



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

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
ROBOT ELECTRONEUMÁTICO ESCALADOR PARA  
EXPLORACIÓN DE SUPERFICIES VERTICALES LISAS**

**MAXWELL ARBEY SALAZAR GUILCAMAIGUA**

**MARIO ANDRÉS VITERI GAIBOR**

**DIRECTOR: ING. LUIS ECHEVERRÍA**

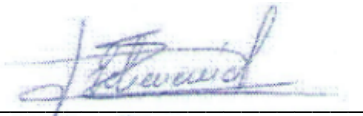
**CODIRECTOR: ING. VÍCTOR PROAÑO**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

## CERTIFICADO

Certificamos que el presente proyecto titulado “Diseño y construcción de un prototipo de robot electroneumático escalador para exploración de superficies verticales lisas”, fue desarrollado en su totalidad por los señores Maxwell Arbey Salazar Guilcamaigua y Mario Andrés Viteri Gaibor, bajo nuestra dirección.



Ing. Luis Echeverría

DIRECTOR



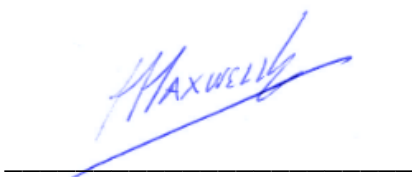
Ing. Víctor Proaño

CODIRECTOR

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente proyecto titulado “Diseño y construcción de un prototipo de robot electroneumático escalador para exploración de superficies verticales lisas”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.



Maxwell Salazar Guilcamaigua

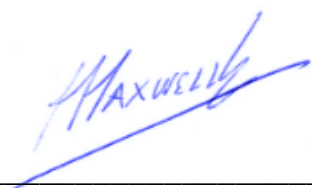


Mario Viteri Gaibor

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, Maxwell Arbey Salazar Guilcamaigua y Mario Andrés Viteri Gaibor, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo "Diseño y construcción de un prototipo de robot electroneumático escalador para exploración de superficies verticales lisas", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, julio de 2015



Maxwell Salazar



Mario Viteri

## DEDICATORIA

A mi familia por su constante apoyo durante esta etapa académica, a mis padres Aida y Ramiro por sus consejos, sus valores, por la motivación que me ha permitido ser una persona de bien.

Maxwell Arbey Salazar Guilcamaigua

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, principalmente a mis padres quienes me apoyaron todo el tiempo, a mis amigos quienes fueron también un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Mario Andrés Viteri Gaibor

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por su constante apoyo económico, lo que permitió que esta tesis tome forma.

A mi compañero de tesis, que con su conocimiento brindo aportes útiles y valiosos para el desarrollo del proyecto

A los ingenieros Luis Echeverría y Víctor Proaño quienes siempre estuvieron dispuestos a orientarnos y brindarnos sus conocimientos.

Maxwell Arbey Salazar Guilcamaigua

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, por brindarme ese apoyo y esa confianza incondicional, a mis padres por dar aportes invaluable que me servirán para toda mi vida.

A los ingenieros Luis Echeverría y Víctor Proaño por haber aportado con su experiencia y conocimientos y a todas las personas que de una u otra forma han ayudado a la realización de este proyecto.

Mario Andrés Viteri Gaibor



## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ABSTRAC .....	3
CAPÍTULO I.....	4
1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....	4
1.2 ANTECEDENTES.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	6
1.4 ÁREA DE INFLUENCIA.....	7
1.5 OBJETIVOS.....	8
1.5.1 Objetivo General .....	8
1.5.2 Objetivos Específicos.....	8
1.6 ALCANCE.....	9
1.6.1 ALCANCE MECÁNICO .....	9
1.6.2 ALCANCE ELECTRÓNICO .....	10
CAPITULO II.....	11
2 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	11
2.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS .....	11
2.1.1 Robótica .....	11
2.1.2 Robot.....	11
2.1.3 Robots Móviles.....	12
2.1.4 Robots Escaladores .....	14
2.1.5 Grados de Libertad.....	15
2.1.6 Vacío .....	16
2.1.7 Rugosidad.....	17
2.2 COMPONENTES MECÁNICOS .....	18
2.2.1 Cilindros Neumáticos .....	18
2.2.2 Electroválvulas .....	19
2.2.3 Ventosas de Vacío .....	20

2.2.4	Generador de Vacío .....	21
2.3	COMPONENTES ELECTRÓNICOS.....	22
2.3.1	Placa Arduino .....	22
2.3.2	Relé.....	23
2.3.3	Servomotor.....	23
2.4	SENSORES.....	24
2.4.1	Sensor Magnético .....	25
2.4.2	Sensor de Presión.....	26
2.4.3	Sensor Ultrasónico .....	26
2.5	TIPOS DE ACCIONAMIENTO.....	27
2.5.1	Accionamiento Eléctrico .....	27
2.5.2	Accionamiento Neumático.....	28
2.5.3	Accionamiento Mixto .....	28
CAPITULO III.....		29
3	DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	29
3.1	TRABAJOS PREVIOS .....	30
3.2	SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES .....	32
3.3	CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....	32
3.3.1	Accionamiento directo.....	33
3.3.2	Dispositivo de Sujeción .....	33
3.4	DISEÑO MECÁNICO.....	34
3.4.1	Estructura mecánica.....	34
3.4.1.5	Mecanismo de Descenso de Patas .....	40
3.4.2	Estructura final del robot .....	45
3.5	DISEÑO NEUMÁTICO.....	46
3.5.1	Selección de Ventosas.....	46
3.5.2	Selección de Cilindros.....	53
3.5.3	Selección de Generadores de Vacío.....	56
3.5.4	Selección de Electroválvulas.....	60
3.5.5	Circuito Neumático .....	61
3.6	DISEÑO ELECTRÓNICO .....	62
3.6.2	Selección de servomotores .....	62
3.6.3	Placa Central ARDUINO .....	67
3.6.4	Diseño de circuitos eléctricos.....	69
3.6.5	Diseño del sistema de mando .....	71

3.7	INSTRUMENTACIÓN .....	73
3.7.2	Uso del Sensor Magnético .....	73
3.7.3	Uso del Sensor de Presión.....	73
3.7.4	Uso del Sensor Ultrasónico .....	75
CAPITULO IV.....		77
4.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL ROBOT.....	77
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO BASE Y ARTICULACIONES ....	77
4.2	ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA .....	77
4.3	ENSAMBLE DE ELEMENTOS NEUMÁTICOS .....	85
4.3.1	Ensamble de Cilindros Neumáticos.....	85
4.3.2	Colocación de ventosas de vacío.....	85
4.3.3	Montaje de generadores de vacío .....	86
4.3.4	Montaje de Electroválvulas .....	86
4.3.5	Conexiones neumáticas .....	88
4.4	ENSAMBLE DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS .....	88
4.4.1	Colocación de la placa Arduino .....	88
4.4.2	Montaje de servomotores.....	89
4.4.3	Conexiones eléctricas .....	91
4.5	MONTAJE DE SENSORES.....	92
4.5.1	Montaje de sensores magnéticos.....	92
4.5.2	Montaje de sensor Ultrasónico .....	93
4.5.3	Montaje de Sensor Diferencial de Presión .....	94
CAPITULO V.....		95
5.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO .....	95
5.1	Función de los Sensores .....	96
5.1.1	Función del Sensor de presión diferencial .....	96
5.1.2	Función del Sensor ultrasónico .....	96
5.1.3	Función del Sensor magnético .....	97
5.2	LED RGB .....	97
5.3	CONEXIONES PREVIAS .....	98
5.4	INICIALIZACIÓN.....	99
5.5	ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS .....	100
5.5.1	Paso Hacia Adelante.....	101
5.5.2	Paso Hacia Atrás.....	102
5.5.3	Giro Hacia la Derecha .....	104

5.5.4 Giro Hacia la Izquierda.....	105
CAPITULO VI.....	106
6. CALIBRACIÓN Y PRUEBAS.....	106
6.1 CALIBRACIÓN DE SERVOMOTORES.....	106
6.2 CALIBRACIÓN DE SENSORES.....	106
6.2.1 Calibración del sensor de presión diferencial.....	106
6.2.2 Calibración de sensor Ultrasónico.....	107
6.2.3 Calibración de sensor magnético.....	107
6.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	108
6.3.1 Servomotores.....	108
6.3.2 Pistones.....	108
6.3.3 Válvulas.....	109
6.3.4 Pruebas en Ventosas.....	109
6.3.5 Pruebas de Sujeción.....	110
6.3.6 Pruebas de Desplazamiento.....	112
CAPITULO VII.....	113
7. ASPECTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS.....	113
7.1 COSTOS DIRECTOS.....	113
7.2 COSTOS INDIRECTOS.....	116
CAPITULO VIII.....	117
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	117
8.1 CONCLUSIONES.....	117
8.2 RECOMENDACIONES.....	118
Referencias.....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relación profundidad de aspereza y las clases de rugosidad .....	17
Tabla 2 Diámetro de las ventosas según la fuerza de aspiración .....	51
Tabla 3 Características del cilindro seleccionado .....	56
Tabla 4 Capacidad de aspiración para la evacuación de una ventosa .....	57
Tabla 5 Características de electroválvula 5/2 .....	60
Tabla 6 Características de la electroválvula 3/2.....	61
Tabla 7 Características del servomotor de las patas externas .....	64
Tabla 8 Características del servomotor de las patas internas .....	65
Tabla 9 Características del servomotor de giro.....	66
Tabla 10 Características de la placa arduino .....	69
Tabla 11 Características del sensor de presión diferencial.....	74
Tabla 12 Características del sensor ultrasónico .....	75
Tabla 13 Significado de colores en el mando a distancia .....	98
Tabla 14 Posición del robot al encenderlo .....	100
Tabla 15 Pruebas de funcionamiento a las ventosas individuales .....	110
Tabla 16 Resultados de pruebas de sujeción del robot .....	111
Tabla 17 Resultados de pruebas de movimiento del robot .....	112
Tabla 18 Costos de componentes mecánicos .....	113
Tabla 19 Costos de componentes electrónicos .....	114
Tabla 20 Costos de componentes neumáticos .....	115
Tabla 21 Costos de sensores .....	115
Tabla 22 Costos Totales .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robot Caminante SIL-6 .....	14
Figura 2. Robot escalador REST-2 .....	15
Figura 3. Tipos de articulaciones sus respectivos grados de libertad para robots .....	16
Figura 4. Corte transversal de cilindro FESTO de doble efecto .....	19
Figura 5. Electroválvula FESTO 3/2 de accionamiento eléctrico .....	20
Figura 6. Ventosa de vacío .....	20
Figura 7. Sección transversal de un generador de vacío .....	21
Figura 8. Placa ARDUINO UNO .....	22
Figura 9. Placa de relés .....	23
Figura 10. Ejemplo de Duración de pulso y movimiento de un servomotor .	24
Figura 11. Sensor magnético .....	25
Figura 12. Sensor de presión diferencial .....	26
Figura 13. Dimensiones finales del robot .....	29
Figura 14. Robot de la universidad de San Sebastián .....	30
Figura 15. Robot escalador de la universidad de Vrije-Bruselas .....	31
Figura 16. Esquema estructural del robot .....	35
Figura 17. Diagrama de fuerzas de viga en voladizo .....	37
Figura 18. Dimensiones de las patas del robot .....	38
Figura 19. Esfuerzo de von mises de una pata externa .....	39
Figura 20. Esfuerzo de von mises sobre la pata interna .....	40
Figura 21. Mecanismo de cuatro barras .....	41
Figura 22. Mecanismo aplicado en una pata del robot .....	42
Figura 23. Dimensiones de los eslabones de acrílico .....	43
Figura 24. Esfuerzo de von mises realizado patas externas .....	44
Figura 25. Esfuerzo de von mises en el eslabón de una pata interior .....	44
Figura 26. Diseño CAD de la estructura del robot .....	45
Figura 27. Ventosa horizontal- fuerza vertical .....	47
Figura 28. Ventosa horizontal- fuerza horizontal .....	48
Figura 29. Ventosa vertical - fuerza vertical .....	49
Figura 30. Gráfico de diámetro en función de consumo de aire y presión ...	55
Figura 31. Grafica de vacío generado a partir de presión de trabajo .....	58

