de ancho de pulsos PWM directos al servomotor, lo cual simplifica el circuito y facilita el control de los motores.



*Figura 74* Servomotor LW-20MG

Los motores seleccionados LW-20MG son servomotores de 180 grados de movimiento para lo que se los modificó eliminando las limitaciones físicas internas de giro y reemplazando su potenciómetro de control por un potenciómetro de precisión estableciendo un divisor de voltaje con resistencias iguales (posición del servo motor  $90^\circ$ ); lo cual permite un giro bidireccional continuo por medio de una señal PWM, estableciendo una equivalencia: a) menor a  $90^\circ$  giro antihorario, b) mayor a  $90^\circ$  giro horario y c) igual a  $90^\circ$  reposo. El control de velocidad se establece por la magnitud dada entre el reposo ( $90^\circ$ ) y un ángulo de control.

### **3.5.3. Sensores**

El robot para limpieza de tuberías comprenderá 3 sensores para proveer de información de 4 variables al teleoperador y aplicación de algoritmos de control. Las magnitudes a obtener son: (a) temperatura y (b) humedad.

El sensor de temperatura y humedad será el encargado de entregar información al teleoperador para determinar las condiciones del entorno de la tubería. Se selecciona el sensor de humedad y temperatura DHT21 (ver Figura 75). El sensor presenta como características principales: (a) de bajo consumo energético (3.3-5 V), (b) transmisiones a larga distancia. El sensor no requiere circuito de acondicionamiento, permitiendo la adquisición de datos directamente a la tarjeta de control.



*Figura 75* Sensor DHT21

#### **3.5.4. Tarjeta de control**

La tarjeta de control contiene el algoritmo de control y comunicación entre el Robot y el usuario. Para esto se toma a consideración los siguientes microcontroladores: (a) ARM Cortex-A32, (b) ATMEGA 328 y (c) ARM Cortex-A7. En la Tabla 35 se visualizan características de interés entre las tarjetas propuestas.

**Tabla 35**  
*Características de los microcontroladores*

<b>Microcontroladores</b>			
<b>Características</b>	<b>ARM Cortex-A32</b>	<b>Atmega 328</b>	<b>ARM Cortex-A7</b>
<b>No I/O</b>	24	14	17
<b>Memoria RAM</b>	20 KB	2 KB	1 GB
<b>Memoria FLASH</b>	180 KB	32 KB	N.A.
<b>Interfaz</b>	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0
<b>Velocidad</b>	72 MHz	16 MHz	900 MHz
<b>Precio</b>	\$10	\$25	\$55

Para la selección del microcontrolador a usar se impuso los siguientes criterios: (a) tamaño, (b) costo, (c) No I/O<sup>1</sup> y (d) resolución. Se requiere de un microcontrolador de pequeño tamaño y con número de entradas y salidas necesarias para el control y adquisición de datos. En la Tabla 36 se encuentra la ponderación de los criterios para la selección.

**Tabla 36**  
*Criterio de evaluación para la selección del microcontrolador*

<b>Criterio</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Costo</b>	<b>No I/O</b>	<b>Resolución</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Tamaño</b>	-	5.0	2.5	2.5	11.0	0.324
<b>Costo</b>	0.0	-	0.0	2.5	3.5	0.103
<b>No I/O</b>	2.5	5.0	-	2.5	11.0	0.324
<b>Resolución</b>	2.5	2.5	2.5	-	8.5	0.250
<b>Total</b>					34.0	1.000

En las Tabla 37, Tabla 38, Tabla 39 y Tabla 40, se encuentra la ponderación de cada criterio con relación a los 3 microcontroladores propuestos.

<sup>1</sup> Número de entradas y salidas.

**Tabla 37**

*Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Tamaño”*

Tamaño	Cortex-32	ATMEGA 328	Cortex-A7	Suma + 1	Ponderación
<b>Cortex-32</b>	-	5.0	5.0	11.0	0.61
<b>ATMEGA 328</b>	0.0	-	2.5	3.5	0.19
<b>Cortex-A7</b>	0.0	2.5	-	3.5	0.19
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 38**

*Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Costo”*

Costo	Cortex-32	ATMEGA 328	Cortex-A7	Suma + 1	Ponderación
<b>Cortex-32</b>	-	5.0	5.0	11.0	0.61
<b>ATMEGA 328</b>	0.0	-	5.0	6.0	0.33
<b>Cortex-A7</b>	0.0	0.0	-	1.0	0.06
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 39.**

*Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “No I/O”*

No I/O	Cortex-32	ATMEGA 328	Cortex-A7	Suma + 1	Ponderación
<b>Cortex-32</b>	-	2.5	2.5	6.0	0.33
<b>ATMEGA 328</b>	2.5	-	0.0	3.5	0.19
<b>Cortex-A7</b>	2.5	5.0	-	8.5	0.47
<b>Total</b>				18.0	1.00

**Tabla 40**

*Ponderación de los microcontroladores utilizando el criterio de “Resolución”*

Resolución	Cortex-32	ATMEGA 328	Cortex-A7	Suma + 1	Ponderación
<b>Cortex-32</b>	-	5.0	2.5	8.5	0.47
<b>ATMEGA 328</b>	0.0	-	0.0	1.0	0.06
<b>Cortex-A7</b>	2.5	5.0	-	8.5	0.47
<b>Total</b>				18.0	1.00

En la Tabla 41 se encuentra la ponderación de los microcontroladores al ser evaluados según los 4 criterios de selección. El microcontrolador Cortex-32 (ver Figura 76) es la selección óptima para ser aplicado en el robot de limpieza.

**Tabla 41**

*Conclusión de la selección del microcontrolador*

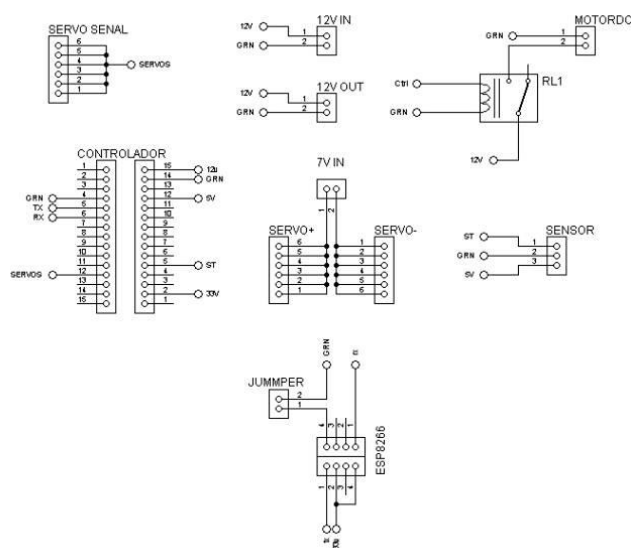
Criterio	Tamaño	Costo	No I/O	Resolución	Suma	Prioridad
<b>Cortex-32</b>	0.20	0.06	0.11	0.12	0.49	1
<b>ATMEGA 328</b>	0.06	0.03	0.06	0.01	0.17	3
<b>Cortex-A7</b>	0.06	0.01	0.15	0.12	0.34	2
<b>Total</b>					1.00	



**Figura 76** ATmega 328

### 3.5.5. Placa PCB

En la Figura 77, se establece un diagrama de conexión de cada uno los elementos electrónicos del robot como son: (a) controlador, (b) bornera para el motor de limpiador, (c) bornera de alimentación de 12V, (d) bornera para el sensor de temperatura y humedad y (d) controlador.



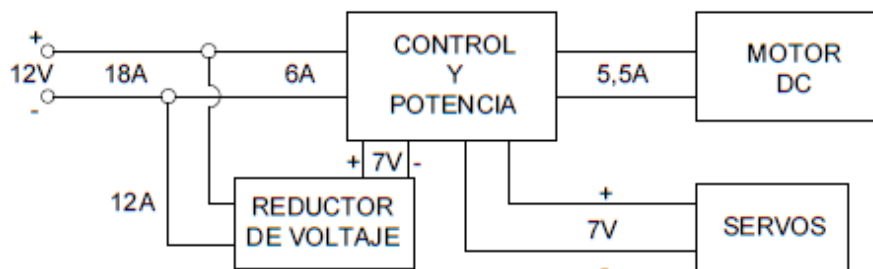
**Figura 77** Esquema general de conexiones

En la Tabla 42 se visualiza las corrientes de consumo del robot de limpieza. El robot consume un total de 15.5A, para el funcionamiento de los servomotores se requiere de un reductor de voltaje. La distribución de corriente se muestra en la Figura 78.

**Tabla 42**

*Corrientes consumidas por los diferentes elementos del robot*

Dispositivo	Corriente
Servomotores (6) [A]	12.0
Motor DC [A]	5.5
Sensor Temperatura Humedad [mA]	2.1
Total [A]	17.5

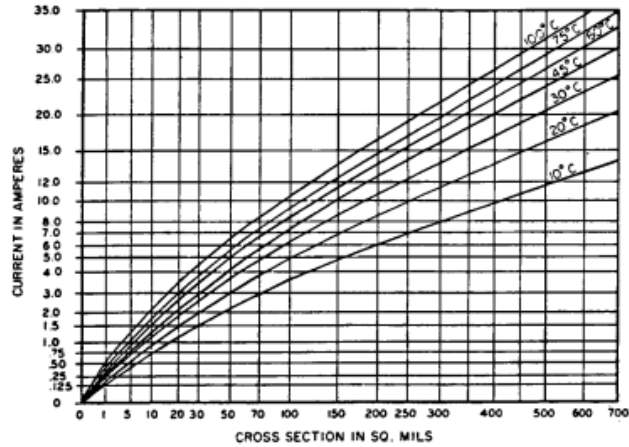


**Figura 78** Esquema de distribución de la corriente

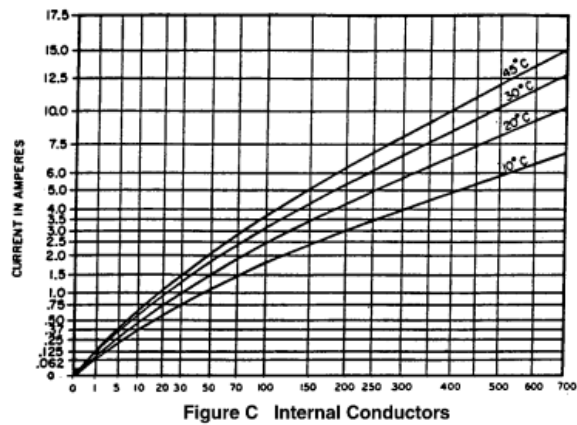
La placa de control y potencia recibe 6A por lo que se requiere el cálculo de ancho de pista para el diseño del circuito. El cálculo de pista se realiza con corriente de 12 A, espesor de cobre de 2 oz/ft<sup>2</sup> y un aumento de temperatura de 10 °C.

$$\text{Ancho} = \frac{\left\{ \left[ \frac{I}{k1 \cdot \Delta T^{k2}} \right]^{\frac{1}{k3}} \right\}}{L \cdot 1.378} = 4.63 \text{ mm}$$



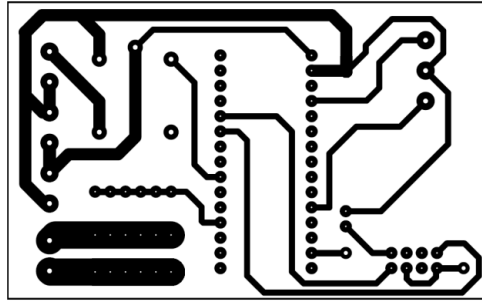


**Figura 79** Sección cuadrada vs Corriente (IPC-2221)  
Fuente: (Association Connecting Electronics Industries, 1998)



**Figura 80** Conductor interno vs corriente  
Fuente: (Association Connecting Electronics Industries, 1998)

Se requiere un ancho de pista de 4.63 mm. Las pistas de potencia de corriente máxima 6A están conformadas por pistas de 2 mm de ancho, el resto de pistas se compone de pistas de 1 mm de ancho (ver Figura 81).