Figura 32. Consumo de aire en función de presión de funcionamiento .....	59
Figura 33. Circuito Neumático.....	61
Figura 34. Distancia desde motor hasta pata del robot.....	63
Figura 35. Distancia desde motor de giro hasta pata interna.....	65
Figura 36. Dimensiones en mm de servomotores seleccionados .....	67
Figura 37. Placa Arduino MEGA .....	68
Figura 38. Diagrama del circuito electrónico .....	70
Figura 39. Diseño de la Placa auxiliar .....	71
Figura 40. Diagrama eléctrico del circuito de mando .....	72
Figura 41. Diseño de la placa de mando .....	72
Figura 42. Diagrama de circuito anti rebote para pulsadores .....	73
Figura 43. Modelo CAD final del robot .....	76
Figura 44. Unión de perfil de cuadro y platina.....	78
Figura 45. Ensamble de cilindros a la estructura .....	78
Figura 46. Ensamble de piezas laterales del cuerpo de la estructura.....	78
Figura 47. Colocación perfiles restantes del cuadro base de la estructura..	79
Figura 48. Ensamble de refuerzos angulares .....	79
Figura 49. Ensamble de placas principales en la estructura del robot .....	80
Figura 50. Unión de soporte de servomotor de giro con la estructura .....	80
Figura 51. Ensamble de guías para el movimiento del carro .....	81
Figura 52. Ensamble de ángulo principal de giro con servomotor .....	81
Figura 53. Ensamble placa principal de giro en la estructura del robot.....	82
Figura 54. Colocación de soportes para guías superiores.....	82
Figura 55. Ensamble de guías superiores .....	83
Figura 56. Ensamble de soporte para placas y perfil .....	83
Figura 57. Ensamble de eslabones de acrílico al cuerpo del robot.....	84
Figura 58. Colocación de las seis patas del robot.....	84
Figura 59. Colocación de ventosas en ángulos para ventosas .....	86
Figura 60. Montaje de generadores de vacío .....	86
Figura 61. Colocación de electroválvulas 5/2 .....	87
Figura 62. Colocación de electroválvulas 3/2 .....	87
Figura 63. Colocación de distribuidores neumáticos.....	88
Figura 64. Colocación de la placa Arduino Mega.....	89
Figura 65. Colocación de servomotores .....	90

Figura 66. Disposición de servomotores .....	91
Figura 67. Conexiones de la placa auxiliar .....	91
Figura 68. Conexiones de la placa de mando .....	92
Figura 69. Ubicación de sensores magnéticos .....	93
Figura 70. Colocación de sensor ultrasónico .....	93
Figura 71. Conexión de sensor de presión .....	94
Figura 72. Robot con todas las partes .....	94
Figura 73. Conexiones previas al funcionamiento del robot .....	99
Figura 74. Representación paso adelante .....	102
Figura 75. Diagrama de estado paso adelante .....	102
Figura 76. Diagrama de estado paso hacia atrás .....	103
Figura 77. Diagrama de estado giro a la derecha .....	104
Figura 78. Diagrama de estado giro hacia la izquierda.....	105
Figura 79. Diagrama interno del sensor magnético .....	108
Figura 80. Ángulos utilizados para las pruebas de sujeción .....	111



## **RESUMEN**

El presente proyecto describe el diseño y la construcción de un robot electroneumático móvil escalador, basado en un trabajo previo realizado como tesis de la Escuela Politécnica del Ejército en el 2008, el cual puede moverse con libertad en superficies verticales o con una pendiente pronunciada, gracias a ventosas que se adhieren por la generación de vacío, siempre que la superficie sea lisa no porosa, con la finalidad de explorar espacios de acceso difícil o peligroso. El robot realiza sus movimientos, mediante una combinación de actuadores neumáticos y eléctricos controlados por un microprocesador en una placa Arduino y un operador envía comandos al mismo desde una cierta distancia.

**PALABRAS CLAVES: ROBOT, MÓVIL, ESCALADOR, EXPLORAR, VENTOSAS**

## **ABSTRAC**

This project describes the design and the construction of a mobile electro climber robot, based on earlier work as a thesis at the Polytechnic Army School in 2008. This robot can move freely in vertical surfaces, the robot uses suction cups adhering to the surface by vacuum generation, provided that the surface is smooth non-porous, in order to explore spaces of difficult access or dangerous. The robot performs its movements through a combination of pneumatic and electric actuators controlled by a microprocessor in an Arduino and an operator sends commands to it from a sure distance.

## **CAPÍTULO I**

### **1 INTRODUCCIÓN**

#### **1.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto de grado consiste en el diseño y construcción de un robot escalador capaz de trasladarse por cualquier tipo de superficie lisa vertical no porosa, sin importar el material de construcción ni la inclinación de la misma, con el fin de transportar herramientas que le permitan realizar tareas como la supervisión, inspección, mantenimiento, limpieza de lugares de acceso difícil o peligroso para seres humanos.

El robot a diseñar debe ser capaz de mover objetos y moverse a sí mismo, es decir, debe ser "autoportante". La forma en la que el robot logra aferrarse a las superficies y sostener su propio peso es gracias a ventosas y con la ayuda de generadores de vacío lo que le permite moverse en cualquier dirección en una superficie, subir, bajar, moverse a la derecha o izquierda, esto lo realiza gracias a un operador humano ubicado en un lugar seguro a unos metros del robot.

El robot controla su posición, el avance y en el giro, utilizando sensores en diferentes puntos del mecanismo de recorrido, para así limitar su avance en etapas cuando sea necesario. El robot a diseñar será capaz de identificar si una o más ventosas no realizaron correctamente el vacío para así que este no pueda caerse y provocar algún tipo de accidente

Cabe recalcar que la intención es la de crear un prototipo, es decir con el pleno conocimiento de las limitaciones que podría presentar, como ser probado en un ambiente controlado o en un laboratorio ya que también su estructura no estaría diseñada para soportar caídas fuertes o las condiciones de un lugar peligroso. Aunque este robot en el futuro pueda ser usado para

labores de inspección, mantenimiento y vigilancia, a corto plazo probablemente tenga mayor potencial como herramienta de enseñanza.

## **1.2 ANTECEDENTES**

A medida que aumenta la cantidad y edad de las construcciones y de las obras civiles, así como puentes, diques, tanques de almacenamiento, instalaciones nucleares, superficies exteriores de edificios altos, o bien tareas de reconocimiento por lugares muy estrechos dentro de edificios, barcos y tuberías, también se incrementa el número de trabajos de inspección y mantenimiento que hay que hacer sobre ellos. Todas las actividades relacionadas con estos trabajos representan un elevado nivel de peligro y la mayoría solo pueden ser llevadas a cabo por personal muy cualificado.

Durante los últimos años ha crecido el interés por crear robots que sean capaces de cumplir con estas tareas, y son muchos los grupos de investigación dedicados a este campo, varios investigadores han conducido sus esfuerzos a diseñar robots con un mayor rango de movilidad en diferentes entornos, de ahí nace la necesidad de crear un robot que posea la capacidad de desplazarse por las paredes para poder realizar inspección, mantenimiento o vigilancia y de zonas de difícil acceso y riesgosas para el ser humano.

Los robots industriales tradicionales no son creados para trabajar en superficies verticales de difícil acceso, más bien están pensados para trabajar en entornos estructurados, ya que los robots para las tareas de inspección deben ser capaces de moverse por cualquier tipo de estructura con facilidad el uso de robots tradicionales no es conveniente para este tipo de actividades.

A la hora de controlar la posición de un robot escalador, la fuerza de gravedad es un factor importante a considerar ya que su efecto es mucho mayor que el que se pueda producir en un robot tradicional. Normalmente los elementos que componen un robot escalador se eligen con

características de dimensiones y peso más ajustadas que en el caso de un robot industrial común. Un robot escalador o móvil, debe ser capaz de soportar y mover su peso, mientras que los robots con una base fija no.

La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE siendo pionera en el campo de la robótica en el país busca la creación de prototipos como un impulso importante en el diseño y creación de autómatas<sup>1</sup> en el medio.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Existe un gran interés por la incorporación de este tipo de robots escaladores por parte de industrias como la construcción, naval, aeroespacial, etc. En estas industrias se realizan una gran cantidad de tareas no convencionales, en entornos bastante complejos. Estos entornos constan normalmente de estructuras metálicas o de hormigón de grandes dimensiones con formas geométricas muy diferentes. Las operaciones que se acometen en todas estas obras suelen tener un bajo nivel de estandarización en sus tareas, por lo que no es posible usar los robots industriales habituales. Es por ello que en los últimos años se han incrementado diferentes diseños, para resolver distintas aplicaciones.

En la actualidad las tareas de inspección, mantenimiento, vigilancia y limpieza de arquitecturas verticales se realizan de forma manual, para lo cual se requiere la instalación de costosos andamios, que son adaptables a la mayoría de las estructuras, pero su transporte y montaje suele ser siempre una tarea engorrosa y complicada, además expone la vida de los trabajadores, y da como resultado un proceso largo, costoso y extremadamente peligroso.

Una técnica más moderna es la utilización de góndolas, tal y como se usan en los edificios muy altos para la limpieza de cristales. En esos casos se busca la ayuda de técnicos en montañismo para poder alcanzar zonas

---

<sup>1</sup> **Autómata**.- Máquina que imita l figura y movimiento de un ser animado.

que no son accesibles por ningún otro método. Este último representa un costo aún más alto y requiere de personal altamente calificado.

Por otro lado, las herramientas que se usan para realizar las tareas de inspección y mantenimiento son cada vez más pequeñas, y capaces de almacenar gran cantidad de datos y tratarlos adecuadamente para que sean fácilmente procesados en un computador, incluso en tiempo real. Las tareas son muy repetitivas y cíclicas, en las que al final puede bajar la calidad del trabajo conforme aparezca la fatiga en un operario que lleve muchas horas trabajando en condiciones nada favorables. Gran parte de estas operaciones son susceptibles de automatizar y ejecutar con un robot.

Ante esta dificultad surge un grupo de robots escaladores que en su mayoría son teleoperados<sup>2</sup>, permitiendo realizar diferentes tareas de manera más segura y eficiente. El diseño de estos diferentes tipos de robots escaladores se fundamenta en la capacidad de adaptación a la superficie en la cual realizan su desplazamiento, lo que les permite tener un control sobre su posición, orientación y velocidad, siendo capaces de transportar herramientas o sensores que permitan el óptimo desarrollo de sus actividades. Poseen además un control de las fuerzas en los puntos de apoyo lo que evitan deslizamientos y una mejor distribución de su peso.

## **1.4 ÁREA DE INFLUENCIA**

El uso de robots en reemplazo de seres humanos para la realización de actividades que puedan poner en peligro la vida o la integridad física de personas es cada vez mayor, por eso este proyecto se basa en reemplazar a obreros en las distintas actividades tanto de limpieza, mantenimiento, observación o inspección de tanques, cascos de barcos, estructuras metálicas, ventanas o superficies verticales lisas de difícil acceso.

---

<sup>2</sup> Robots Teleoperados.- Definidos por la NASA como dispositivos robóticos con sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador

Aun cuando las máquinas caminantes están concebidas para operar sobre terrenos irregulares existen muchos casos en los cuales se requiere que el robot se desplace por superficies con una pendiente muy pronunciada, o casos en los cuales el robot debe subir por paredes verticales e incluso moverse suspendido del techo. Estas exigencias se encuentran fácilmente en aplicaciones de mantenimiento de edificios, inspección de estructuras, tanques, etc. La federación internacional de robótica (IRF) desde hace pocos años, apoya al desarrollo y utilización de diferentes tipos de robots, en actividades de servicio, lo cual ha generado que la robótica sea cada vez más utilizada en este campo. (Robótica, 2011)

Una propiedad que describe plenamente a un robot escalador y que lo hace diferente de cualquier otro tipo de robot móvil, es la capacidad de moverse sobre superficies inclinadas y verticales adhiriéndose a ellas.

## **1.5 OBJETIVOS**

### 1.5.1 Objetivo General

Diseño y construcción de un prototipo de robot electroneumático controlado a distancia, capaz de desplazarse por superficies verticales lisas no porosas, enfocado a disminuir riesgos en seres humanos que trabajan bajo estas condiciones.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar un diseño mecánico funcional de robot apto para que este pueda maniobrar en superficies verticales.
- Diseñar un circuito electroneumático capaz de mover los componentes mecánicos del robot permitiendo que este se desplace.
- Diseñar el sistema de control de desplazamiento del robot.

## 1.6 ALCANCE

### 1.6.1 ALCANCE MECÁNICO

El alcance mecánico el robot presentará los siguientes aspectos. El desplazamiento será realizado con la ayuda de actuadores neumáticos de un tamaño aproximado de 50 mm, la activación de los mismos se realizará con válvulas electroneumáticas.

Un total de ocho ventosas colocadas en las patas del robot, alternarán su funcionamiento para el desplazamiento del robot y garantizarán su sujeción a la superficie, las ventosas funcionarán con las válvulas generadoras de vacío.

El desplazamiento consiste en una serie de pasos, primero que un juego de cuatro ventosas se levanten, luego que el actuador electroneumático se desplace mientras el otro juego de cuatro ventosas permanecen fijas en la superficie, cuando esto concluya las ventosas que habían subido bajarán, y las que se encontraban fijas subirán y se repetirá el proceso.

Para la alimentación del suministro de aire se utilizará un compresor de aire externo al robot el cual se mantendrá conectado al mismo por medio de mangueras, de misma manera se energizará las electroválvulas para su funcionamiento.

El material con el que se construirá la estructura principal del robot será el aluminio debido a su gran resistencia y su bajo peso, ya que el peso total del robot no deberá superar las 12lb o 5.45 kg. Las dimensiones aproximadas 60cm x 40cm, con la mínima altura posible para evitar el incremento de esfuerzos en las ventosas.



### 1.6.2 ALCANCE ELECTRÓNICO

En cuanto al alcance electrónico el robot tendrá las siguientes especificaciones.

El robot será controlado por una placa Arduino la misma que será programada para que sea posible que las válvulas se activen en el orden adecuado, para que la secuencia de pasos que requiere el robot para poder desplazarse sea realizada correctamente.

## CAPITULO II

### 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS

##### 2.1.1 Robótica

En pocos años la robótica ha pasado de ser un mito, propio de la imaginación de novelistas y guionistas a una realidad imprescindible en nuestras vidas cotidianas. La palabra robótica surge justamente del escritor Isaac Asimov (1920-1992) ya que en una de sus historias usa por primera vez esta palabra y enuncia por primera vez sus tres leyes de la robótica, desde la divulgación de su obra literaria contribuye decisivamente a la divulgación y difusión de la robótica. (Asimov, 1985)

La robótica se define como una rama de la tecnología integrada por un conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten el diseño, construcción, operación y aplicación de los robots; la robótica además combina diversas disciplinas básicas y tecnológicas como la física, mecánica, electrónica, informática, ingeniería de control, inteligencia artificial, entre otras.

##### 2.1.2 Robot

El vocablo robot tiene sus orígenes en el idioma checo, y ha sido adoptado como tal en varias lenguas incluyendo el español. Un robot se define como un dispositivo generalmente mecánico que realiza tareas automáticamente, ya sea por supervisión humana, por un programa predefinido o mediante técnicas de inteligencia artificial. La idea principal de un robot es reemplazar al ser humano en tareas desagradables, repetitivas, difíciles y sobretodo peligrosas de una forma más segura, rápida y precisa. (Fernandez, 2000)

Una de las definiciones más conocidas y acertadas es la que presenta la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) (Barrientos, 97): "*Robot*

*es un manipulador automático servo controlado, reprogramable, polivalente capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material".*

Los sistemas robotizados pueden clasificarse de varias maneras dependiendo de ciertos parámetros conforme a su funcionamiento. Una de estas clasificaciones los agrupa en móviles y no móviles, siendo los móviles aquellos que poseen ruedas, patas, rieles o elementos que permitan el fácil desplazamiento del robot, ya sea por una trayectoria predeterminada o libremente. Por otra parte los robots no móviles son aquellos que por lo general son manipuladores que forman parte de un proceso de producción y no pueden moverse por que tienen una base fija.

### 2.1.3 Robots Móviles

Los robots móviles o también llamados “caminantes” (Robots con patas), basan su funcionamiento y forma de locomoción en la mayoría de animales terrestres, en los que se puede observar sistemas de locomoción que presentan millones de años de evolución y son principalmente basados en un conjunto tanto de eslabones como de articulaciones, denominadas extremidades o simplemente patas, siendo este considerado un sistema óptimo para el desplazamiento por varios tipo de terrenos.

El movimiento de estos eslabones o extremidades sobre el terreno se denomina pasos, lo cual permite el avance del cuerpo en una cierta dirección. Las maquinas móviles o caminantes que usan este tipo de locomoción se apoyan en uno o más puntos de apoyo, lo que las clasifica en monópodos, bípedos, trípodos, cuadrúpedos, hexápodos, etcétera, convirtiéndose en máquinas ideales para llegar a espacios peligrosos y de difícil acceso.

Los robots móviles surgen gracias a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en uno de sus extremos, se trata también de incrementar la autonomía limitando todo lo posible la intervención humana (Ollero, 2001).

Dentro de la división de robots móviles se puede subdividir en autónomos y no-autónomos. Los primeros portan todo el software y hardware de control sobre la estructura mecánica. Esto les da un rango de alcance limitado únicamente por la duración de las fuentes de alimentación que sean utilizadas, esto hace que el sistema sea más caro y complejo. (Antonio Fernández, 2004)

Todd (Todd, 1985), indica cinco condiciones que debería tener un robot móvil caminante:

- 1.- Un robot debe ser una máquina y no un ser vivo. (Aunque esta regla no excluye el uso de materiales o estructuras bioquímicas artificiales, tales como músculos)*
- 2.- Debe ser capaz de mover objetos o moverse a sí mismo, es decir, deben ser "autoportantes" (con lo que se excluye la simulación o las plantas que poseen un sistema de control)*
- 3.- Debe tener fuerza y ser capaz de hacer movimientos programados. (Con esto, se excluyen los brazos tele operados que solo son capaces de repetir los movimientos que realiza un maestro dirigido por un operador)*
- 4.- El solo, debe ser capaz de realizar una acción continua sin necesidad de la ayuda de agentes externos. (Así se excluyen los vehículos normales).*
- 5.- Debe ser capaz de modificar su comportamiento en función de la información externa que reciba del entorno, con lo que debe estar equipado con sensores de alguna clase.*

En la figura 1 se muestra al robot caminante SILO-6 desarrollado por el instituto de Automática Industrial – CSIC en Madrid, para la detección de minas antipersonales. (Gonzalez de Santos, 2007)



**Figura 1. Robot Caminante SIL-6**

**Fuente: (Instituto de Automática Industrial, 2007)**

#### 2.1.4 Robots Escaladores

A diferencia de las condiciones que un robot móvil caminante debe cumplir según Todd, un robot escalador debe cumplir esas y otras condiciones:

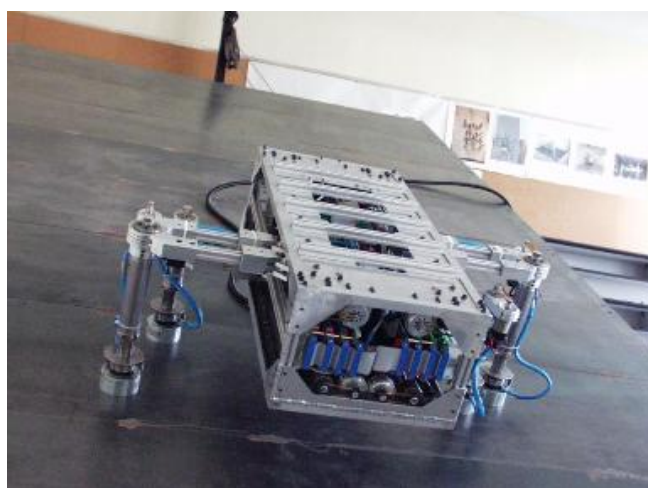
- 1.- Ser capaz de subir por superficies verticales con un grado de inclinación evidente.
- 2.- Sostener su propio peso para que no se caiga ni exista deslizamiento.
- 3.- Moverse en cualquier dirección de cada superficie; subir, bajar, o moverse a derechas o izquierdas.

Un robot escalador tiene que cumplir con las mismas condiciones que un robot móvil o caminante, con la condición de sujetarse con un alto grado de seguridad a la superficie vertical como: una pared, una tubería, una columna, el casco de un barco o de un avión, etc.

Una definición de robots escaladores realizada por Antonio Giménez en su tesis doctoral de la Universidad Carlos III de Madrid nos dice que *“Un robot escalador es una maquina móvil que puede realizar tareas de servicio,*

*de forma programada o autónoma, capaz de soportar su peso y propulsarse a sí mismo en su entorno de trabajo, que no tiene por qué ser horizontal. La máquina debe ser capaz de conseguir un alto nivel de sujeción, para que no se caiga ni deslice, en el caso de que se mueva sobre una superficie muy inclinada”*

En la figura 2 se muestra el robot escalador REST-2 (Robot escalador para soldadura a tope), el cual es un sistema escalador cuadrúpedo con una configuración de pata muy especial que consta de dos eslabones con un extremo común en el que se sitúa una articulación prismática. Cada extremo libre de un eslabón se desplaza mediante un husillo a lo largo del cuerpo del robot. Si los dos husillos se desplazan a la misma velocidad y sentido la pata se mueve adelante o atrás, como mecanismo de locomoción con el fin de poder sobrepasar las cornisas que aparecen en la cara lisa de los barcos. (Armada, 2005)



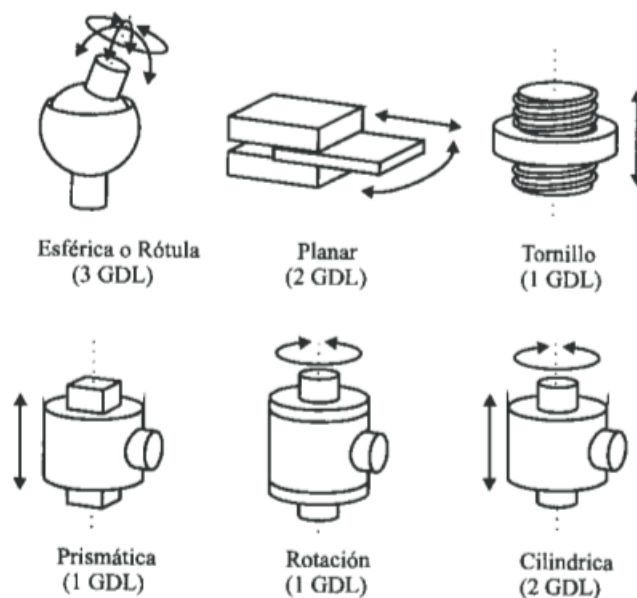
**Figura 2. Robot escalador REST-2**

**Fuente: (Armada, 2005)**

#### 2.1.5 Grados de Libertad

Se conocen como grados de libertad a cada uno de los movimientos independientes que puede realizar una articulación con respecto a la anterior. El número de grados de libertad total de un robot está dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. El

movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o una combinación de ambas. De este modo son posibles los seis tipos diferentes de articulaciones que se muestran en la figura 3 con sus respectivos grados de libertad, aunque en la práctica, en los robots son más empleadas la de rotación y la prismática.



**Figura 3. Tipos de articulaciones sus respectivos grados de libertad para robots**

**Fuente: (Fernandez, 2000)**

#### 2.1.6 Vacío

El vacío es el estado de un gas en el cual su densidad parcial de sus partículas es inferior a la de la atmósfera de la superficie terrestre. Por norma, en neumática se indica la presión como sobrepresión (en relación a la presión ambiente). Ello también quiere decir que el vacío siempre se indica con un valor negativo (medido con respecto a la presión ambiente). Por lo general, como unidad se emplea el bar o el milibar (mbar) (1 bar = 1000 mbar). Esta unidad deriva de la unidad de presión legal, el Pascal (Pa). (FESTO, 2010)

### 2.1.7 Rugosidad

Se entiende como rugosidad o aspereza de superficie a la huella que se reproduce en la misma como consecuencia de los procesos de mecanizado a los que ha sido sometida, por lo tanto la rugosidad está relacionada con el procedimiento de trabajo empleado de tal forma que éste de elije en función de la calidad superficial que se desea obtener. (Piñeiro, 2000)

En la siguiente tabla se puede apreciar la relación entre los valores de profundidad de aspereza la cual se define como la altura máxima de las irregularidades y las clases de rugosidad obtenidas después de un proceso de trabajo sobre un material cualquiera, siendo la clase de rugosidad N1 la que cuanta con una medida de asperezas mínima por debajo de 0.025 micrómetros.