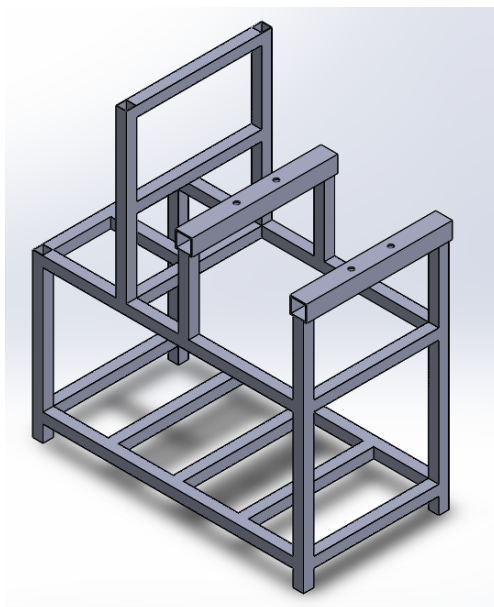


*Figura 81* Distribución de pistas de la placa

### 3.5. Subsistema: Alimentación y recolección

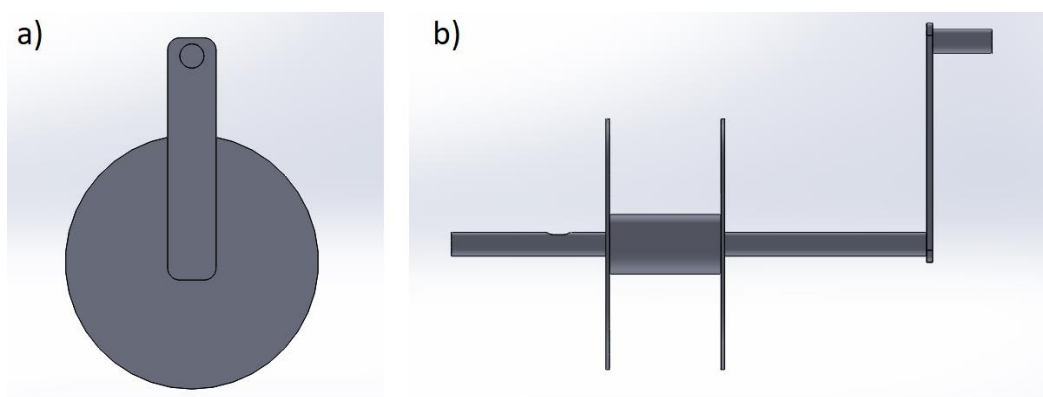
El subsistema de alimentación está conformado por la estructura-mecanismo que permite liberar el cordón umbilical del robot. El cordón umbilical es el conjunto de los cables de alimentación energética del robot y un recubrimiento que permita soportar tensión elástica para la recuperación manual del robot. El subsistema también contiene la fuente de poder de 20 A para abastecer al robot y un router que sirve de punto de comunicación entre el HMI y el robot.

La estructura del recolector se conforma de perfiles cuadrados de 25 mm de lado y 1.2 mm de espesor Acero ASTM1020 (Ver Figura 82). La estructura posee: (a) una zona para el almacenamiento del robot. (b) zona para el tablero de control y (c) mecanismo alimentador de cable. El robot se almacenará en la parte inferior de la estructura, por lo cual se establecen medidas de 600x300x300 mm de volumen interno permitiendo el ingreso del robot en su estado expandido. La parte superior se divide para la sección del tablero de control y mecanismo de alimentador de cable.



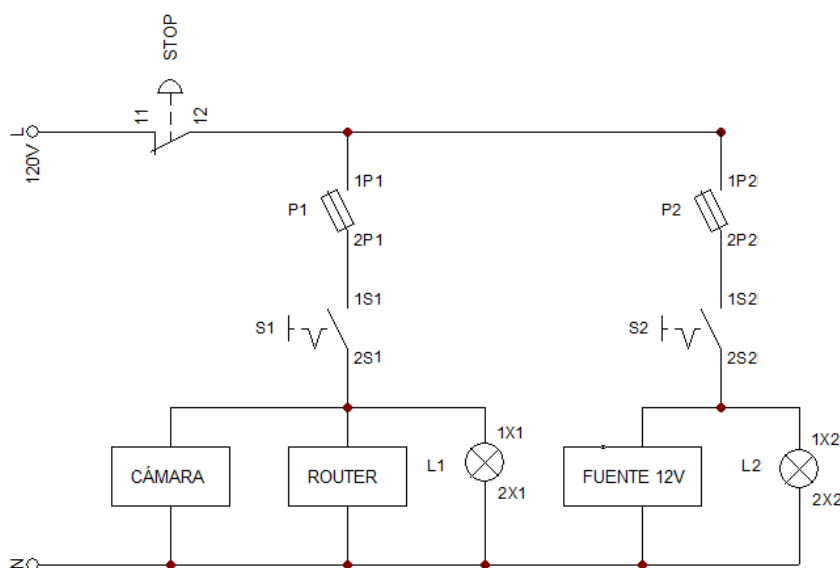
**Figura 82** Estructura de recolector

El mecanismo para alimentar el cable umbilical al robot es una manivela con carrete (ver Figura 83), el mecanismo se compone de: (a) 2 chumaceras empotradas en la estructura del recolector, (b) eje de soporte, (c) manivela, (d) carrete de cable y (e) cable umbilical.



**Figura 83** Mecanismo de manivela con carrete

El tablero de control se encarga del suministro energético a los componentes del proyecto. Dentro de ella se encuentran: (a) router, (b) fuente DC, (c) porta-fusibles y (d) alimentación de cámara. El esquema de conexiones dentro del tablero (ver Figura 84) muestra la entrada de energía de 120 VAC, su conversión a corriente DC y distribución a los diferentes elementos eléctricos del proyecto.

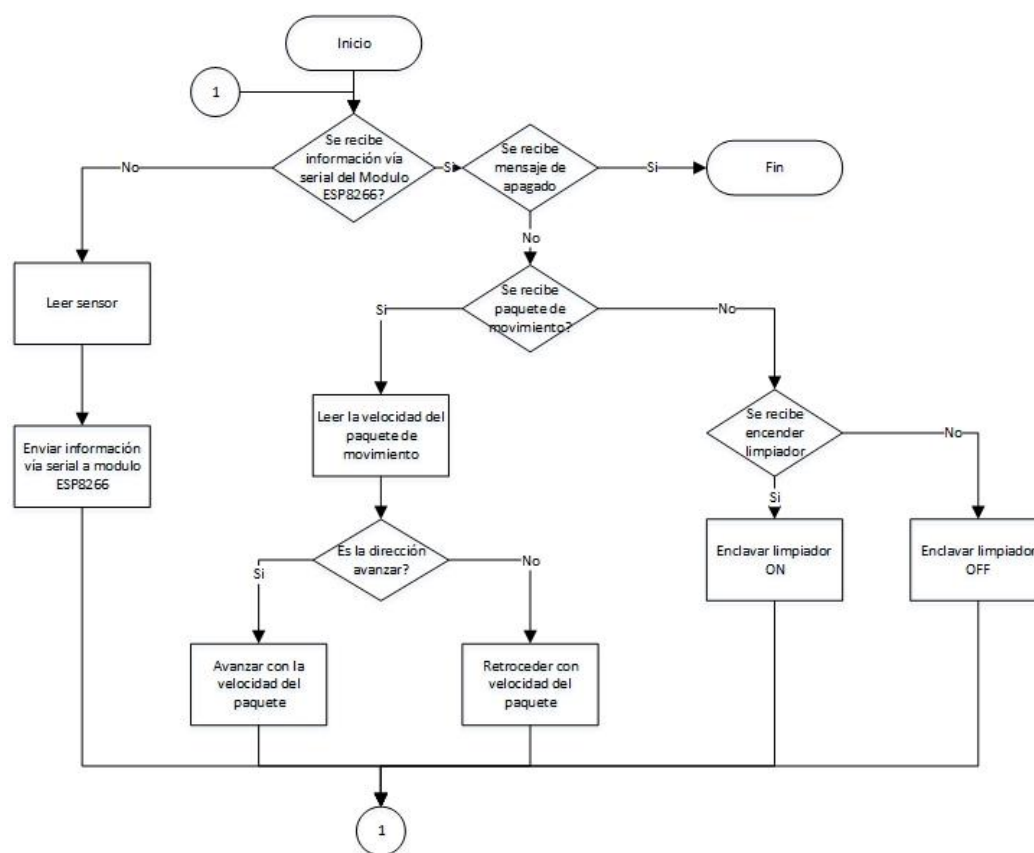


**Figura 84** Esquema de conexión del tablero

### 3.6. Subsistema: Control

El subsistema de control contiene el algoritmo de controlador (ATMega328) para el accionamiento de los actuadores de tracción y limpieza. El controlador recibe paquetes de información por medio de un módulo de comunicación WIFI (vea Figura 85). El algoritmo de control se muestra en el diagrama de flujo *Figura 85*. Los actuadores de tracción (servomotores) son regulados tanto su velocidad como dirección por medio de un pulso PWM. El actuador de

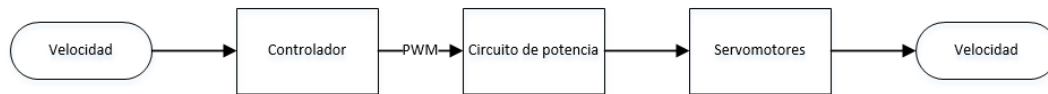
limpieza posee un control ON/OFF debido a la potencia requerida para su funcionamiento, por lo cual el controlador es una salida digital (0-5 V).



**Figura 85** Algoritmo de control

### 3.6.1. Lazo de control

El tipo de control implementado en el robot de limpieza de tuberías es de lazo abierto. El sistema recibe la orden desde el HMI del computador, la cual llega al controlador y permite el control de los actuadores. En la Figura 86 se ve el lazo de control de los motores de tracción del robot.



**Figura 86** Lazo de control Servomotores

El robot posee un sensor para la medición de temperatura y humedad, los cuales no son aplicados en el control del robot. En cambio son usados para entregar información al usuario debido a un requisito del cliente.

### 3.7. Subsistema: Inspección

El subsistema de inspección, está conformado por la adquisición de video por medio de una cámara, siendo visualizada en una interfaz humano - máquina conocido como HMI (por sus siglas en inglés Human – Machine Interface), estableciendo un software el cual permite el diseño y la elaboración de la interfaz, cumpliendo parámetros de diseño basadas directrices establecidas por la guía GEDIS<sup>2</sup>.

#### 3.7.1. Cámara

La cámara a utilizarse fue escogida en base a características físicas como: dimensiones del circuito, facilidad de ensamblaje y peso. Se consideraron adicionalmente, atributos electrónicos como: alimentación, protocolos soportados, calidad de video y capacidad de visión nocturna.

<sup>2</sup> GEDIS: Guía Ergonómica de Diseño de Interfaz de Supervisión.

De acuerdo a la Tabla 43, se pueden observar las características físicas y electrónicas de la cámara IP seleccionada (ver Figura 87).



**Figura 87** YYP2P Smart Home Security IP Camera  
Fuente: (Gwelltimes, 2016)

**Tabla 43**

*Características de la cámara IP seleccionada*

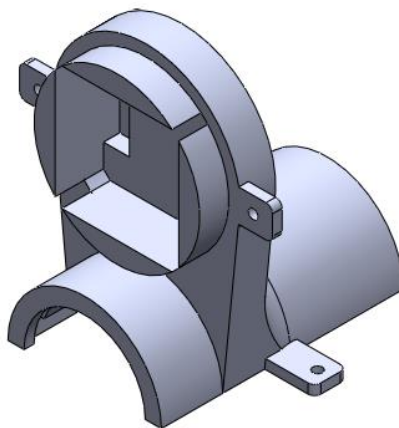
Características de Cámara IP	
Descripción	Valor
Modelo	YYP2P
Alimentación	5 Vdc
Temperatura de trabajo	0 – 55°C
Humedad de trabajo	20% - 85%
Calidad	720p (1280x720) / 640x360 / 320x240
Protocolo soportado	HTTP, FTP, TCP/IP, UDP, SMTP, DHCP, PPoE, DDNS, UPnP
Ethernet	10/100 Mbps RJ-45
Soporta ONVIF	Si
Wifi	Estándar IEEE 802.11/B/G/N
Modo IP	IP Dinámica, IP Estática
Visión Nocturna	Si

Fuente: (Gwelltimes, 2016)

Para la implementación de la cámara en el robot se requiere el desensamble de la cámara y su circuito para ajustar al espacio existente dentro de la tubería para ello se diseñan un conjunto de 5 piezas para impresión 3D: (a) coraza superior, (b) coraza inferior, (c) anillo de sujeción, (d) placa base y (e) tapa.

### 3.7.1.1. Coraza Superior

La coraza superior es la pieza donde se monta el lente de la cámara. La pieza será montada sobre el motor del limpiador. Para el montaje la coraza superior requiere contener un entorno cilíndrico que lo permita. La coraza se mantendrá estática debido a hendiduras dentro de ella para encajar los brazos de la placa de sujeción del motor de limpieza evitando que la cámara se deslice. El diseño de la coraza de superior se aprecia en la Figura 88.