**Tabla 1**

**Relación entre profundidad de aspereza y las clases de rugosidad**

<b>Profundidad de Aspereza (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Clase de Rugosidad</b>
50	N 12
25	N 11
12.5	N 10
6.3	N 9
3.2	N 8
1.6	N 7
0.8	N 6
0.4	N 5
0.2	N 4
0.1	N 3
0.05	N 2
0.025	N 1

**Fuente: (Piñeiro 2000)**



## 2.2 COMPONENTES MECÁNICOS

Los componentes mecánicos son parte fundamental en la construcción de un robot, estos son ideales para edificar la parte física, a esta parte física le podemos llamar chasis. Un chasis se compone de ruedas, soportes, orugas, articulaciones entre muchos más. Los diferentes componentes mecánicos van a variar según el tipo de robot a construir, el tipo de accionamiento y otras características que se consideren para el robot.

### 2.2.1 Cilindros Neumáticos

Los cilindros neumáticos son unidades que transforman la energía potencial del aire comprimido en energía cinética o en fuerzas prensoras. Básicamente consisten en un recipiente cilíndrico provisto de un embolo o pistón. Al introducir un determinado caudal de aire comprimido, éste se expande dentro de la cámara y provoca un desplazamiento lineal. Si se acopla al embolo un vástago rígido, este mecanismo es capaz de empujar algún elemento, o simplemente sujetarlo. La fuerza de empuje es proporcional a la presión del aire y a la superficie del pistón: (Micro, 2011)

$$F = P \cdot A$$

Donde

F= Fuerza

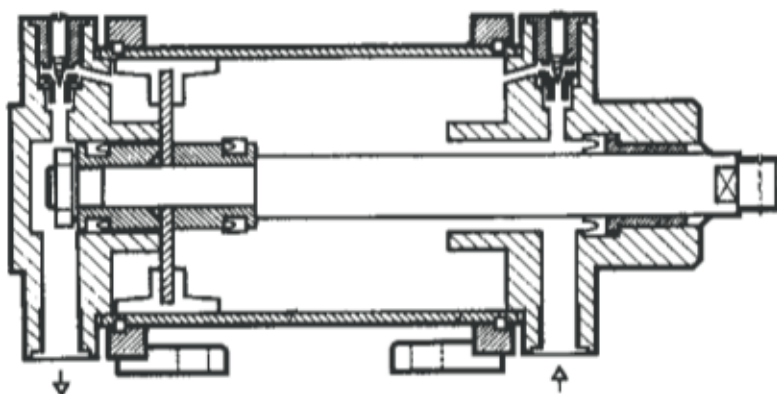
P= Presión

A= Área

Para estos actuadores neumáticos existen variantes en la construcción y las principales son los denominados de simple efecto en los cuales uno de sus movimientos está gobernado por el aire comprimido, mientras que el otro se da por una acción antagonista, generalmente un resorte colocado en el interior del cilindro. Este resorte podrá situarse opcionalmente entre el pistón y tapa delantera (con resorte delantero) o entre el pistón y su tapa trasera

(con resorte trasero). Realiza trabajo aprovechable solo en uno de los dos sentidos, y la fuerza obtenible es algo menor a la que da la expresión  $F = P \times A$ , pues hay que descontar la fuerza de oposición que ejerce el resorte.

Otra variante es la de los denominados de doble efecto donde el pistón es accionado por el aire comprimido en ambas carreras. Realiza trabajo aprovechable en los dos sentidos de marcha.



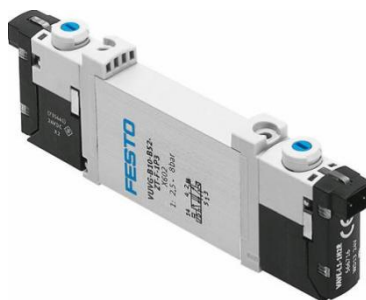
**Figura 4. Corte transversal de cilindro FESTO de doble efecto**

**Fuente: (Micro, 2011)**

### 2.2.2 Electroválvulas

Una electroválvula es una válvula electromecánica, diseñada para controlar el flujo de un fluido a través de un conducto como puede ser una tubería. La válvula está controlada por una corriente eléctrica a través de una bobina solenoide.

Las válvulas se componen de dos o más posiciones, esto es, dos o más formas de conectar las vías. De lo contrario, no tendrían mucho sentido, ya que funcionarían como simples tuberías. Para cambiar de una posición a otra se dispone de unos mandos en la propia válvula. Por lo general, existe una posición de reposo, que es aquella en la que no se actúa sobre los mandos.

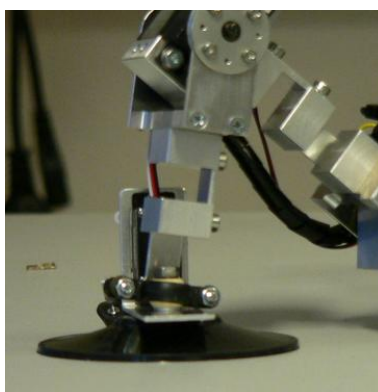


**Figura 5. Electroválvula FESTO 3/2 de accionamiento eléctrico**

**Fuente: (Festo, 2015)**

### 2.2.3 Ventosas de Vacío

Las ventosas son elementos que basan su funcionamiento en la diferencia de que existe entre el volumen interior y el medio ambiente de presión. La acción denominada de vacío es en realidad debido a la diferencia de la presión atmosférica que empuja la copa de succión contra la superficie y la presión absoluta restante en el interior del volumen de la propia ventosa. El acoplamiento entre dos cuerpos con una cierta fuerza normal da a continuación a luz a una fricción entre los mismos que es función de la fuerza y del coeficiente de fricción entre los dos cuerpos materiales; las fuerzas de fricción tienen sentido entonces tangencial y contribuyen a definir la capacidad de carga real de la ventosa.



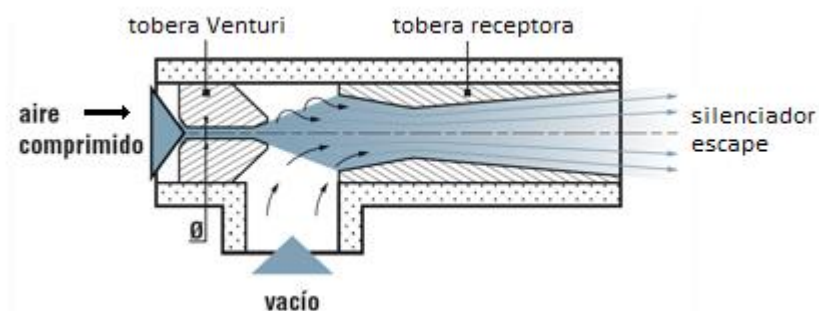
**Figura 6. Ventosa de vacío**

**Fuente: (Festo, 2015)**

#### 2.2.4 Generador de Vacío

Está diseñada para remover el aire de la cavidad existente entre la ventosa y la superficie. Mientras la presión dentro de la cavidad disminuye la presión atmosférica externa actúa sobre la ventosa presionándola y logrando que se adhiera a la superficie. (Panich, 2010)

Los generadores de vacío tienen un diseño simple y funcionan de acuerdo al efecto Venturi el cual indica que un fluido en este caso aire, al estar en movimiento disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una sección de menor área, cuando el aumento de velocidad es muy grande incluso se llega a generar presiones negativas.



**Figura 7. Sección transversal de un generador de vacío**

**Fuente: (Panich, 2010)**

El aire comprimido fluye desde la conexión de presión hacia el eyector. Mediante la reducción de la sección en la tobera Venturi aumenta la velocidad de circulación del aire hasta la velocidad del sonido. Tras la salida por la tobera Venturi, el aire se expande y fluye a través de la tobera receptora hacia la salida (silenciador). Ello produce un vacío en la cámara situada entre la tobera Venturi y la tobera receptora, lo que provoca que el aire sea aspirado desde la conexión de vacío. El aire aspirado y el aire de escape salen juntos a través de la salida (silenciador). (FESTO, 2010)

## 2.3 COMPONENTES ELECTRÓNICOS

### 2.3.1 Placa Arduino

Arduino es una plataforma de hardware y software libres, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing<sup>3</sup>. Es un dispositivo que conecta el mundo físico con el mundo virtual, o el mundo analógico con el digital.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, y controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un computador.



**Figura 8. Placa ARDUINO UNO**

**Fuente: (Arduino, 2015)**

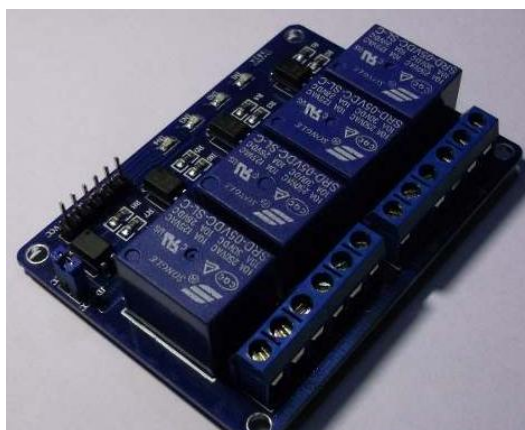
---

<sup>3</sup> **Processing.**- Es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java, de fácil utilización, y que sirve como medio para la enseñanza y producción de proyectos multimedia e interactivos de diseño digital.

### 2.3.2 Relé

Un relé estático, llamado también relé de estado sólido, es un dispositivo de conmutación electrónico que realiza la conexión y desconexión de una carga con ausencia de contactos móviles en su interior (Pulido, 2000)

Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.



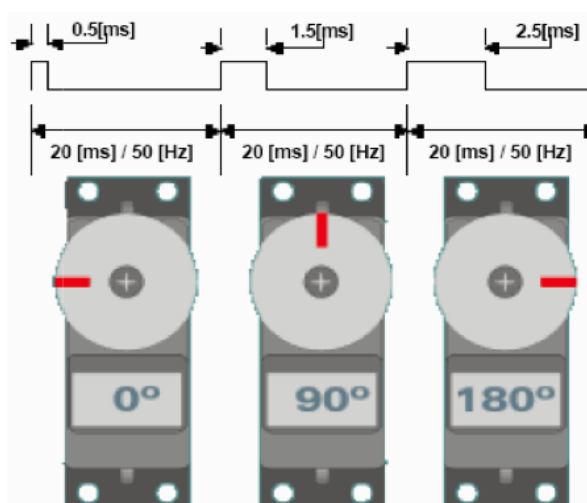
**Figura 9. Placa de relés**

### 2.3.3 Servomotor

Un servo es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. Los servomotores están constituidos por el motor, una caja reductora y el circuito de control. Es básicamente un actuador mecánico basado en un motor y un reductor.

La cantidad de voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si este necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor correrá a una velocidad más lenta. A esto se le llama control proporcional.

Los servomotores hacen uso de la modulación por ancho de pulsos (PWM) para controlar la dirección o posición de los motores de corriente continua. La mayoría trabaja en la frecuencia de los cincuenta hertz, así las señales PWM tendrán un periodo de veinte milisegundos. La electrónica dentro del servomotor responderá al ancho de la señal modulada. Si los circuitos dentro del servomotor reciben una señal de entre 0,5 a 1,4 milisegundos, éste se moverá en sentido horario; entre 1,6 a 2 milisegundos moverá el servomotor en sentido anti horario; 1,5 milisegundos representa un estado neutro para los servomotores estándares. (Viloria, 2014)



**Figura 10. Ejemplo de Duración de pulso y movimiento de un servomotor**

**Fuente: (Viloria, 2014)**

## 2.4 SENSORES

La real academia de la lengua define a un sensor como un dispositivo formado por células sensibles que detecta variaciones en una magnitud física y las convierte en señales útiles para un sistema de medida o control.

Para conseguir que un robot realice una tarea específica con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será necesario que el mismo tenga conocimiento tanto de su propio estado como del estado en el cual desempeña su trabajo. La información relacionada con su propio estado la consigue con los denominados sensores internos, mientras que la del medio que lo rodea con sensores llamados externos.

#### 2.4.1 Sensor Magnético

Los sensores magnéticos son sensores de proximidad que se caracterizan por la posibilidad de accionarse a distancias relativamente grandes. Estos sensores detectan los objetos magnéticos (imanes generalmente permanentes) que son utilizados para accionar el proceso de la conmutación. Los campos magnéticos pueden atravesar con facilidad muchos materiales no magnéticos, el proceso de la conmutación se puede también accionar sin la necesidad de la exposición directa al objeto. Usando los conductores magnéticos como el hierro, el campo magnético se puede transmitir sobre mayores distancias para, por ejemplo, se puede llevar la señal de áreas de alta temperatura.



**Figura 11. Sensor magnético**



### 2.4.2 Sensor de Presión

Los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica que será empleada en los equipos de automatización o adquisición estándar. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de bar hasta los miles de bar.



**Figura 12. Sensor de presión diferencial**

### 2.4.3 Sensor Ultrasónico

Gran parte de los sensores de ultrasonido basan su comportamiento en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo campo de acción, es de forma cónica. Los ultrasonidos son antes que nada sonido, exactamente igual que los que oímos normalmente, salvo que tienen una frecuencia mayor que la máxima audible por el oído humano. (Pérez, 2006)

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la fórmula:

$$d = \frac{1}{2} V \cdot t$$

Dónde:

$d$  = Distancia desde el sensor hasta el objeto donde chocan las ondas de ultrasonidos.

$V$  = velocidad del sonido en el aire.

$t$  = tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

## 2.5 TIPOS DE ACCIONAMIENTO

Se entiende por accionamiento o actuador a aquel elemento o dispositivo de una máquina, encargado de suministrar energía mecánica para que ésta funcione. Este elemento, debe ser capaz de transformar algún tipo de energía, ya sea eléctrica, neumática o hidráulica, etc., en energía mecánica, para aplicarla en el eslabón motor de dicha máquina.

Los accionamientos que son usados por los robots son empleados según el tipo de agarre que tengan, por ejemplo, si la sujeción se realizará por medio de ventosas de vacío, el aire comprimido es utilizable con la instalación de cilindros neumáticos, si se decide usar electroimanes, lo más sencillo es la colocación de motores eléctricos. Los accionamientos hidráulicos, que son bastante utilizados en los robots convencionales, no son de gran uso en los escaladores ya que aportarían un gran peso a la estructura final del robot. Cabe mencionar también, que se han construido algunos robots que poseen como fuente de energía un motor de combustión interna, pero no es una técnica de uso extendido.

### 2.5.1 Accionamiento Eléctrico

Los elementos de accionamiento eléctrico se encaran de transformar la energía eléctrica en mecánica, las principales ventajas de este tipo de accionamientos son su precisión, fiabilidad, facilidad de controlar, sencillez de instalación, limpios y silenciosos.

Los robots que utilizan electroimanes para su sujeción necesitan energía eléctrica para actuar sobre ellos. Ya que al robot le llega energía eléctrica, la aprovechan para los actuadores encargados de desplazar el robot a lo largo de la superficie; usan motores eléctricos de corriente continua, o motores de corriente alterna. No hay que despreciar el peso de estos motores a la hora de diseñar el robot. Por esta razón es interesante elegir motores que tengan una buena relación potencia- peso. Los motores eléctricos tienen una gran ventaja ya que son accionadores que se pueden controlar mucho mejor que los accionamientos neumáticos.

### 2.5.2 Accionamiento Neumático

Los robots que tienen como fuente de energía el aire comprimido o cualquier otro tipo de gas, lo utiliza principalmente en ventosas y en los accionamientos que sirven para moverse por la superficie, y normalmente incorporan cilindros neumáticos y electroválvulas. Con este tipo de accionadores el control de posición que se puede hacer del robot no es tan preciso como en el caso de los accionamientos eléctricos, pero en cambio, el peso de los accionamientos neumáticos es mucho menor que el de los eléctricos.

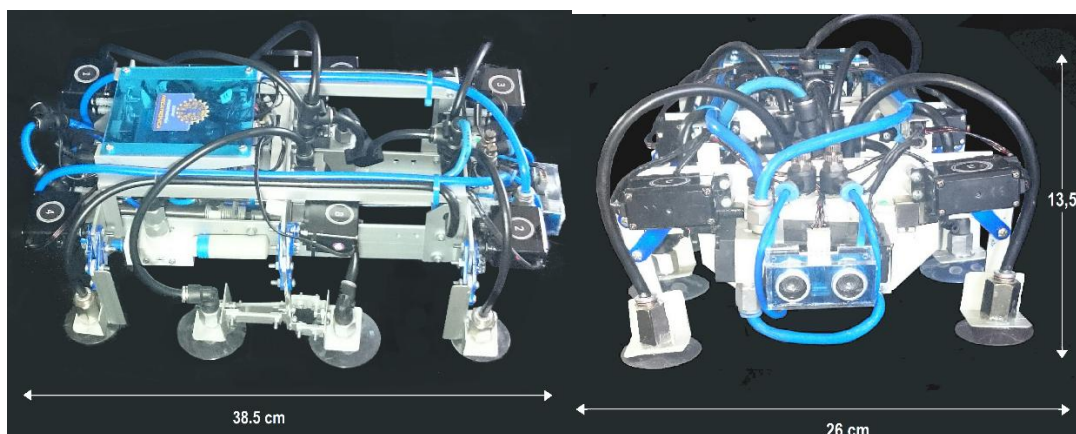
### 2.5.3 Accionamiento Mixto

Hay robots que aprovechan las dos fuentes de energía y tienen accionamientos neumáticos y eléctricos. Robots que se mueven por paredes usando ventosas para sujetarse y motores eléctricos para moverse.

## CAPITULO III

### 3 DISEÑO DEL PROTOTIPO

A la hora de diseñar un robot escalador, es muy importante tener en cuenta sobre la superficie que se va a mover, puesto que: su cinemática dependerá, en gran medida, de la forma que tengan dichas superficies (paredes planas, curvas, techos, vigas o columnas, etc.). En función de los materiales con los que se hayan construido, los elementos de sujeción también serán distintos; no serán los mismos para subir por una estructura metálica que por un edificio de cristales, por ejemplo.



**Figura 13. Dimensiones finales del robot**

El prototipo final cuenta con las siguientes características:

- Electro neumático
- Robots Móviles
- Hexápodo
- Controlado a distancia
- Peso total 2,5kg
- 1 kg de capacidad de carga
- 8 ventosas
- 4 movimientos
- Avance por cada paso 5cm

- Giro de 20° a ambos lados

### 3.1 TRABAJOS PREVIOS

Antes de proceder con el diseño del robot hemos investigado un poco sobre algunos trabajos previos realizados con objetivos similares a los propuestos, los cuales pueden aportar con ideas que posiblemente sean usadas en el diseño final de nuestro prototipo.

- Proyecto de la Escuela Superior de Ingenieros San Sebastián

Título: DISEÑO DE UN ROBOT NEUMÁTICO PARA LIMPIEZA DE CRISTALES INACCESIBLES

Fecha: Septiembre 2005

Descripción: Este robot presenta un marco interior y uno exterior con 4 ventosas cada uno que se mueven de manera alternada para conseguir el desplazamiento del robot en 2 direcciones, adelante atrás y derecha izquierda. Con una masa total de 5 kg y una presión de trabajo de 5 bar.

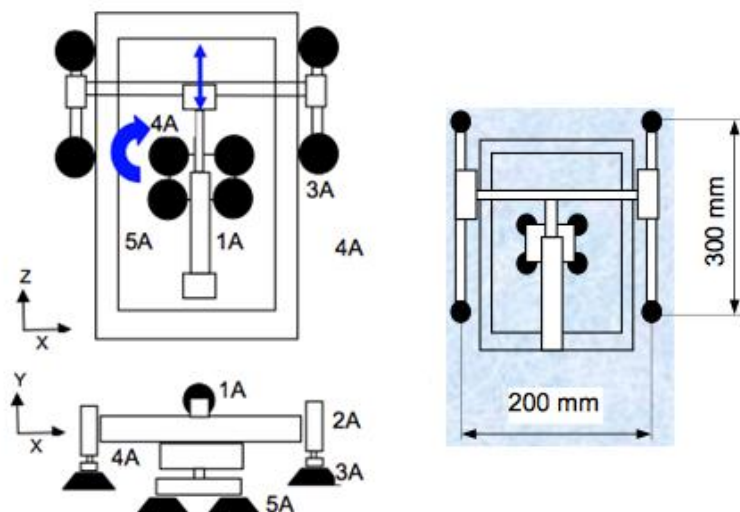


Figura 14. Robot de la universidad de San Sebastián

Fuente: (Escuela Superior de Ingenieros San Sebastián, 2005)

- Proyecto del Robotics & Multibody Research Group de la Universidad de Vrije- Bruselas

Título: Robot escalador con el uso de ventosas de vacío.

Fecha: Noviembre 2000

Descripción: Este robot usa 8 ventosas de succión hechas con cd's lo que le permite escalar superficies verticales e incluso le permiten ir de cabeza. Usa un cilindro sin vástago como eje central el cual se mueve con 4 patas con una ventosa cada una y en el carro del cilindro se encuentra una parte móvil que también cuenta con 4 patas y le permite girar, las 8 patas se elevan coordinadamente para permitir el desplazamiento del robot gracias a pistones neumáticos que las elevan de dos en dos, evitando que se arrastren mientras el robot se mueve.

Posee un alambre que rodea su parte delantera, este sirve como sensor para evitar que el robot choque con obstáculos que se puedan presentar en su trayectoria.



**Figura 15. Robot escalador de la universidad de Vrije-Bruselas**

**Fuente: (Universidad de Vrije, 2000)**

### **3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES**

Uno de los primeros pasos a realizar al diseñar un robot escalador es definir su configuración, esto significa definir tanto su forma, geometría, tamaño, peso, todo esto dependiendo de los principales elementos que lo componen y que son vitales para su funcionamiento como ventosas, motores, válvulas, cilindros y otros elementos necesarios. La efectividad de funcionamiento depende de la correcta selección de los componentes y su funcionamiento combinado.

### **3.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

Para sujetar un robot a la pared hay que hacer una fuerza suficiente que permita que se agarre bien y además, evite su deslizamiento sobre ella. De modo que, para resolver el problema, hay que tener en cuenta dos aspectos muy importantes: agarre y deslizamiento. El robot puede que se pegue bien a la superficie vertical, pero debido a la fuerza que ejerce la gravedad se deslice por la superficie, en algunos casos sin llegar a caerse, y no se quedara exactamente en la posición deseada.

En un robot escalador, el tiempo que tarda en producirse el vacío en el interior de una ventosa no es instantáneo; si se usan electroimanes hay que tener en cuenta la histéresis que tienen, para determinar el tiempo que pasa hasta que se considere que la pata del robot se ha agarrado bien. Igualmente, con una pinza hace falta un tiempo hasta que la pinza se acople y agarre bien a la columna de una estructura.

Debido a las altas prestaciones que un robot necesita en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento es indispensable contar con reductores, para aplicaciones robóticas se prefieren reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. (Mercader, 1993)

Puesto que el robot trabaja en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor a utilizar sea capaz de soportar pares elevados puntuales y una alta rigidez torsional.<sup>4</sup>

Es importante por razones de seguridad sobre todo, un buen control de la fase previa de agarre, de la fuerza durante el agarre, y de la fase de separación de cada elemento de sujeción. Cuando una pata se agarra a la superficie, hay que comprobar que se sujeta con la fuerza mínima que ella debe aportar para conseguir el sostén total del robot. Si esto no ocurre, no se podrá soltar ninguna otra pata del robot, hasta que la primera no se sujete bien.

### 3.3.1 Accionamiento directo.

Este tipo de accionamiento se da cuando el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulación sin la necesidad de un reductor intermedio. Las principales ventajas que se derivan de la utilización de un accionamiento directo son:

- Posicionamiento rápido y preciso, pues se evitan los rozamientos y juegos de las transmisiones y reductores.
- Aumento de las posibilidades de controlar el sistema.
- Simplificación del sistema mecánico al eliminar el reductor.

El principal problema al utilizar accionamiento directo radica en el motor a utilizar

### 3.3.2 Dispositivo de Sujeción

Muy relacionado con el tipo de superficie por el que se mueven los robots está el método de sujeción que utilizan. Así, la forma de sujeción

---

<sup>4</sup> Rigidez Torsional.- Par que se aplica sobre el eje de salida para que, manteniendo bloqueado el de entrada, aquel gire un ángulo unitario.



depende mucho de la forma de la superficie y del material con la que se haya construido. Existen tres tendencias claramente definidas a la hora de elegir la forma de sujeción o agarre.