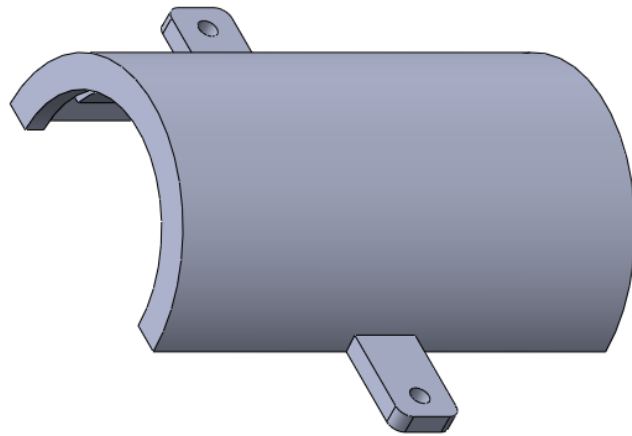


**Figura 88** Coraza Superior



### 3.7.1.2. Coraza inferior

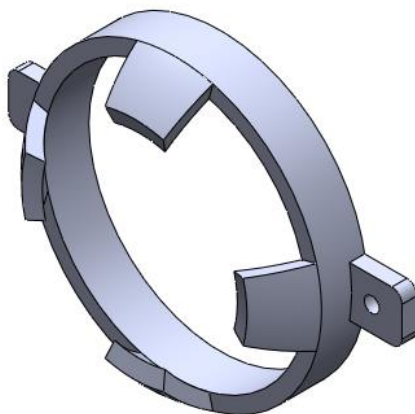
La coraza inferior se encarga de cerrar la coraza superior y asegurar en posición a la estructura de apoyo del lente de la cámara. La coraza contiene el contorno cilíndrico restante de la coraza superior, al igual que la superior posee las mismas hendiduras de sujeción y orejas para la sujeción por medio de tornillos. El diseño de la coraza inferior se aprecia en la Figura 89.



*Figura 89* Coraza Inferior

### 3.7.1.3. Anillo de sujeción

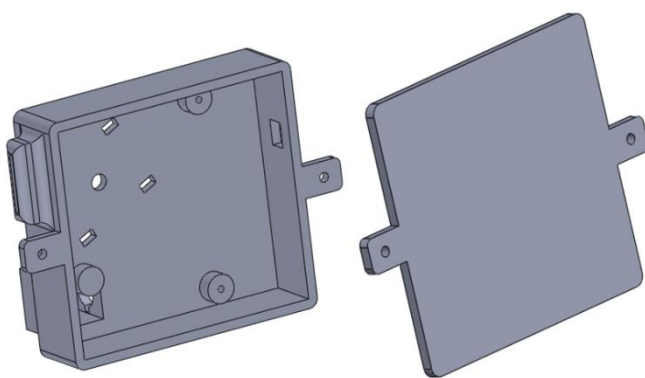
El anillo de sujeción es una estructura con el objetivo de mantener en su posición al lente de la cámara y asegurarlo a la estructura coraza superior. El anillo se sujeta a la coraza superior por medio de tornillos en sus orejas. El diseño del anillo de sujeción se aprecia en la Figura 90.



*Figura 90* Anillo de Sujeción

#### **3.7.1.4. Placa Base**

La placa base es una caja donde se monta el circuito restante de la cámara IP y su antena. La placa base requiere de orificios para el bus de datos del lente de la cámara, y alimentación eléctrica, además de orificios para sujeción y posicionamiento al eslabón motor del robot (ver Figura 91).

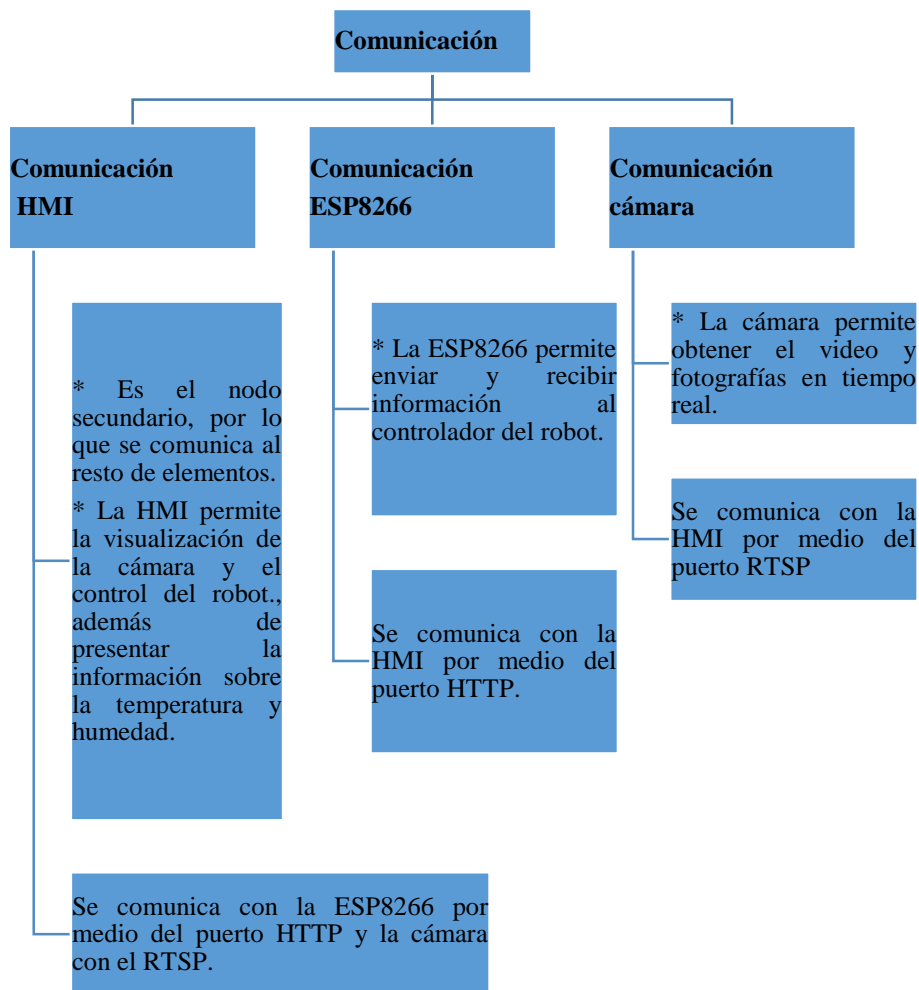


*Figura 91* Placa y Tapa Base

### 3.8. Subsistema: Comunicación

La comunicación entre el computador con el controlador y cámara IP permitirá al usuario poder realizar acciones sobre el robot y visualizar el avance y trabajo dentro de la tubería. El robot al tener un cordón umbilical encapsulando a los cables de alimentación de 5V, 12V y un cable de recuperación, establece como factores que puede afectar al funcionamiento de los servomotores:

(a) peso del cable, (b) tensión que se genera. Por ello, se determinó que la comunicación se la realizará a través de dispositivos inalámbricos.



**Figura 92** Esquema general de la comunicación

### 3.8.1. Diseño de la HMI

La Interfaz Humano – Máquina debe proporcionar al usuario el control de avance o retroceso del robot, el encendido / apagado del limpiador, visualización en tiempo real el video capturado por la cámara del robot, con la posibilidad de tomar fotografías durante el tiempo de trabajo y el monitoreo de variables suministradas por el sensor de humedad y temperatura.

Para realizar la HMI, se establecieron criterios para facilitar el diseño y elaboración. En la Tabla 44, se establece los factores a considerar.

**Tabla 44**

*Criterios para elaboración de la HMI*

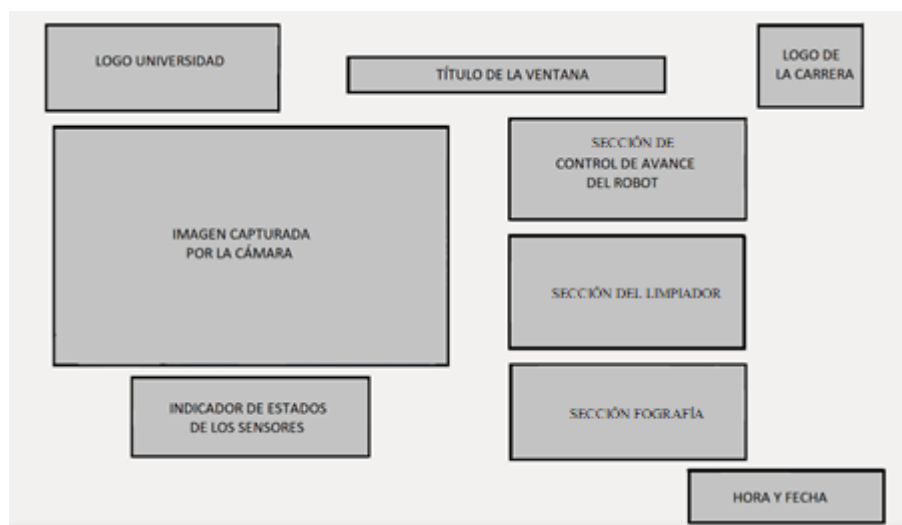
Número	Factor
1	Compatibilidad con lenguaje de programación Python
2	Facilidad de uso e implementación
3	Económico
4	Multiplataforma

Python es un lenguaje de programación muy utilizado debido a sus ventajas como multiplataforma, lenguaje abierto, gratuito, gran capacidad de soporte en librerías y de fácil entendimiento para el usuario.

El diseño de la HMI, se realizará con el software Qt Designer, el cual cumple con todos los factores mencionados en la Tabla 44. El programa tiene como ventaja arrastrar gran variedad objetos en una ventana y convertir toda la HMI en código Python.

### 3.8.1.1. Distribución de la HMI

La guía GEDIS establece que para el diseño de una HMI es fundamental determinar la distribución de cada uno de los elementos, considerando su lugar de ubicación, el tamaño de cada objeto y los colores utilizados, permitiendo de mejor manera la interacción con el usuario. En la Figura 93 se puede observar la distribución de la ventana principal de la HMI, la que permitirá el control del robot, limpieza e inspección de las tuberías.



**Figura 93** Esquema de distribución de objetos de la HMI

El esquema presentado cumple con la normativa GEDIS, con la excepción del logo de la universidad y logo de la carrera, debido a un requerimiento del cliente para la estandarización de interfaces gráficas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

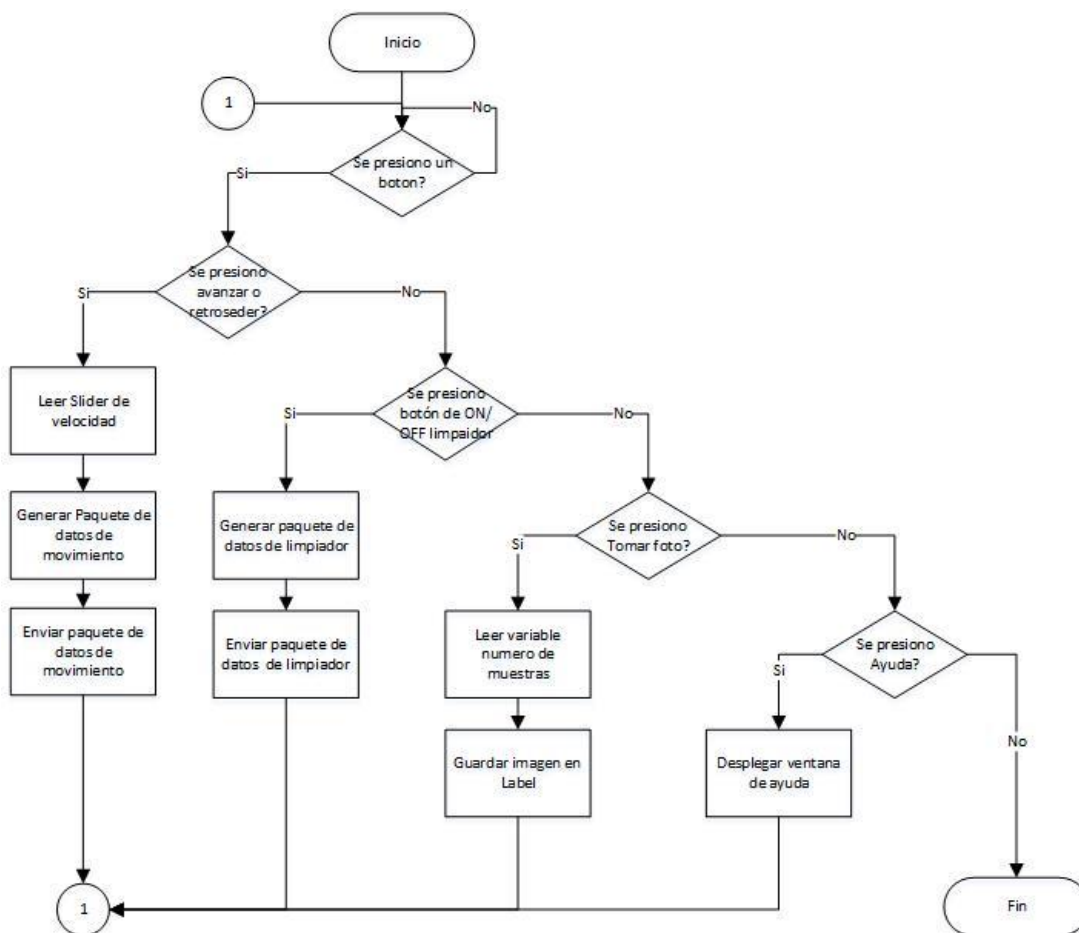
En la siguiente figura se puede observar el diseño final de la HMI del robot.