Si la intención es crear un robot que se mueva por la fachada de un edificio, vidrios o similar, se usaran ventosas de vacío exclusivamente, y esto normalmente, conduce a usar accionamientos neumáticos para mover el robot. (Gradetsky, 92)

El efecto de las ventosas, para conseguir que el robot se agarre adecuadamente, depende en gran medida de la capacidad que tenga el sistema de crear vacío entre la ventosa y la superficie. Las paredes de cristal, acero, mármol, y losa son las mejores; todas tienen una característica en común, son materiales poco porosos, con lo cual, se puede conseguir un grado de vacío que llegue hasta un 95%, valor considerado muy alto. (Bach, 95)

### **3.4 DISEÑO MECÁNICO**

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre eslabones consecutivos. El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o una combinación de ambos.

Debido a las fuerzas a las que está sometido el robot los componentes deberán ser lo más livianos posibles sin comprometer su desempeño, el tamaño también es un factor importante ya que el robot debe ser capaz de llegar a áreas inaccesibles que normalmente son de espacio reducido.

#### **3.4.1 Estructura mecánica**

La estructura mecánica es de gran importancia en el diseño de un robot ya que es la encargada de soportar todo el peso de los componentes tanto mecánicos, neumáticos y electrónicos a más de su propio peso, por

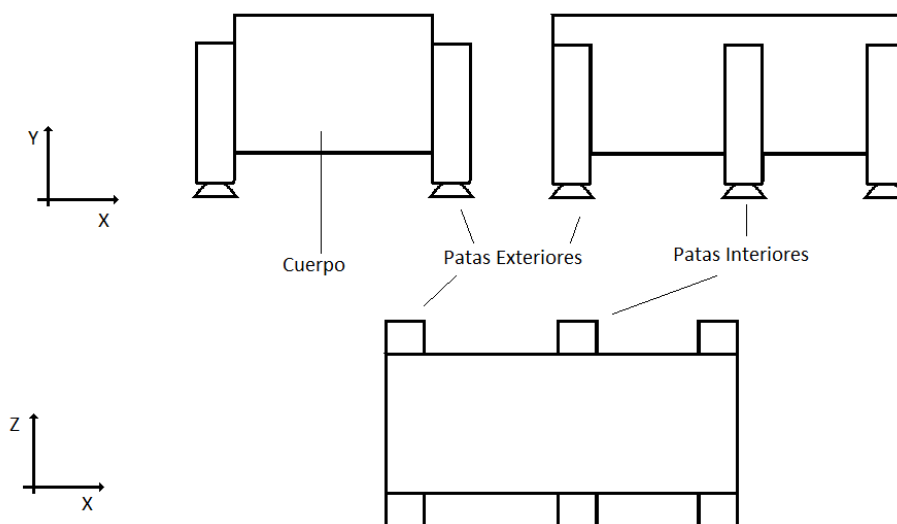
estos motivos debe ser lo más liviana y resistente posible, esto se logra con la selección de materiales con estas características y un diseño resistente que permita cumplir estos objetivos.

El aluminio es una buena opción para la realización de la estructura debido a su bajo costo en relación a otros materiales con características similares, a su peso reducido, su alta resistencia a la corrosión, su facilidad de mecanizado y su alta resistencia mecánica que llega hasta los 690 MPa.

La forma de la estructura tiene un fuerte impacto sobre el robot, en su facilidad de desplazarse, evitar obstáculos y en mantener su estabilidad.

#### 3.4.1.1 Geometría

En cuanto a la geometría del robot existen varias posibilidades pero se ha optado por una simple de tipo ortogonal reduciendo así el costo y la dificultad de fabricación.



**Figura 16. Esquema estructural del robot**

El diseño de la estructura hace posible que se realice el movimiento del robot por pasos, la secuencia de elevación de las patas sea de forma alternada entre las cuatro patas externas y las dos internas, siendo el

momento más crítico cuando todo el robot esta sobre sus patas internas, debido a que cuenta solamente con dos puntos de apoyo.

#### *3.4.1.2 Peso*

Dentro a lo referente al peso, se ha propuesto anteriormente que este no debe superar las 12lb o 5.45 kg, esto ya que el excesivo peso constituye un parámetro limitante. Estas limitaciones están dadas debido a las condiciones de trabajo del robot porque el exceso del mismo es perjudicial para la adhesión y sujeción del robot a las superficies, puesto que aumenta el deslizamiento y las fuerzas que tiene que soportar.

Para establecer el peso aproximado del prototipo final, se toma como referencia la geometría considerando al aluminio como el material de la misma, a más de esta estructura se debe considerar el peso de todos los elementos que deberán estar sobre esta, tratando siempre de seleccionar los elementos con el menor peso posible.

#### *3.4.1.3 Cuerpo*

El cuerpo del robot es la parte central de la estructura que se la realizará completamente con el uso de perfiles de aluminio, buscando que sea resistente, usando la mínima cantidad de piezas posibles, logrando así tener el mayor espacio disponible para el resto de elementos.

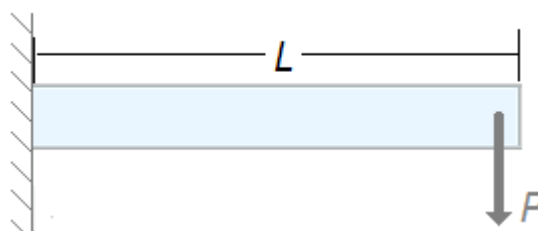
#### *3.4.1.4 Patas*

Las patas son piezas externas de la estructura que soportan todo el peso del robot, están unidas a las estructura por medio de eslabones, lo que les permite moverse, en un extremo estarán conectadas a los eslabones y al cuerpo y por el otro estarán las ventosas.

Un concepto importante a la hora de elegir el número de patas del robot es el de *estabilidad estática*. Este término se refiere a la capacidad del robot para permanecer estable (sin caerse) cuando no está en movimiento. Es más fácil mantener la estabilidad estática en un robot hexápodo que en uno cuadrúpedo por un motivo muy sencillo, hay más patas libres para repositionar el cuerpo del robot mientras este se apoya en tres de ellas y al ser el caso de un robot escalador el mayor número de patas en contacto con la superficie garantiza su adhesión y disminuye el deslizamiento. Por todos estos motivos se escogió la configuración hexápoda.

Por su configuración los pares de patas externas son analizados de manera distinta que el par de patas internas ya que sobre cada conjunto de patas el peso se reparte de forma diferente.

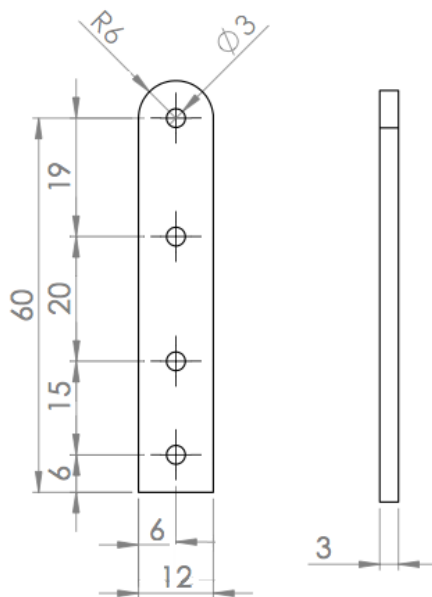
Se puede analizar cada pata individualmente como una viga en voladizo, debido a que las fuerzas que son aplicadas en la pata son semejantes con las representadas en el siguiente diagrama.



**Figura 17. Diagrama de fuerzas de viga en voladizo**

#### 3.4.1.4.1 Cálculos de Esfuerzo en las Patas

Antes de iniciar los cálculos de los esfuerzos en cada pata se definen las dimensiones de las mismas, estas se mantendrán o modificarán en función al resultado de los cálculos.



**Figura 18. Dimensiones de las patas del robot**

Las patas del robot soportan el peso del mismo en cada paso, esto se traduce a una fuerza que actúa sobre cada pieza.

$$F = \frac{m \times g}{n}$$

$F$ =Fuerza sometida a cada pieza [N]

$m$ =masa del robot [kg]

$g$ = gravedad  $m/s^2$

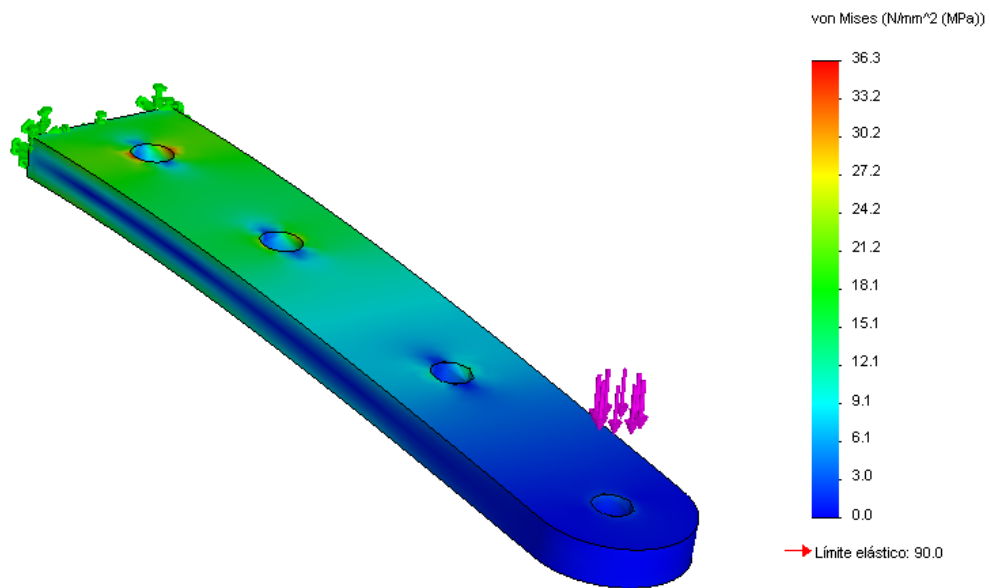
$n$ = número de piezas

En total son cuatro las patas que soportan el peso del robot cuando este comienza se realiza el paso.

$$F = \frac{2.51 \times 9.81}{4}$$

$$F = 6.15 [N]$$

Análisis realizado con el software solidworks.



**Figura 19. Esfuerzo de von mises de una pata externa**

Según el software se puede calcular un factor de seguridad de:

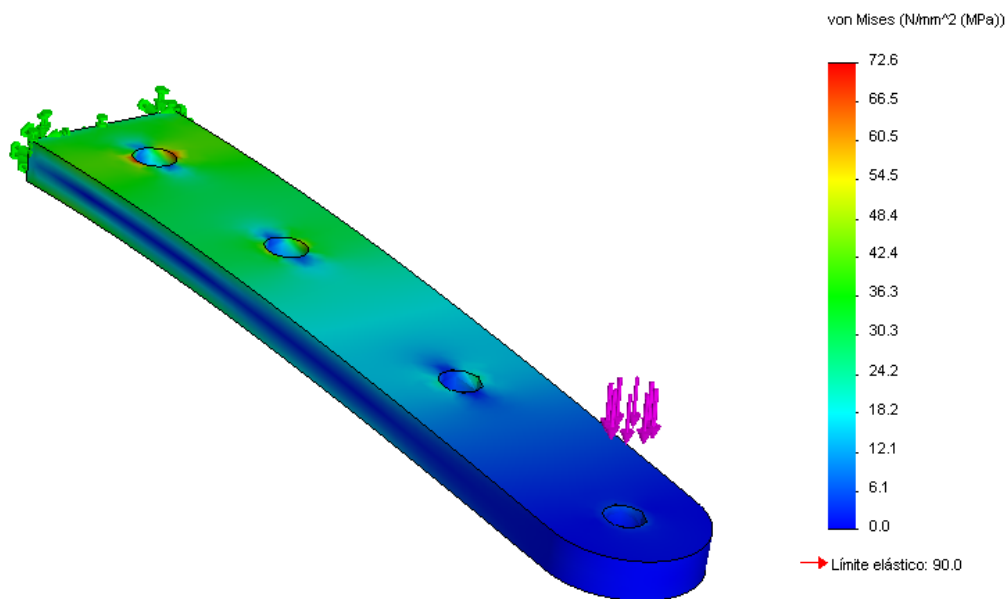
$$F_s = \frac{90}{36.3} = 2.47$$

Para las patas internas, son en total dos y son las que sostienen al robot mientras realiza el paso, por lo que el análisis es el siguiente:

$$F = \frac{2.51 \times 9.81}{2}$$

$$F = 12.31 [N]$$

Análisis realizado con el software solidworks



**Figura 20. Esfuerzo de von mises sobre la pata interna**

Según el software se puede calcular un factor de seguridad de:

$$F_s = \frac{90}{72.6} = 1.24$$

Los resultados obtenidos indican que los factores de seguridad son mayores a uno, esto nos indica que se puede conservar las dimensiones iniciales propuestas de las patas.