**Figura 94** HMI del robot

### 3.8.1.2. Arquitectura y funcionamiento

El programa de HMI se compone de 3 Subrutinas: (a) Ingreso, (b) HMI-Controlador y (c) HMI-Cámara funcionando en paralelo (Thread). La Figura 95 contiene el algoritmo de funcionamiento de Subrutina 1 encargada de escuchar el ingreso de información de usuario.



**Figura 95** Esquema de funcionamiento de la HMI

### 3.8.2. Comunicación Controlador-HMI

El controlador se comunica con el HMI por medio del módulo de comunicación ESP8266. La comunicación se estableció por medio de protocolo HTTP, el cual se configuró al módulo ESP8266 como servidor y al HMI como cliente de la comunicación.

La comunicación se encuentra conformada por una red WLAN “Tesis”, creada por el router TPLink, a la cual se enlazarán los dispositivos: (a) módulo ESP8266, (b) cámara IP y (c) ordenador del usuario. Dentro de la red tanto el módulo ESP8266 como la cámara IP se encontrarán bajo IP

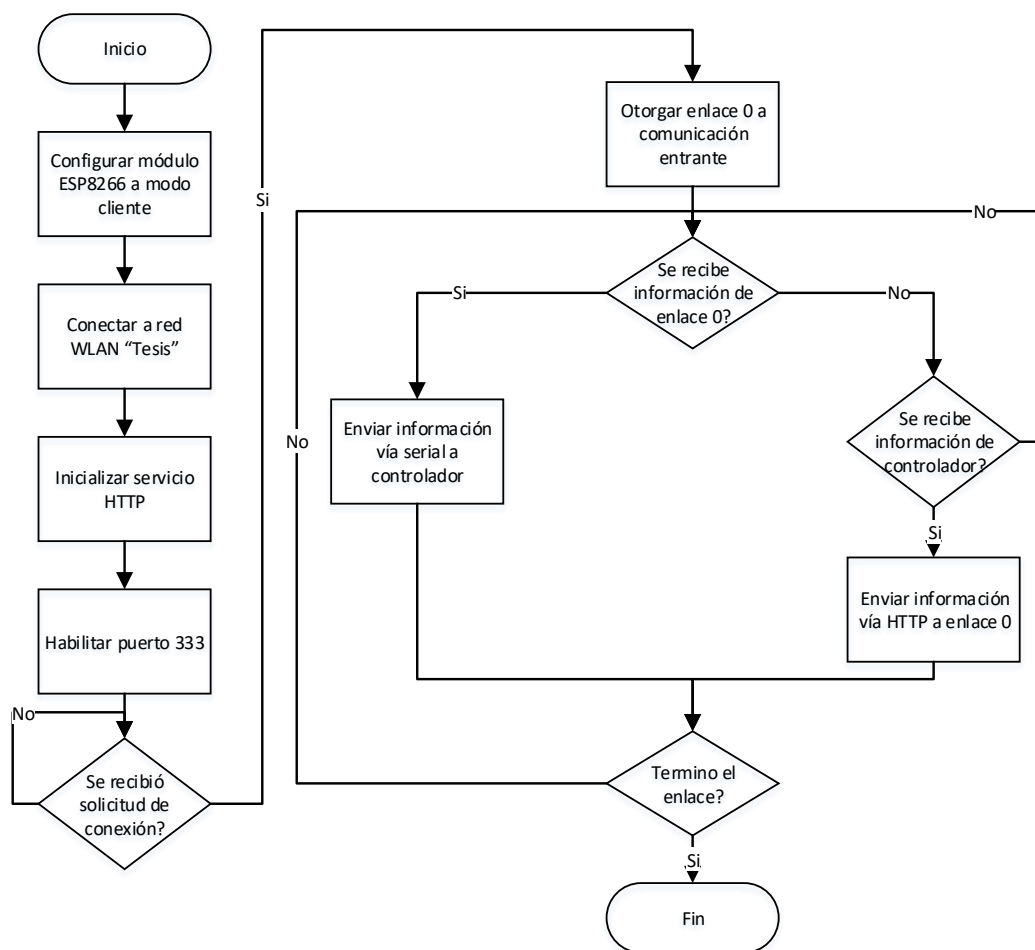
estática para la comunicación con el HMI del ordenador. La conexión de comunicación es la implementada en la Figura 96.



*Figura 96* Arquitectura de la red

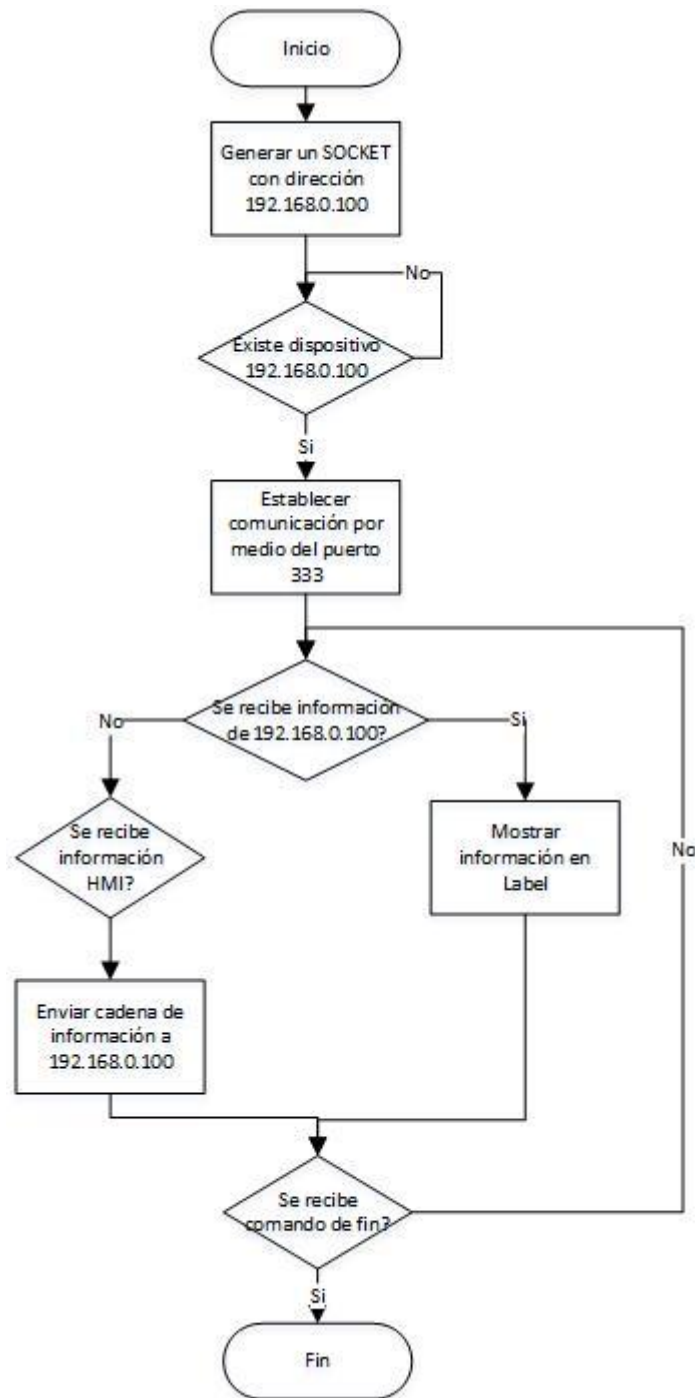
Por medio de programación se estableció que el módulo ESP8266 al inicializarse se conecte con una red WLAN "Tesis", se establece un servicio HTTP con el puerto 333 como entrada. Para la recepción y envío de datos por el módulo se aplicaron comandos Hayes (comandos AT). El algoritmo de comunicación del módulo ESP8266 se muestra en la Figura 97. El programa está diseñado para el envío de datos de los sensores del robot al HMI, además de la recepción de comandos de funcionamiento por medio de HMI.





**Figura 97** Algoritmo de comunicación del módulo ESP8266

Para la comunicación por medio del HMI se genera un enlace con la IP estática del módulo y su puerto usando la librería de comunicación Ethernet SOCKET. Esta comunicación permite el envío y recepción de datos al controlador del robot. El algoritmo implementado para la comunicación del HMI al módulo de comunicación (subrutina 2) se muestra en la Figura 98.

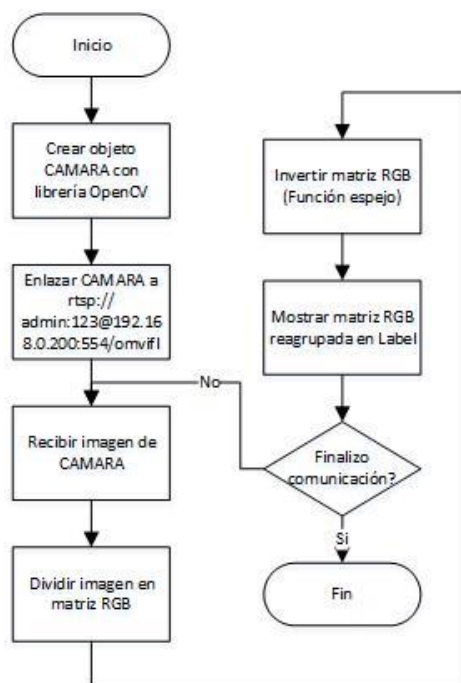


**Figura 98** Algoritmo implementado para la comunicación del HMI y módulo ESP8266

### 3.8.3. Comunicación Cámara IP-HMI

La cámara IP establece la comunicación inalámbrica con el HMI por medio de los protocolos RTSP y ONVIF. El protocolo RTSP (por sus siglas en inglés Real Time Streaming Protocol), es protocolo que se utiliza para el envío de datos en tiempo real entre el cliente y el servidor. El protocolo ONVIF (por sus siglas en inglés Open Network Video Interface Forum) permite facilitar la comunicación entre dispositivos que usan video. Debido a su estandarización, se puede integrar equipos de video de diferentes marcas. El puerto utilizado por ONVIF es el 554.

La cámara IP se comunica al igual que el módulo ESP8266, siendo enlazada la cámara con la HMI a través del router TPLink. De acuerdo con la Figura 96, la dirección de la cámara IP es “192.168.0.200”. En la HMI se programó la dirección siguiente dirección: “rtsp://admin:123@192.168.0.200:554/onvif1” para poder visualizar en un label de la interfaz gráfica. Si la cámara se comunicó con éxito, la ventana con la HMI se abre y se empieza a visualizar los fotogramas captados por la cámara con un tiempo de actualización de 0,001 segundos. Con la herramienta OpenCV utilizando el lenguaje de programación Python, se captura los fotogramas, almacenándolos en matriz RGB (“Red, Green and Blue”, en sus siglas en inglés) para luego invertir la matriz (función espejo de la imagen) y procesar la información y visualizarla en la HMI. En el caso de que no exista una conexión entre la interfaz y la cámara, la ventana de la HMI no se abrirá, indicado un error de conexión en la Consola del sistema operativo Ubuntu. El funcionamiento de la comunicación de la cámara IP con el HMI (subrutina 3) se visualiza en la Figura 99.



**Figura 99** Algoritmo de funcionamiento de la comunicación de la cámara IP con el HMI

### 3.9. Resumen

En el capítulo se habló de la selección de subsistemas, por medio de la matriz de calidad QFD. Permitiendo un diseño por elementos funcionales divididos en: (a) estructura y locomoción, (b) actuador de limpieza, (c) alimentación eléctrica y recuperación, (d) inspección, (e) control y (f) comunicación.

El sistema de estructura y locomoción muestra el diseño mecánico para la estructura del cuerpo del robot y el mecanismo de traslación, los esfuerzos críticos y el factor de seguridad de los elementos que lo componen y el cálculo de actuadores para la locomoción. El sistema de actuador de limpieza muestra dos herramientas de limpieza divididas en (a) limpieza de superficie de tubería y (b) remoción de sólidos y el cálculo de potencia requerida para el actuador de limpieza. El

subsistema de alimentación eléctrica y recuperación se encarga del suministro energético al robot además del sistema mecánico para recuperación manual del robot.

El subsistema de inspección se encarga del control de la cámara IP implementado para inspeccionar el interior de la tubería. El subsistema de control contiene los algoritmos de control para el funcionamiento del robot. El subsistema de comunicación se compone por (a) HMI, (b) tipo de comunicación, (c) protocolo de comunicación, (d) algoritmo de comunicación.