#### 3.4.1.5 Mecanismo de Descenso de Patas

El mecanismo que se usa debe ser uno que permita el movimiento de las patas en un solo eje, haciendo que estas puedan subir y bajar libremente y de manera perpendicular a la superficie ya que cada pata va a tener una ventosa la misma que debe hacer contacto total con el plano para generar vacío. Por las características mencionadas con las que debe contar el mecanismo y principalmente con la última, que es considerada la más crítica para el funcionamiento del robot sobre superficies verticales, se piensa en utilizar un mecanismo de cuatro barras.

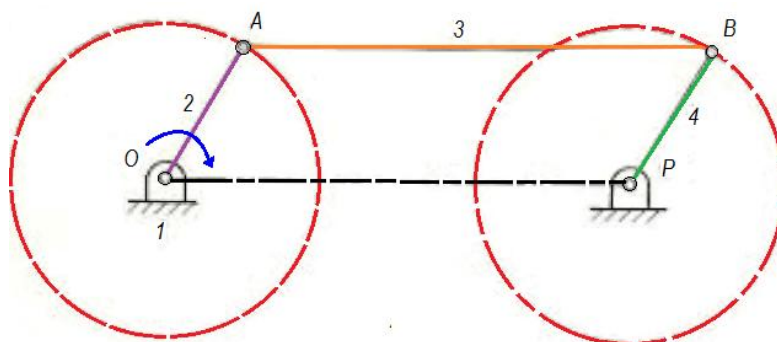
En ingeniería mecánica un mecanismo de cuatro barras o cuadrilátero articulado es un mecanismo formado por tres barras móviles y una cuarta barra fija (por ejemplo, el suelo), unidas mediante nudos articulados (unión de revoluta o pivotes). Las barras móviles están unidas a la fija mediante pivotes. Usualmente las barras se numeran de la siguiente manera:

Barra 1. Barra imaginaria que vincula la unión de revoluta de la barra 2 con la unión de revoluta de la barra 4 con el suelo o elementos fijos

Barra 2. Barra que proporciona movimiento al mecanismo.

Barra 3. Barra superior.

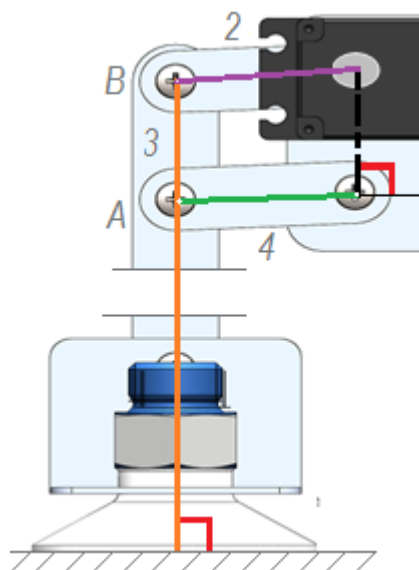
Barra 4. Barra que recibe el movimiento.



**Figura 21. Mecanismo de cuatro barras**

Si en este mecanismo las barras 2 y 4 son iguales, consiguen que la barra 3 sea siempre paralela a la barra imaginaria 1 que se forma entre los puntos O y P. Esto quiere decir que al poner los puntos O y P en la estructura o cuerpo del robot de una forma que la línea que los une sea perpendicular a la superficie, la barra 3, que será reemplazada con la pata también será perpendicular a la superficie, logrando así lo que se busca.





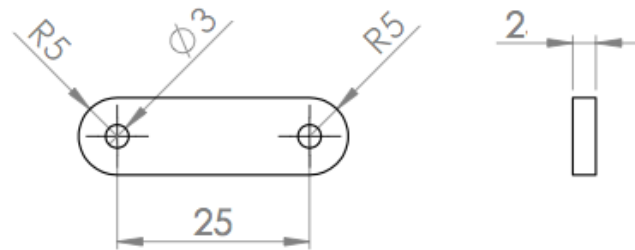
**Figura 22. Mecanismo aplicado en una pata del robot**

#### 3.4.1.6 Eslabones

Para unir las seis patas del robot con el cuerpo se usó acrílico de 2 mm de espesor, debido a las características que presenta como su dureza, que es similar al aluminio, es ligero y tiene una gran facilidad de mecanización y moldeo.

Estas piezas son los eslabones que permiten que se muevan las patas y son todas de igual geometría para lograr que las patas queden perpendiculares a la superficie como se explicó en la sección anterior. Por estas razones es que se utiliza acrílico ya que es factible y económico realizar el corte del mismo en láser, lo que garantiza la igualdad de estas pequeñas piezas.

Se define una geometría de prueba de las piezas de acrílico para realizar cálculos de esfuerzo en torno a las mismas, de obtener buenos resultados se mantendrá la geometría que se muestra a continuación.



**Figura 23. Dimensiones de los eslabones de acrílico**

Cada pata se conecta con el cuerpo con cuatro de estas piezas, dos a cada lado , siguiendo el mecanismo antes mencionado.

#### 3.4.1.7 Esfuerzo en eslabones de acrílico

Una vez definida la geometría de las piezas, se considera que estas son las que soportan gran parte del peso del robot por lo que es importante realizar el análisis correspondiente.

$$F = \frac{m \times g}{n}$$

$F$  = Fuerza sometida a cada pieza [ $N$ ]

$m$ =masa del robot [ $kg$ ]

$g$ = gravedad  $m/s^2$

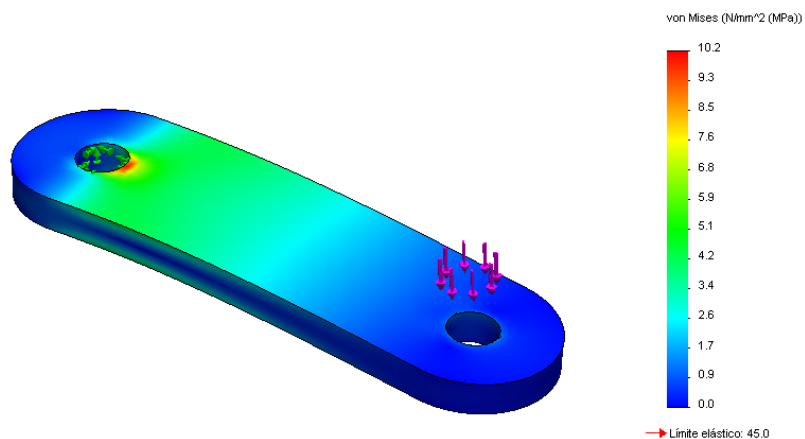
$n$ = número de piezas

En las patas exteriores el robot se encuentra soportado por 16 de estas piezas por lo que el cálculo resulta en el siguiente.

$$F = \frac{2.51 \times 9.81}{16}$$

$$F = 1.54 N$$

Análisis realizado con el software solidworks.



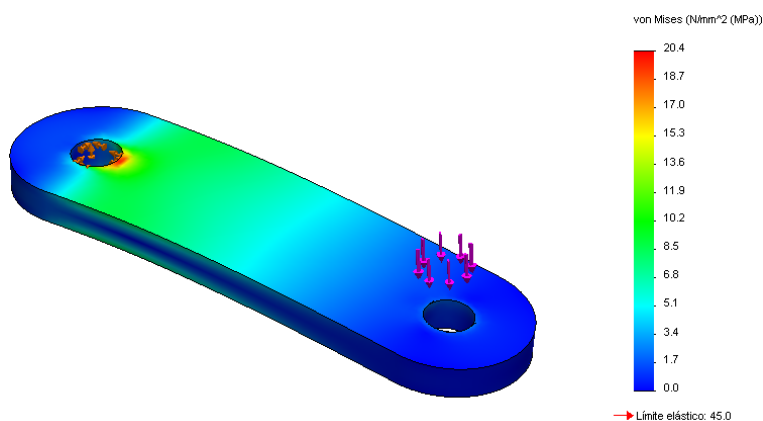
**Figura 24. Esfuerzo de von mises realizado en la pieza de las patas externas**

$$F_s = \frac{45}{10.2} = 4.41N$$

En las patas internas el robot se encuentra soportado por solo ocho de estas piezas, siendo este caso el más crítico, por lo que el cálculo resulta en el siguiente.

$$F = \frac{2.51 \times 9.81}{8}$$

$$F = 3.08 N$$



**Figura 25. Esfuerzo de von mises en el eslabón de una pata interior**

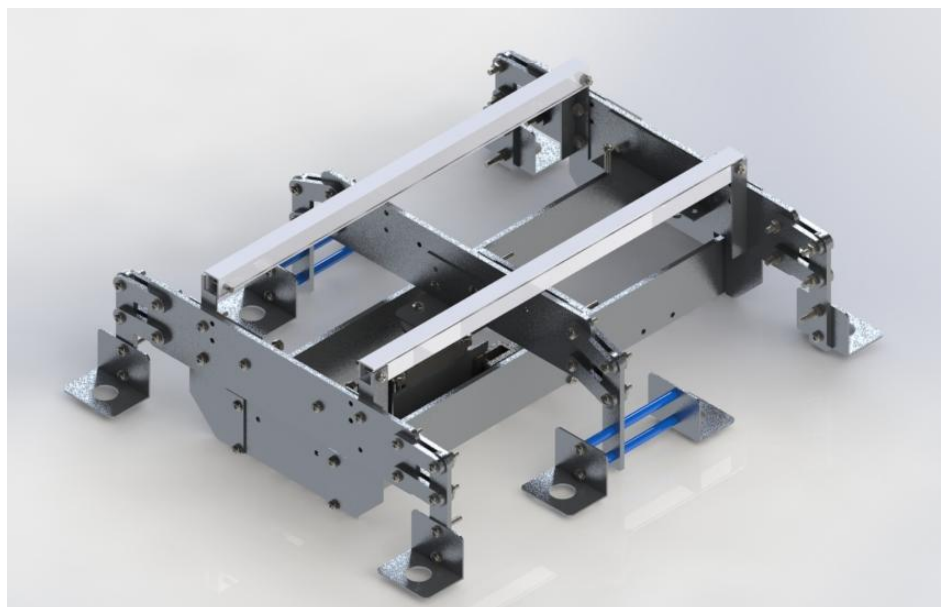
$$F_s = \frac{45}{20.4} = 2.20 \text{ N}$$

Al revisar las imágenes se puede determinar que el esfuerzo que se aplica en cada parte de acrílico no es considerable y eso indica que se puede usar el mismo número de piezas con la misma geometría establecida sin correr el riesgo de que estas fallen. La geometría final de las piezas de acrílico queda definida como se muestra en la figura 22.

Los esfuerzos y reacciones generadas por los pistones y por el motor de giro no se consideran críticos en las piezas que los sujetan por eso no se realiza cálculos de esfuerzos.

### 3.4.2 Estructura final del robot

Después de haber analizado cada parte de la estructura del robot se procede a unir todos los resultados de diseño y con la ayuda de un programa CAD<sup>5</sup>, se crea un modelo de toda la estructura para tener una idea general del mismo.



**Figura 26. Diseño CAD de la estructura del robot**

---

<sup>5</sup> CAD: Siglas en inglés para Diseño Asistido por Computador

## PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ESTRUCTURA FINAL DEL ROBOT

<b>MATERIAL</b>	Aluminio
<b>MASA TOTAL</b>	2.54 Kg
<b>VOLUMEN</b>	904246 mm <sup>3</sup>
<b>CENTRO DE MASA (MILÍMETROS)</b>	X = -1.71
	Y = 17.00
	Z = 230.20

### 3.5 DISEÑO NEUMÁTICO

Una parte importante del robot es sin duda la parte neumática, ya que el circuito deberá llevar el aire con la presión suficiente hacia los sensores y actuadores para el correcto desempeño del robot.