## CAPÍTULO IV

### CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

El presente capítulo comprende el proceso de manufactura de los elementos mecánicos, ensamble de partes mecánicas y electrónicas, fabricación de tarjeta electrónica, conexión de actuadores y pruebas básicas de funcionamiento de los actuadores.

#### 4.1. Subsistema: Estructura y locomoción

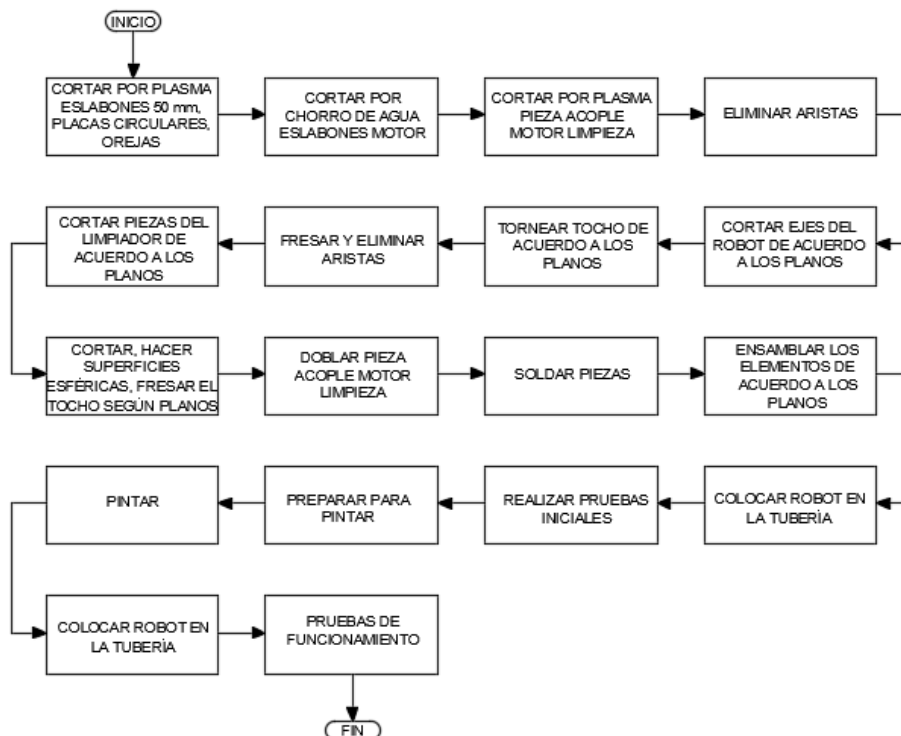
Para la construcción del cuerpo del robot de limpieza estableció una división en 4 partes: (a) corte en plasma y chorro de agua, (b) maquinado de piezas, (c) soldadura de piezas y (d) ensamble.

En la estructura del robot, los cuerpos fueron construidos con tubos circulares de un diámetro externo de 20 mm, sus eslabones 1 denominados “Eslabón de 5mm” fueron realizados por la máquina CNC de corte con plasma (ver Figura 100) y sus eslabones 2 nombrados como “Eslabón motor” fueron fabricados por la máquina CNC de corte por chorro de agua.



*Figura 100* Máquina CNC de corte con plasma

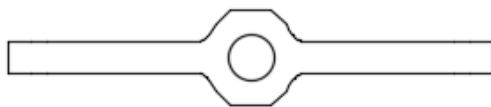
La construcción del robot fue realizada según el procedimiento que lo muestra el diagrama de flujo en la Figura 101, formado por dos etapas: (a) manufactura e (b) implementación.



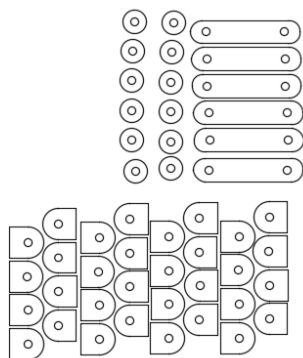
**Figura 101** Procedimiento para la construcción del robot de limpieza

#### 4.1.1. Corte en plasma y chorro de agua

El robot de limpieza se conforma por varios eslabones y elementos planos de 2 y 3 mm de espesor de diversas de formas irregulares. Razón por la cual se empleó el corte en plasma para obtener estos elementos (ver Figura 102 y Figura 103). Debido a la precisión y acabado del corte en plasma se decidió omitir los orificios del diseño para el corte en plasma y realizarlos posteriormente manualmente.



**Figura 102** Piezas de 2 mm cortadas por plasma



**Figura 103** Piezas de 3 mm cortadas por plasma

Debido al acabado (ver Figura 104 y Figura 105) se requirió limado para eliminación de las rebabas y aristas vivas. Para finalizar la pieza, se realizó un taladrado de acuerdo a las dimensiones especificadas en los planos, para obtener las piezas requeridas por diseño (ver Figura 106).





*Figura 104* Eslabón de 50 mm con rebabas y aristas vivas

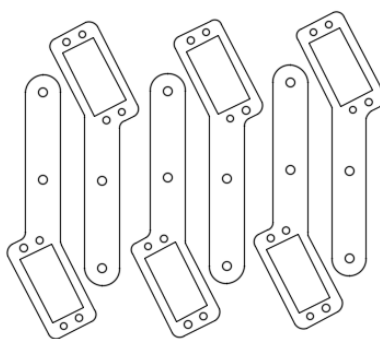


*Figura 105* Orejas del anillo con rebabas y aristas vivas



*Figura 106* Eslabón de 50 mm requerido

Para los eslabones de los motores se requiere precisión por lo cual estos eslabones se optó por la manufactura en corte de chorro de agua asegurando así las dimensiones especificadas en planos para encajar los motores (ver Figura 107). En la Figura 108, se puede observar la calidad del acabado de la pieza.



**Figura 107** Piezas de 3 mm cortadas con chorro de agua



**Figura 108** Eslabón del motor

#### 4.1.2. Maquinado de piezas

Se requiere el maquinado de los anillos para la corredera (eje) del cuerpo. Los anillos se manufacturaron por medio de cilindro de acero ASTM 1020 de 100 mm de largo y 30 mm de diámetro, para obtener la pieza final se realizaron los siguientes procesos: (a) torneado, (b) taladrado.

En el torno se redujo el diámetro de cilindro a 28 mm (ver Figura 109), posteriormente en el mismo torno se taladró el cilindro con una broca de 19 mm (3/4 in). Con el uso del taladro fresador, se realizaron ranuras guías donde reposarían las piezas denominadas “orejas”, con un largo de 25 mm, un ancho de 2 mm y una profundidad de 2mm aproximadamente, agrupadas en 2 ranuras desfasadas 120°, como se puede observar en la Figura 111.



*Figura 109* Reducción del diámetro del cilindro metálico



*Figura 110* Fresado de ranuras guías en el cilindro metálico



*Figura 111* Ranuras guías para colocar las orejas

#### **4.1.3. Soldadura de piezas**

Las piezas a soldar son: (a) eslabones, (b) ejes del robot, (c) anillos y (d) cuerpo del robot. Se requiere soldar de 6 orejas a un tubo redondo de acero en parejas desfasadas a  $120^\circ$ , por lo cual se realizaron canales en el tubo para facilitar la colocación de las orejas. En un mandril divisor montado a una fresadora se procedió a la eliminación de material para realizar los canales. Posteriormente se colocaron las orejas previamente elaboradas a corte plasma y se utilizó una suelda TIG (ver Figura 112). El mismo proceso se implementó para los anillos (ver Figura 113).



**Figura 112** Eje de los cuerpos del robot



**Figura 113** Pieza "anillo" acabada

El eje del robot principal requiere que la placa doblada que cumple con la funcionalidad de soporte del motor como lo indica la Figura 114. La placa debe ser soldada en el extremo del eje con las orejas. Para el proceso se usó una suelda SMAW con electrodo E308. (ver Figura 115)



**Figura 114** Estructura del acople del motor para la limpieza de la tubería



**Figura 115** Estructura de soporte del motor para limpieza de tubería soldada al eje del robot

Los eslabones requieren soldar una placa de 2 mm de espesor para servir de apoyo al eslabón motor. Se realizó una soldadura de punto entre las placas. Posteriormente se realizó el taladrado necesario entre las placas soldadas como se puede observar en la Figura 116.



**Figura 116** Eslabón

Los cuerpos, primario y secundario se encuentran unidos por medio de un resorte de 70 mm de largo 20 mm de diámetro interno y constante 0.01962 Nm, el resorte es soldado en los cuerpos por medio de soldadura SMAW, utilizando el electrodo E308, realizando 3 puntos de soldadura en cada extremo. Con ayuda de una escuadra, se estableció una guía la cual permitiría que no exista un desfase entre las patas del robot en el cuerpo delantero y el posterior como lo indica la Figura 117. La estructura establecida por los dos cuerpos del robot y el resorte se puede observar en la Figura 118.



**Figura 117** Uso de una escuadra para impedir el desfase de las orejas entre los dos cuerpos del robot



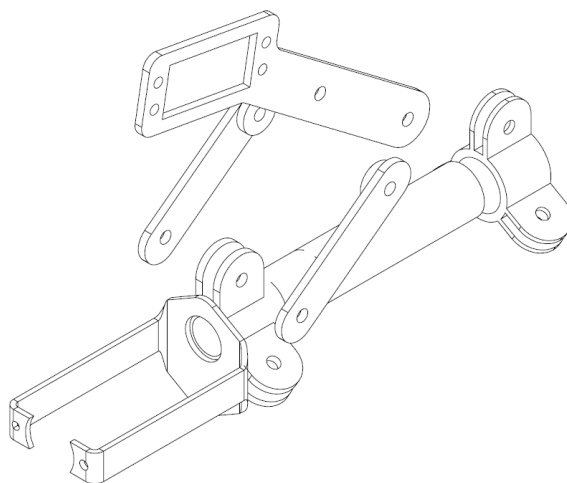


*Figura 118* Cuerpos del robot unidos utilizando un resorte

#### 4.1.4. Ensamble

Para el ensamble del robot se requieren las siguientes piezas: (a) cuerpo del robot, (b) 6 eslabones-motor, (c) 12 eslabones secundarios, (d) motor DC 12V, (e) 6 servomotores 12 Kg-cm, (f) placa motor, (g) 6 ruedas diámetro 60mm, (h) 6 acoples servos, (i) 6 resortes, (j) pernos y (k) tuercas de seguridad. Para el ensamble se procede a tomar las acciones mostradas en los planos (ver Figura 119).





**Figura 119** Esquema ensamble mecanismo tracción

El robot presenta 3 resortes en cada cuerpo que permiten el funcionamiento óptimo del mecanismo de tracción del robot. Los 6 resortes poseen una constante de  $0,004905 \text{ Nm}$  obtenido experimentalmente.

Una vez ensamblado el cuerpo del robot mide 500 mm de largo y 250 mm de diámetro en su posición de reposo como se muestra en la Figura 120: (a) vista frontal (diámetro) y (b) vista lateral (largo).



**Figura 120** Robot ensamblado: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral

## 4.2. Subsistema: Actuador de limpieza

En el capítulo 3 se clasificó al actuador de limpieza en 2 tipos: (a) Herramienta de limpieza superficial y (b) herramienta de limpieza para remoción de sólidos. La herramienta de limpieza superficial permite analizar la fricción entre la superficie interna de la tubería y la deflexión máxima de los cepillos cilíndricos. La herramienta de limpieza de remoción de sólidos facilita eliminación de cuerpos con suciedad que no se encuentran tangenciales a la pared interna de la tubería.

### 4.2.1. Herramienta de limpieza superficial

El limpiador del robot “herramienta de limpieza superficial” se conforma de (a) cepillos cilíndricos plásticos y (b) estructura de acero. La estructura de acero se conforma de en hexágono manufacturado en fresadora con un divisor (ver Figura 121) y 3 barras de acero ASTM 1020 soldadas y desfasados a 120°. Los cepillos cilíndricos se insertan en cada barra de la estructura conformando el limpiador (ver Figura 122).



*Figura 121* Pieza manufacturada en forma de hexágono



*Figura 122* Herramienta de limpieza superficial

#### **4.2.2. Herramienta de limpieza para remoción de sólidos**

El limpiador del robot denominado “herramienta de limpieza para remoción de sólidos” está formado por: (a) una estructura de acero se conforma de en hexágono, (b) unos brazos metálicos y (c) un cuerpo triangular. El hexágono es manufacturado en fresadora con un divisor, cumpliendo las mismas medidas del hexágono fabricado para la “herramienta de limpieza superficial”, 2 barras de acero ASTM 1020 soldadas y desfasados a  $180^\circ$  y unas barras soldadas al cuerpo formando uno filo que permitirán la remoción de sólidos en el centro de la tubería. En la Figura 123 se puede observar el diseño final del limpiador “herramienta de limpieza para remoción de sólidos”.

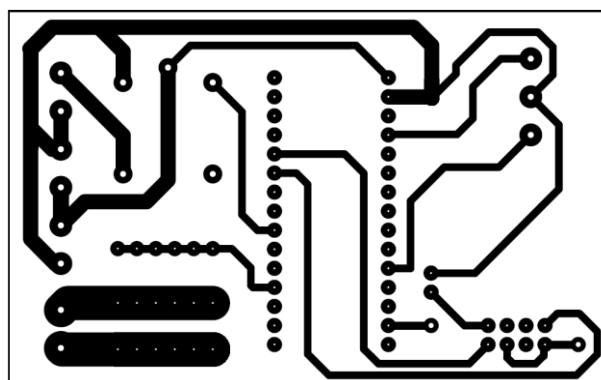


*Figura 123* Herramienta de limpieza para remoción de sólidos

### 4.3. Subsistema: Alimentación Eléctrica y recolección

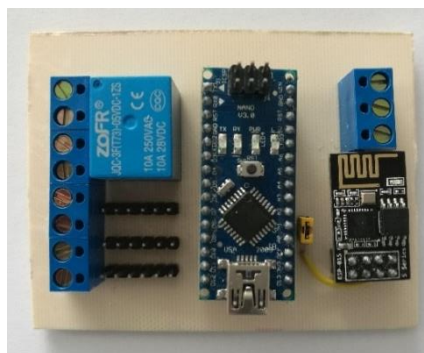
#### 4.3.1. Elaboración de la placa del circuito

La placa del circuito contiene (a) el controlador, (b) módulo de comunicación y (c) circuito de potencia. Para la impresión de la placa se usa el diseño implementado en el capítulo 3 (ver Figura 124). La placa de PCB utilizada para la impresión es de 2 oz/ft<sup>2</sup>.



*Figura 124* Diseño de la PCB del circuito electrónico

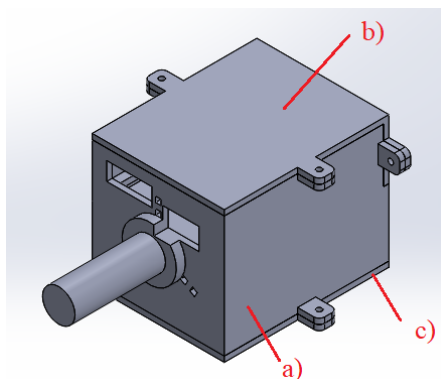
Después del baño en ácido, se taladró los orificios requeridos para los elementos eléctricos y posteriormente su soldada. Finalmente, se revisó la continuidad entre contactos y verificación de ausencia de cortocircuitos. La placa final mide 83 mm de largo y 64 mm de ancho como indica la Figura 125.



*Figura 125* Placa electrónica del robot

### 4.3.2. Manufactura de la coraza del circuito y reductor de voltaje

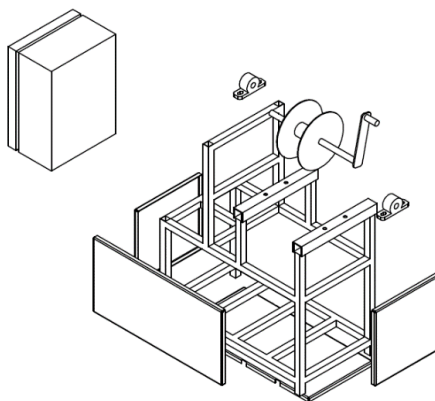
Se imprime una coraza en 3D formada por 3 piezas como lo indica la Figura 126: (a) Caja, (b) tapa 1 y (c) tapa 2. El material empleado para la realización de las piezas es PLA.



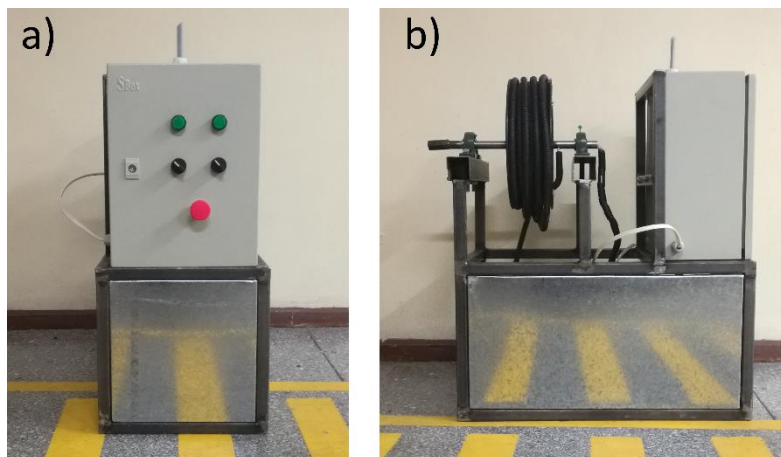
**Figura 126** Coraza del circuito y reductor de voltaje: (a) Caja, (b) tapa 1, (c) tapa 2

### 4.3.3. Manufactura del recolector

El recolector se compone de 3 partes: (a) estructura metálica, (b) mecanismo alimentador de cable y (c) tablero de control. La estructura mecánica se compone de varios perfiles de 25x25x1.2 mm según los planos de diseño (ver Figura 127) y 2 perfiles de 50x50x1.2 mm para las bases de las chumaceras del mecanismo de alimentación de cable (ver Figura 128).



**Figura 127** Planos de diseño de la estructura metálica del recolector



**Figura 128** Recolector ensamblado: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral

En la estructura se empernan 2 chumaceras con rodamientos de 20 mm de diámetros. Se taladra un tubo cilíndrico de 20 mm de diámetro para el paso de cable de alimentación. Un cilindro de 50 mm de diámetros se suelda a la mitad del tubo. A un extremo del tubo se suelda un prisma cuadrado de dimensiones de 17x17x30 mm para acoplar posteriormente una manivela. Finalmente se acopla en el cilindro de 50 mm de diámetro un carrete para sujeción del cable.

#### **4.3.4. Manufactura tablero de control**

El tablero de control contiene la fuente de suministro DC, el router del proyecto, portafusibles y elementos eléctricos. El tablero implementado es de 40x30x20 cm de doble fondo. En la puerta del tablero se procede a taladrar 5 agujeros para la colocación de 2 selectores, 2 luces piloto y un paro de emergencia (ver Figura 129). Se realizan agujeros en las paredes superior, lateral e inferior, para salida de antena del router, entrada de cables 120V y salida de cables 12V respectivamente.



**Figura 129** Puerta del tablero

En el doble fondo se colocan 2 portafusibles, la fuente DC, el router, borneras y las canaletas perforadas necesarias para la colocación de cables (ver Figura 130).



**Figura 130** Distribución de elementos y cableado de los elementos del tablero

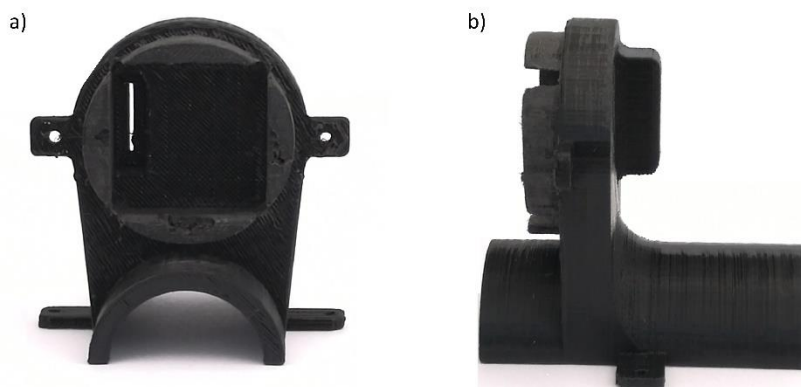
#### **4.4. Subsistema: Inspección**

El robot requiere de varias carcasas para el posicionamiento sujeción y protección de elementos. Las carcasas del robot son: (a) para la cámara, (b) para el circuito de cámara y (c) circuito de

control. Las carcasas se manufacturan por medio de impresión 3D en PLA según los diseños mostrados en el capítulo 3. La carcasa para la cámara se compone de 3 partes para la sujeción del lente de la cámara IP y su sujeción al robot (ver Figura 131). La carcasa para el circuito de la cámara se conforma de dos elementos (ver Figura 132). La carcasa del circuito de control se compone de 3 partes donde se depositarán el circuito de control y el regulador del voltaje del robot (ver Figura 133).



**Figura 131** Coraza Anillo de sujeción (a) Vista frontal, (b) Vista lateral



**Figura 132** Coraza Superior (a) Vista frontal, (b) Vista lateral





**Figura 133** Placa Base (a) Vista frontal, (b) Vista lateral

#### 4.5. Resumen

En el capítulo se trató de los procesos de manufactura, materiales y métodos de ensamble para fabricar el robot y todos sus componentes. En primera instancia se habló de la manufactura mecánica de la estructura del robot, en ella comprende la fabricación del mecanismo de locomoción, el ensamble de cuerpos y los actuadores en contacto con el cuerpo. También se habló de la manufactura de las herramientas de limpieza (limpieza de superficies y remoción de sólidos) que se requieren para completar el objetivo propuesto.

La manufactura del subsistema de recolección y alimentación energética, se encuentra dividido en 3 secciones: (a) estructura del recolector, (b) mecanismo de alimentación de cable y (c) tablero de control.

Además, el capítulo trató de la manufactura por medio de impresión de 3D para piezas que conforman: (a) la coraza de la cámara IP, (b) circuito de la cámara IP y (c) circuito de control y reductor de voltaje.

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

El quinto capítulo se refiere a las diferentes pruebas realizadas sobre el funcionamiento del tablero de control y robot, evaluando los resultados obtenidos. Las pruebas definen el correcto funcionamiento del mecanismo de locomoción, la comunicación de los módulos inalámbricos, la óptima operación de los servomotores y del motor que permite la limpieza de las tuberías.

#### 4.1. Pruebas

Se realizaron pruebas electro - mecánicas para encontrar el funcionamiento adecuado de cada componente que conforma los diferentes subsistemas. Además se realizaron pruebas robot en operación dentro de la tubería. Las pruebas elaboradas fueron: (a) tablero de control, (b) comunicación, (c) servomotores y motor de limpieza, (d) mecanismo de locomoción, (e) sistema de recolección de cable y (f) operación dentro de la tubería.

##### 4.1.1. Pruebas Tablero de Control

Las pruebas del Tablero de Control (ver Tabla 45) se las realizaron verificando que los dispositivos para la comunicación entre el panel y el robot estén encendidos. De acuerdo con la Figura 134, se debe colocar el selector 1 en ON, haciendo que se ilumine la luz piloto. Este selector se encargará del encendido del router, el cual creará una red inalámbrica llamada “Tesis” y permitirá la comunicación de la cámara IP al router. Pasados 20 segundos, se debe colocar el

selector 2 en ON, iluminando la luz piloto. Este selector se encargará del encendido de la fuente DC, el cual tiene un voltaje de salida de +12Vdc que alimentan a la ATmega328. En caso de emergencia, existe un pulsador tipo hongo, el cual corta alimentación de los dispositivos antes mencionados.

**Tabla 45**

*Parámetros y resultados de pruebas del Tablero de Control*

Items	Parámetros	Resultados
<b>Selector 1</b>	Encendido Luz Piloto1	Correcto, sin demora
	Encendido Router	Correcto, sin demora
	Encendido Cámara IP	Correcto, tipo de autoconfiguración: 20 segundos
<b>Selector 2</b>	Encendido Luz Piloto 2	Correcto, sin demora
	Encendido Fuente DC	Correcto, sin demora
<b>Paro de Emergencia</b>	Paro tipo hongo	Correcto, corta la alimentación sin demora



**Figura 134** Tablero de Control: (a) Selector 1, (b) Selector 2

#### 4.1.2. Pruebas de comunicación

De acuerdo con estas pruebas se comprueba la comunicación entre los diferentes dispositivos de control presentes en el robot y la interfaz gráfica, haciendo que el robot pueda inspeccionar en video la tubería, tomar fotos y limpiar la tubería. La distancia de operación del robot es de 15 metros.

Las pruebas realizadas para la comunicación son: (a) router – cámara IP (ver Tabla 46), (b) router - tarjeta de control (ver Tabla 47) y (c) router – HMI (ver Tabla 48).

La conexión es el tiempo establecido para la comunicación entre dos dispositivos. El envío y la recepción de paquetes de datos, permite conocer la latencia entre los dos dispositivos.

**Tabla 46**

*Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y Cámara IP*

Parámetros	Resultados
Conexión Router – Cámara IP	Correcto – tiempo de conexión: 19 s
Envío de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 9 ms
Recepción de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 9 ms

**Tabla 47**

*Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y Tarjeta de control*

Parámetros	Resultados
Conexión Router – Tarjeta de control	Correcto – tiempo de conexión: 20 s
Envío de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 5 ms
Recepción de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 5 ms

**Tabla 48***Resultados de las pruebas de comunicación entre Router y HMI*

Parámetros	Resultados
Conexión Router – HMI	Correcto - tiempo de conexión: 3 s
Envío de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 1 ms
Recepción de los paquetes de datos	Correcto – latencia: 1 ms

#### 4.1.3. Pruebas de Servomotores y motor de limpieza

Las pruebas para verificar el correcto funcionamiento y tiempo de respuesta de los servomotores LW-20MG (ver Tabla 49) se las realizó sin colocar los motores en los eslabones que los abrazan. Utilizando un reductor de 12 Vdc a 7 Vdc se alimentó cada uno de los servomotores y usando el chip del controlador ATmega328 se proporcionó el PWM para mover las ruedas del robot.

**Tabla 49***Parámetros y resultados de pruebas a los servomotores*

Parámetros	Resultados
Encendido de servomotores	Correcto, tiempo real: 5ms
Movimiento antihorario	Correcto, tiempo real: 5ms
Movimiento horario	Correcto, tiempo real: 5 ms
Sobrecalentamiento	No existe

Utilizando el mismo controlador y un circuito para controlar el motor, se procedió a verificar el funcionamiento y tiempo de respuesta del motor AngelANQI0001GB, el cual permitirá la limpieza de la tubería. Los resultados de estas pruebas se las puede observar en la Tabla 50.

**Tabla 50***Parámetros y resultados de pruebas del motor de limpieza*

Parámetros	Resultados
Encendido del motor	Correcto, tiempo real: 5ms
Movimiento antihorario	Correcto, tiempo real: 5ms
Movimiento horario	No configurado
Sobrecalentamiento	No existe

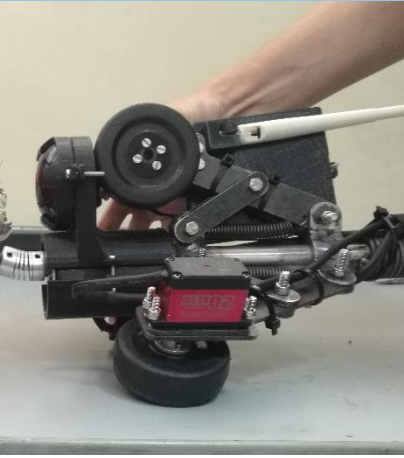

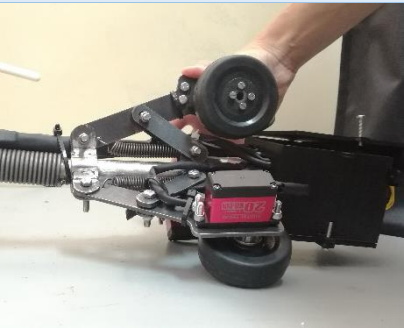
#### 4.1.4. Pruebas del Mecanismo de Locomoción

Las pruebas del mecanismo de locomoción se dividieron en dos partes: (a) sistema de tracción delantero y (b) sistema de tracción trasero. Ambas partes presentan dos estados como son el Estado 1 (estado de reposo, en el cual sus eslabones y sus ruedas están completamente abiertas) y el Estado 2 (estado de operación, en el cual el mecanismo está comprimido, permitiendo una mejor adherencia de las ruedas a la pared interna de la tubería). Los resultados de estas pruebas se puede observar en la Tabla 51.

**Tabla 51***Parámetros y resultados de pruebas del mecanismo de locomoción*

Parámetros	Estados	Imágenes	Resultados
Sistema de tracción delantero	Estado 1		Correcto, sin problema

CONTINÚA 

	Estado 2		Correcto, sin bloqueo del sistema
Sistema de tracción trasero	Estado 1		Correcto, sin problema
	Estado 2		Correcto, sin bloqueo del sistema



#### 4.1.5. Pruebas del Sistema de recolección del cable.

El robot consta de un cordón umbilical, en el cual transporta la energía necesaria para alimentar la tarjeta de control, los servomotores, el motor de limpieza y la cámara IP. Las pruebas del sistema de recolección del cable se clasificaron en dos partes: (a) mecanismo manivela y (b) cables tensores.

El mecanismo manivela presenta un carrete que almacena todo el cordón umbilical del robot, el cual es recogido con la ayuda de una manivela. Presenta dos estados: (a) Estado 1 y (b) Estado 2. El Estado 1, es cuando el cable está recogido en el carrete. En el Estado 2, el cable está fuera del carrete (el robot está operando dentro de la tubería). Los resultados de las pruebas del mecanismo se puede observar en la Tabla 52.

**Tabla 52**

*Parámetros y resultados de pruebas del mecanismo manivela*

Parámetros	Estados	Imágenes	Resultados
<b>Mecanismo manivela</b>	Estado 1		Correcto, sin problema en colocar el cable al carrete
	Estado 2		Correcto, el cable sale sin problema del carrete

Se realizó una prueba de tracción a una sección de material del cable umbilical (conjunto manguera PVC y cables eléctricos), para determinar la fuerza máxima del cable umbilical, la fuerza máxima se determinó como la fuerza sin deformación longitudinal y transversal del cable (zona



elástica) para garantizar que los cables eléctricos internos de la cable umbilical no sufran daños. La fuerza obtenida en la prueba de tracción es de 23 Kgf.

#### 4.1.6. Pruebas de operación dentro la tubería.

Las pruebas de operación dentro de la tubería permitieron determinar la pendiente máxima de trabajo del robot y las respectivas velocidades máximas y mínimas en ellas. Para esto se tomó el tiempo de recorrido del robot para un trayecto recto de tubería de 700 mm de largo. La tubería se inclinará desde  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en intervalos de  $15^\circ$ , para determinar el valor de velocidad se procede a la toma de 5 valores por estado. En la Tabla 53 se encuentran los datos adquiridos y resultados de las pruebas de avance determinando la velocidad máxima y mínima de operación del robot en diferentes inclinaciones.

**Tabla 53**  
*Pruebas de velocidad*

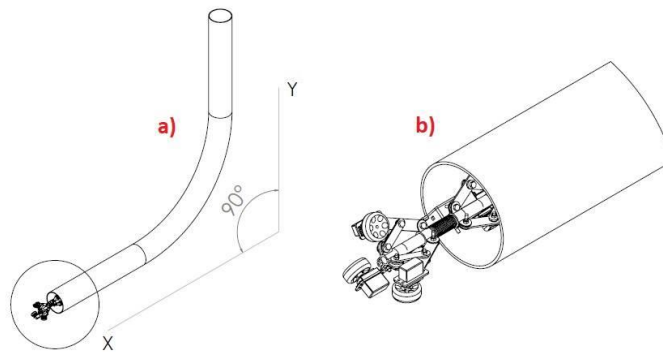
Pendiente [grados]	Tiempo [s]	Velocidad Máxima [m/s]	Velocidad máxima Media [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad Mínima [m/s]	Velocidad mínima Media [m/s]
<b>0</b>	6.240	0.125	0.126	18.057	0.022	0.022
	6.240	0.125		18.330	0.022	
	6.630	0.118		17.999	0.022	
	6.045	0.129		17.765	0.023	
	5.850	0.133		18.467	0.022	
<b>15</b>	7.059	0.110	0.110	19.149	0.021	0.021
	6.650	0.117		19.344	0.021	
	7.371	0.106		18.545	0.022	
	6.845	0.114		18.233	0.022	
	7.605	0.103		18.740	0.021	
<b>30</b>	7.976	0.098	0.099	21.177	0.019	0.019
	7.995	0.098		20.982	0.019	
	7.644	0.102		20.378	0.020	
	7.586	0.103		21.684	0.018	

CONTINÚA 

	8.093	0.096		21.431	0.019	
<b>45</b>	10.374	0.075	0.076	22.659	0.018	0.018
	10.628	0.073		22.328	0.018	
	9.984	0.078		22.133	0.018	
	10.218	0.076		22.757	0.018	
	10.413	0.075		21.704	0.018	
<b>60</b>	12.129	0.064	0.064	24.297	0.016	0.016
	12.363	0.063		24.512	0.016	
	11.934	0.065		24.648	0.016	
	12.188	0.064		23.849	0.017	
	12.578	0.062		25.058	0.016	
<b>75</b>	13.884	0.056	0.055	26.832	0.015	0.015
	14.313	0.054		26.442	0.015	
	13.884	0.056		26.657	0.015	
	14.157	0.055		26.871	0.015	
	14.313	0.054		26.228	0.015	
<b>90</b>	18.603	0.042	0.042	28.568	0.014	0.014
	18.428	0.042		28.373	0.014	
	18.857	0.041		28.860	0.014	
	18.057	0.043		26.657	0.015	
	18.213	0.043		27.047	0.015	

#### 4.1.6.1. Tubería en vertical

Se realizaron pruebas del mecanismo de locomoción del robot en tuberías verticales, permitiendo conocer que el robot puede ascender tuberías de hasta 90°. En la Figura 135, se puede observar la tubería en posición vertical.



**Figura 135** Prueba en tubería vertical: a) esquema, b) acercamiento

#### 4.16.2. Tubería en horizontal

Las tuberías en posición horizontal se presentan con una alta frecuencia en las líneas sanitarias de casa, edificios y empresas, es por ello que se realizaron pruebas del mecanismo de locomoción del robot, sacando como resultado que el robot puede operar en tuberías rectas y de codos de  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  de codo de radio largo. En la Figura 136, se muestra la tubería horizontal con un accesorio tipo codo de radio largo de  $90^\circ$ .



**Figura 136** Tubería horizontal con un accesorio tipo codo de radio largo de  $90^\circ$

#### 4.1.6.3. Inspección y remoción de sólidos

Se establecieron pruebas para la inspección y remoción de sólidos en la tubería. Para la inspección se comprobó el correcto funcionamiento de la cámara dentro la tubería con presencia de sólidos (ver Figura 137) y sin sólidos (ver Figura 138). En la Figura 139 se muestra una fotografía que el robot capturó dentro de la tubería entre la unión del codo de 90° y la tubería recta.



*Figura 137* Inspección de tubería sin sólidos



*Figura 138* Inspección de tubería con sólidos






*Figura 139* Inspección de la tubería entre la unión del codo de 90° y la tubería recta

Para la remoción de sólidos se estableció dos tipos de pruebas: (a) remoción de sólidos de obstrucción y (b) remoción de sólidos de las paredes internas de la tubería. En la Tabla 54, se puede observar una tabla comparativa de los tipos de remoción de sólidos de obstrucción, empleando 2 diferentes herramientas y su tiempo de operación. Las pruebas se realizaron en una tabla de madera triplex, el cual presenta propiedades más elevadas como la resistencia a impactos que los sólidos que se pueden presentar como obstrucción de las tuberías con la herramienta de limpieza.

**Tabla 54**

*Tabla comparativa de los tipos de remoción de sólidos de obstrucción y sus herramientas*

Parámetros	Herramienta	Tiempo	Imágenes	Resultados
Remoción de sólidos de obstrucción	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos	1 minuto		Correcto funcionamiento, penetración de 1 mm
	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos	2 minutos		Correcto funcionamiento, penetración de 2 mm
	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos	5 minutos		Correcto funcionamiento, penetración de 3 mm

CONTINÚA



	Herramienta de limpieza para remoción de sólidos utilizando una broca	2 minuto 	Correcto funcionamiento, penetración de 8 mm
--	--	--	---

#### 4.1.6.4. Limpieza de superficie interna de la tubería

Para la prueba de limpieza de superficie interna, se procedió a aplicar una capa de lodo y piedras. La capa estaba conformada por un espesor entre 2 mm y 7 mm en una tubería de largo de 700 mm como se muestra en la Figura 140.



**Figura 140** Suciedad inicial dentro de la tubería

El robot realizó una pasada inicial de limpieza a su mínima velocidad con pausa de avance de 3 segundos cuando se presentaba un obstáculo (piedra o sólido) para facilitar a la herramienta la remoción de dicho impedimento. Al culminar la primera pasada, se presenta una tubería sin sólidos con una suciedad reducida como se ven en las Figura 141 y Figura 142.



**Figura 141** Trabajo realizado por el robot



**Figura 142** Resultados de la primera limpieza del robot dentro de la tubería



La herramienta de limpieza superficial después de la primera limpieza acumuló gran cantidad de suciedad como se muestra en la Figura 143. En la Tabla 55 se presenta una comparación entre el estado inicial de la tubería, la primera y segunda limpieza.



**Figura 143** Herramienta luego de la primera limpieza

**Tabla 55**

*Tabla comparativa de la limpieza de las paredes internas de la tubería*

Parámetros	Estado inicial	Imagen	Observaciones
<b>Limpieza de paredes internas de la tubería</b>	Estado inicial		Se presenta una capa de suciedad entre 2 a 7 mm con piedras.
	Primera Limpieza		Nivel de limpieza: 60%

CONTINÚA







## 4.2. Resumen

Las pruebas realizadas se dividen en: (a) tablero de control, (b) comunicación, (c) servomotores y motor de limpieza, (d) mecanismo de locomoción, (e) limpieza de superficie interna, (f) herramienta de remoción y (g) velocidades de avance.

Las pruebas de tablero de control muestran el estado y funcionamiento correcto funcionamiento de los elementos del tablero de control. Las pruebas de comunicación demuestran la distancia de comunicación de la cámara y módulo de comunicación al router de la estructura de comunicación. Las pruebas de actuadores y mecanismo de locomoción comprueban el funcionamiento adecuado de los actuadores y su respuesta al HMI y el funcionamiento mecánico del mecanismo de locomoción.

La prueba de velocidades de avance toma datos de tiempos de avance del robot para una distancia predeterminada de 700 mm de tubería y el cálculo de la velocidad de operación. La prueba se realiza varias veces variando el ángulo de inclinación de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

Para la prueba de herramienta de remoción de solidos se aplicó una plancha de 10 mm de espesor de madera triplex, en la cual se activó el actuador de limpieza con una velocidad mínima de avance.

Se obtuvieron diferentes penetraciones con varios tiempos y con aplicación de diferente herramienta.

La limpieza de la superficie interna de la tubería se realiza en un trayecto de 700 mm de largo de tubería la cual se recubre de capas de lodo, tierra y piedras de 2 a 7 mm de espesor. El robot se desplaza por la sección a baja velocidad con el actuador de limpieza activo, se requiere de dos pasadas para aumentar el porcentaje de limpieza de la tubería.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sexto capítulo se refiere a las conclusiones y recomendaciones del proyecto de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el capítulo anterior. Se mencionan datos técnicos como la velocidad en tuberías (vertical y horizontal), sus factores de seguridad y el tiempo de respuesta de los diferentes dispositivos inalámbricos. Además se establece un prototipo de robot para un trabajo futuro.

#### 6.1. Conclusiones

- El diseño implementado en este proyecto cumple con el objetivo principal de limpieza de tuberías de PVC de 200 mm de diámetro, por medio de un robot ligero. El proyecto permitió la limpieza de una tubería en 90%.
- Se requiere de 2 tipos de limpiadores para la limpieza de la tubería, herramienta de limpieza de superficie interna y herramienta de remoción de sólidos.
- La herramienta de remoción de sólidos se dispersa en 20 mm del centro de la tubería reduciendo la eficiencia de operación de la herramienta.
- Utilizando una broca de HSS y 8 mm de diámetro se logra crear un punto de apoyo para la herramienta de remoción de sólidos, permitiendo mayor perforación a la herramienta de remoción.
- El sistema de locomoción del robot le permite un desplazamiento dentro de tuberías con pendientes entre 0° a 90°. Permitiendo una velocidad máxima de traslación de 0.12 m/s en

estado horizontal y 0.04 m/s en estado vertical. La velocidad mínima para la tubería en horizontal fue de 0.02 m/s y en vertical fue de 0.01 m/s.

- El mecanismo de las ruedas del robot permite un cambio de diámetro entre 150 mm a 250 mm. Permitiendo al robot la inspección de tuberías de diámetros entre 200 mm y 250 mm.
- En el análisis de esfuerzo se presenta factores de seguridad en la estructura del robot entre 6.7 y 183.5, mostrando una adecuada selección de materiales para la manufactura. La herramienta de remoción de sólidos presentó un factor de seguridad de 11.28 en estado máximo de torque del motor de limpieza determinando al motor como factor limitante en la remoción de sólidos.
- El motor de limpieza posee un torque máximo de 12 Kg-cm, con el cual se permite aplicar una fuerza máxima en la herramienta de 49.05 N, Considerado un estado normal de operación al 60% de capacidad el motor la herramienta aplica una fuerza máxima de 29,43 N.
- El sistema posee un tiempo de respuesta de 5 milisegundos de entre HMI y controlador. La latencia de video capturado por la cámara IP y la HMI es de 9 milisegundos.
- La interfaz presenta video en tiempo real de la visión del robot dentro de la tubería. La imagen entregada opera en 2 modos, visión a color y blanco - negro (nocturno), dependiendo de la luminiscencia del medio en la cual se encuentre.

## **6.2. Recomendaciones**

- Se recomienda la manufactura en aluminio o materiales ligeros y resistentes para reducción de peso de la estructura.
- Para facilitar el trabajo realizado por las herramientas de limpieza se sugiere la implementación de una boquilla que entregue agua a presión para la limpieza. El diseño mecánico del recolector

se recomienda automatizar el mismo para la recolección y alimentación del cable umbilical del carrete.

- Se puede implementar una comunicación con un módulo Wifi dúplex permitiendo eliminando la posibilidad de pérdida de paquetes de datos y la necesidad de priorizar mensajes en caso de conflicto de uso de vía de comunicación.
- Un diseño de herramientas de limpieza de diámetro variable permitirá al robot limpiar un rango de tuberías de diferentes diámetros. Así mismo el cambio de resortes de mecanismo de las ruedas por resortes cortos que cumplan con la fuerza requerida permitirá al robot la extensión de sus eslabones para acople de tuberías de 350 mm de diámetro.
- Para el uso de herramientas flexibles, se recomienda el uso de acoples flexibles industriales.
- El uso de actuadores ‘waterproff’, diseño y aplicación de materiales herméticos permite la eliminación de la limitación del proyecto de limpieza en tuberías seca.

### **6.3. Trabajo futuro**

Se recomienda un rediseño del cuerpo del robot integrando el eje estructural del robot y locación del actuador de limpieza en uno solo reduciendo la longitud total del robot facilitando el giro del robot dentro de codos cerrados y herramientas de limpieza de mayor tamaño. También el uso de un actuador de limpieza AC permitiendo mayor potencia con menor amplitud de corriente. Además de la reducción de número de motores de locomoción a 3 reduciendo el consumo energético y peso del robot (ver *Figura 144*).



**Figura 144** Diseño recomendado a futuro

Para facilitar el trabajo realizado por las herramientas de limpieza se sugiere la implementación de una boquilla que entregue agua a presión para la limpieza. El diseño mecánico del recolector se recomienda automatizar el mismo para la recolección y alimentación del cable umbilical del carrete.

Se requiere la implementación de un o más grados de libertad a la cámara de inspección para cubrir la tubería en su totalidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. Mateos, L., & Vincze, M. (2013). *In-pipe Cleaning Mechanical System for*. Wien.
- Aguilar, E. R. (2012). *Diseño de un robot de inspeccion y vigilancia*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Ahmadian Mazraeh, A., Khaksar, W., B. Ismail, F., & Sahari, K. (2016). *Development of Ultrasonic Crack Detection System on Multi-Diameter PIG*. Tokyo: IEEE.
- Amazon. (2017). *Amazon website*. Obtenido de <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>
- Asociación Argentina de Control Automático. (2008). *Una introducción de robots móviles*. Buenos Aires.
- Association Connecting Electronics Industries. (1998). *Association Connecting Electronics Industries*. Obtenido de [http://www.sphere.bc.ca/class/downloads/ipc\\_2221a-pcb%20standards.pdf](http://www.sphere.bc.ca/class/downloads/ipc_2221a-pcb%20standards.pdf)
- Balamrobots. (2017). *Balamrobots website*. Obtenido de <https://www.balamrobotsmexico.com/pagina-de-producto/robot-con-orugas-el-devastador>
- Boston Dynamics. (2017). *Boston Dynamics website*. Obtenido de <https://www.bostondynamics.com/spot-mini>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecanica de Shigley*. Mexico: McGraw Hill.
- Cumond. (2014). *Cumond website*. Obtenido de <http://cumond.com/product/showproduct.php?id=126&lang=en>
- Danduct Clean. (2013). *Danduct Clean website*. Obtenido de <http://www.danduct.com/products/16-dry-ventilation-cleaning/cleaning-inspection-equipment>

- Di Matteo, L., Verrastro, C., & Roitman, J. (2010). *Robot para exploracion de tuberias de diseño compacto, modular, estanco, y de seguridad intrinseca*. Buenos Aires.
- Díaz Andrade, M. S., & Sarmiento Astudillo, T. A. (2015). *Estudio y diseño de un robot explorador de ductos mediante la captura de imagenes en tiempo real utilizando un interfaz graficoremoto*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Dudek, G., & Jenkin, M. (2000). *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Enviromental Expert. (2017). *Enviromental Expert website*. Obtenido de <https://www.environmental-expert.com/products/power-cutter-model-200-milling-robot-for-vertical-pipes-251012>
- Erdman, A. (1998). *Diseño de mecanismos, análisis síntesis*. Minnesota: Pearson.
- Girard Industries. (2017). *Girard Industries website*. Obtenido de [https://www.dmdirmark.com/uploads/product/Girard/brochure\\_steel\\_mandrel.pdf](https://www.dmdirmark.com/uploads/product/Girard/brochure_steel_mandrel.pdf)
- Gwelltimes. (2016). *Gwelltimes*. Obtenido de <http://gwell.cc>
- Hidrotec. (2016). *Hidrotec webside*. Obtenido de <https://www.hidrotec.com/blog/mantenimiento-preventivo-de-tuberias-y-bajantes-en-comunidades-de-propietarios/>
- Hokuryo. (2017). *Hokuryo website*. Obtenido de <http://www.kabu-hokuryo.com/en/product/product3-cc.html#01>
- ID-tec. (2017). *Id-tec website*. Obtenido de <https://www.environmental-expert.com/downloads/model-r300t3-sewer-robot-brochure-632885>
- Ingasoil. (2017). *Manual de operación y mantenimiento*. Obtenido de [https://www.ingasoil.com/media/manual\\_de\\_operacion\\_y\\_mantenimiento.pdf](https://www.ingasoil.com/media/manual_de_operacion_y_mantenimiento.pdf)
- Instituto Superior Técnico. (Marzo de 2002). *Institute for Systems and Robotics of Lisboa*. Obtenido de <http://users.isr.ist.utl.pt/~mir/cadeiras/robmove1/Introduction.pdf>



- IPS Robot. (2017). *IPS Robot website*. Obtenido de <http://es.ipsrobot.com/pid17610596/Drain-Sewer-Line-Camera-Locator-System.htm>
- iRobot. (2017). *iRobot*. Obtenido de <http://www.irobot.es/robots-domesticos/aspiracion>
- Jetblack Air. (2017). *Jetblack Air website*. Obtenido de <https://www.jetblack-air.com/>
- Karcher. (2017). *Karcher website*. Obtenido de <https://www.kaercher.com/es/home-garden/limpiadora-aspiradora-de-vapor.html>
- Kongu College. (2016). *Design and Development of Pipeline Cleaning Robot*. Erode: International Journal of Engineering Research.
- Lessmann. (2017). *Lessmann website*. Obtenido de [http://www.lessmann.com/pdf/es/07\\_Innenbuersten\\_es.pdf](http://www.lessmann.com/pdf/es/07_Innenbuersten_es.pdf)
- Maritime Robotics. (2017). *Maritime Robotics website*. Obtenido de <https://maritimerobotics.com/mariner-usv/>
- National Ocean Service. (Febrero de 2015). *Ocean Service*. Obtenido de <http://oceanservice.noaa.gov/facts/auv-rov.html>
- Neovision. (2017). *Neovision website*. Obtenido de <http://www.jettyrobot.com/wp-content/uploads/2013/09/JettyBrochure0820131.pdf>
- Patiño Guevara, D. A., Colorado Montano, J., & Orozco Martínez, J. C. (2015). *Control de un robot manipulador aplicado a la reparación de tuberías hidrosanitarias*. Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogota.
- Ramirez Molina, D. F. (2013). *Diseño de dispositivo móvil teleoperado para inspección de tuberías*. Medellin: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Ridgid. (2017). *Ridgid website*. Obtenido de <https://www.ridgid.com/ec/es/limpiador-de-chorro-de-agua-kj3100>

- Robotics Design. (2017). *Robotics Design*. Obtenido de <http://www.roboticsdesign.qc.ca/assets/PDF-Specification/ARI-100.pdf>
- Robotics Design. (2017). *Robotics Design website*. Obtenido de <http://www.roboticsdesign.qc.ca/mobile-robots/hvac-cleaning-and-inspection/ari100/>
- Robotnik. (2017). *Robotnik website*. Obtenido de <http://www.robotnik.es/robots-moviles/summit-xl/>
- Senplades. (2013). Obtenido de <http://www.buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional>
- Serrano Perez, J. (2010). *Diseño y Construcción de un robot móvil con dos motores independientes*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Urdaneta Lima, M. A. (2012). *Diseño y Desarrollo de un robot de inspección de tuberías*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Yacuzzi, E. (2003). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Ciudad de Buenos Aires: Universidad del CEMA.