Cada elemento neumático requiere una cierta cantidad de flujo de aire y de presión. Cada actuador neumático requiere una electroválvula para controlar el flujo de aire que pasa hacia el mismo, con el fin de disminuir peso y espacio en el robot se utilizó solamente los actuadores necesarios para cumplir con los objetivos tanto de locomoción como de adhesión a superficies, evitando así el uso exagerado de pesadas electroválvulas que afectan al funcionamiento del robot.

#### 3.5.1 Selección de Ventosas

Debido a las características de la superficie sobre la cual el robot se va a desplazar, las propiedades que poseen las ventosas son adecuadas para la locomoción del robot sobre superficies con un elevado ángulo de inclinación e inclusive de forma totalmente vertical.

Para realizar la selección de las ventosas adecuadas el factor más importante es el peso del robot, el cual se lo ha estimado en un aproximado

de 12 lb (5.46 Kg). Las ventosas tienen que aguantar un esfuerzo de cortadura que es el peso del prototipo más las fuerzas debidas a la aceleración.

Se considera que el robot se mantendrá apoyado constantemente en cuatro ventosas por lo que se distribuye su peso en cuatro puntos de apoyo. Se calcula que cada ventosa debe soportar 2.73 Kg, a partir de esta información se realizan los siguientes cálculos para la selección correcta de las mismas.

#### 3.5.1.1 Calculo de las Ventosas

Para determinar la fuerza de aspiración es necesario conocer la aceleración que tendrá el robot

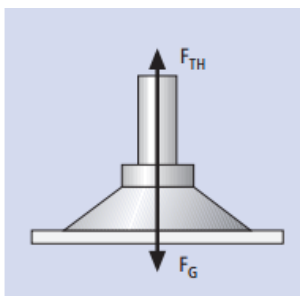
$$V = \frac{d}{t} = \frac{0.05[m]}{1[s]} = 0.05 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Con este valor de velocidad se calcula un estimado de la aceleración del sistema

$$a = \frac{V}{t} = \frac{0.05 \left[ \frac{m}{s} \right]}{1[s]} = 0.05 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Debido a que la velocidad es baja la aceleración también lo es, sin embargo el catálogo de SCHMALZ recomienda utilizar un valor de aceleración de 2

#### Ventosa Horizontal – Fuerza Vertical



**Figura 27. Ventosa horizontal- fuerza vertical**

**Fuente: (Schmalz, 2015)**

$$F_{TH} = m \times (g + a) \times S$$

$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$m$  = Masa [kg]

$g$  = gravedad  $[9.81 \text{ m/s}^2]$

$a$  = aceleración  $[m/s^2]$  de la instalación

$S$  = Factor de seguridad 1.5 para piezas lisas

$$F_{TH} = 2.5 \times (9,81 + 2) \times 1.5$$

$$F_{TH} = 44.28 \text{ [N]}$$

Fuerza de Aspiración

$$F_S = \frac{F_{TH}}{n}$$

$F_S$  = Fuerza de aspiración [N]

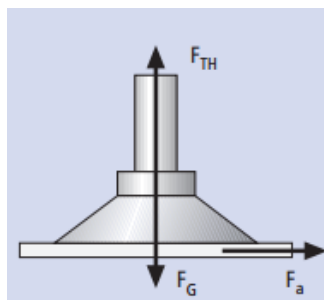
$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$n$  = número de ventosas

$$F_S = \frac{44.28}{4}$$

$$F_S = 11.07 \text{ [N]}$$

**Ventosa Horizontal – Fuerza Horizontal**



**Figura 28. Ventosa horizontal- fuerza horizontal**

**Fuente: (Schmalz, 2015)**

$$F_{TH} = m \times \left( g + \frac{a}{\mu} \right) \times S$$

$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$m$  = Masa [kg]

$g$  = gravedad  $\left[ 9.81 \frac{m}{s^2} \right]$

$a$  = aceleración  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$  de la instalación

$\mu$  = Coeficiente de fricción 0.5 para madera, metal, vidrio, superficies lisas

$S$  = Factor de seguridad 1.5 para piezas lisas

$$F_{TH} = 2.5 \times \left( 9.81 + \frac{2}{0.5} \right) \times 1.5$$

$$F_{TH} = (2.5) \times (13.81) \times 1.5$$

$$F_{TH} = 52.5 [N]$$

Fuerza de Aspiración

$$F_S = \frac{F_{TH}}{n}$$

$F_S$  = Fuerza de aspiración [N]

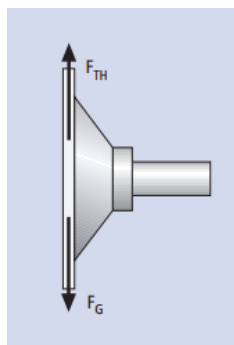
$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$n$  = número de ventosas

$$F_S = \frac{52.5}{4}$$

$$F_S = 13.12 [N]$$

**Ventosa Vertical - Fuerza Vertical**



**Figura 29. Ventosa vertical - fuerza vertical**

**Fuente: (Schmalz, 2015)**



$$F_{TH} = \left(\frac{m}{\mu}\right) \times (g + a) \times S$$

$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$m$  = Masa [kg]

$g$  = gravedad  $\left[9.81 \frac{m}{s^2}\right]$

$a$  = aceleración  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$  de la instalación

$\mu$  = Coeficiente de fricción 0.5 para madera, metal, vidrio, superficies lisas

$S$  = Factor de seguridad 1.5 para piezas lisas

$$F_{TH} = \left(\frac{2.5 \text{ kg}}{0.5}\right) \times \left(9.81 \frac{m}{s^2} + 2 \frac{m}{s^2}\right) \times 1.5$$

$$F_{TH} = (5) \times (11.81) \times 1.5$$

$$F_{TH} = 88.57 \text{ [N]}$$

Fuerza de Aspiración

$$F_S = \frac{F_{TH}}{n}$$

$F_S$  = Fuerza de aspiración [N]

$F_{TH}$  = Fuerza de retención teórica [N]

$n$  = número de ventosas



$$F_S = \frac{88.57}{4}$$

$$F_S = 22.14 \text{ [N]}$$

Al realizar los cálculos correspondientes, se concluye que el caso en el que se encuentra la ventosa vertical y la fuerza vertical es el más crítico, por lo que se utiliza el dato de la fuerza de aspiración de 22.14 [N] para la selección del diámetro de las ventosas de la siguiente tabla.

Tabla 2

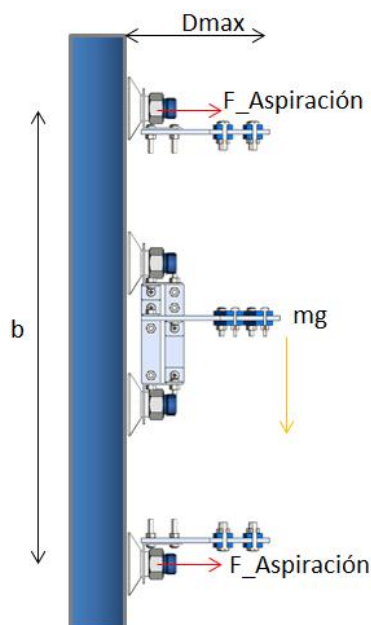
## Diámetro de las ventosas según la fuerza de aspiración

Ø Ventosa	Volumen cm <sup>3</sup>	Fuerza Vertical 	Fuerza Horizontal 
15 mm	0.037	11 N	7.5 N
20 mm	1	18.7 N	8.45 N
25 mm	1.1	24.9 N	10 N
30 mm	2	30.8 N	20 N
40 mm	4.8	50 N	29.5 N
50 mm	10	96 N	50 N
75 mm	20	272 N	140 N
110 mm	70	562 N	299.7 N

Fuente: (Catalogo de ventosas standard A.r.t, 2014)

Después de estos cálculos se obtiene como resultado que siempre que se use un diámetro de ventosa igual o mayor que  $d = 40 [mm]$ , las ventosas no presentarán problemas para mantener el peso del robot.

## 5.3.1.2 Calculo de Momento Sobre el Robot



$$b = 290 [mm]$$

$$m = 2.54 [kg]$$

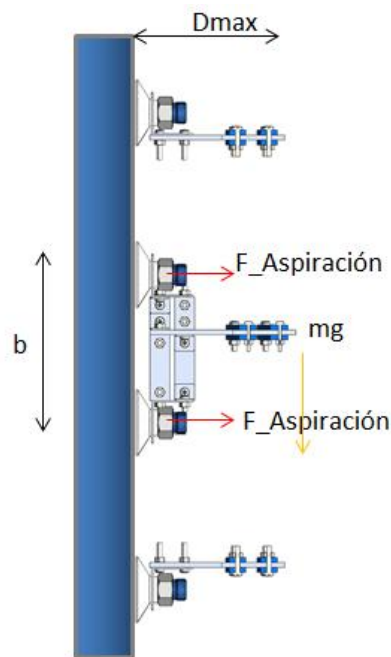
$$\sum M_A = 0$$

$$-b \cdot F_{Aspiración} + m \cdot g \cdot D_{max} = 0$$

$$D_{max} = \frac{0.29[m] \cdot 27.76[N]}{2.54[kg] \cdot 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]}$$

$$D_{max} = 0.32[m]$$

$$D_{max} = 32 [cm]$$



$$b = 90 [mm]$$

$$m = 2.54 [kg]$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-b \cdot F_{Aspiración} + m \cdot g \cdot D_{max} = 0$$

$$D_{max} = \frac{0.09[m] \cdot 27.76[N]}{2.54[kg] \cdot 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]}$$

$$D_{max} = 0.1[m]$$

$$D_{max} = 10 [cm]$$

El cálculo en las patas internas nos indica que el robot puede tener una altura máxima de 32 [cm] mientras que al realizar el cálculo en la patas internas se determina que la altura máxima es de 10 [cm] ya que este es el valor más crítico se realiza el diseño del robot considerando este valor para evita que el momento provoque la caída del robot.

### 3.5.2 Selección de Cilindros

Antes de seleccionar los cilindros, se debe tener en cuenta que debido al tamaño del robot los cilindros no podrán ser de una gran longitud por las limitaciones de tamaño de la estructura, su carrera será igual a la distancia que el robot pueda avanzar en cada paso.

Otra característica a tener en cuenta para la selección de los cilindros es que el pistón cuente con un imán incorporado por el tipo de sensor que se usará. Ciertos cilindros incorporan un imán en el pistón a efectos de actuar un interruptor magnético del tipo Reed-Switch o similar, montado en el exterior del cilindro, durante o al final de su carrera. Esta señal eléctrica es utilizada para gobernar a otros órganos componentes del sistema, actuadores, contadores, emitir señales luminosas, actuadores, contactores, relés, PLC, o bien para controlar su propio movimiento.

Se va a utiliza cilindros de doble efecto debido a que el trabajo realizado es aprovechable en ambos sentidos de la marcha

#### 3.5.2.1 Cálculo de Diámetro del cilindro

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{m}{2} \cdot g}{\lambda \cdot \mu \cdot P}}$$

$D$ = diámetro del cilindro [mm]

$m$ = masa total [gr] 2.51 kg

$g$ = gravedad [ $m/s^2$ ]

$\lambda$ = factor de carga comprendido entre 0.25 a 0.80

$\mu$ = coeficiente de rendimiento interno

$P$ = Presión de trabajo [Pa]

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{2.51}{2} \cdot 9.81}{0.8 \cdot 0.8 \cdot 300000}}$$

$$D = 0.016 \text{ m} = 16[\text{mm}]$$

### 3.5.2.2 Calculo de Fuerza del Cilindro

$$F = 10 \cdot P \cdot \pi \cdot \left(\frac{d^2}{4}\right)$$

$F$ = Fuerza [N]

$P$ = presión [bar]

$d$ = Diámetro del cilindro [cm]

$$F = 10 \cdot 3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1.6^2}{4}\right)$$

$$F = 60.29 \text{ [N]}$$

Al usar dos cilindros se puede obtener una fuerza total de  $F_T = 120.58 \text{ [N]}$

### 3.5.2.3 Calculo de aire en cilindros

El cálculo del consumo de aire en cilindros neumáticos es muy importante cuando se requiere conocer la capacidad del compresor necesario para abastecer a la demanda de una instalación. Puede calcularse con la siguiente formula, o mediante el gráfico adjunto.

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2 \cdot c \cdot n \cdot P \cdot N \cdot 10^{-6}$$

$Q$  = Consumo de aire (Nl/min)

$d$  = Diámetro del cilindro (mm)

$c$  = Carrera del cilindro (mm)

$n$  = Número de ciclos completos por minuto

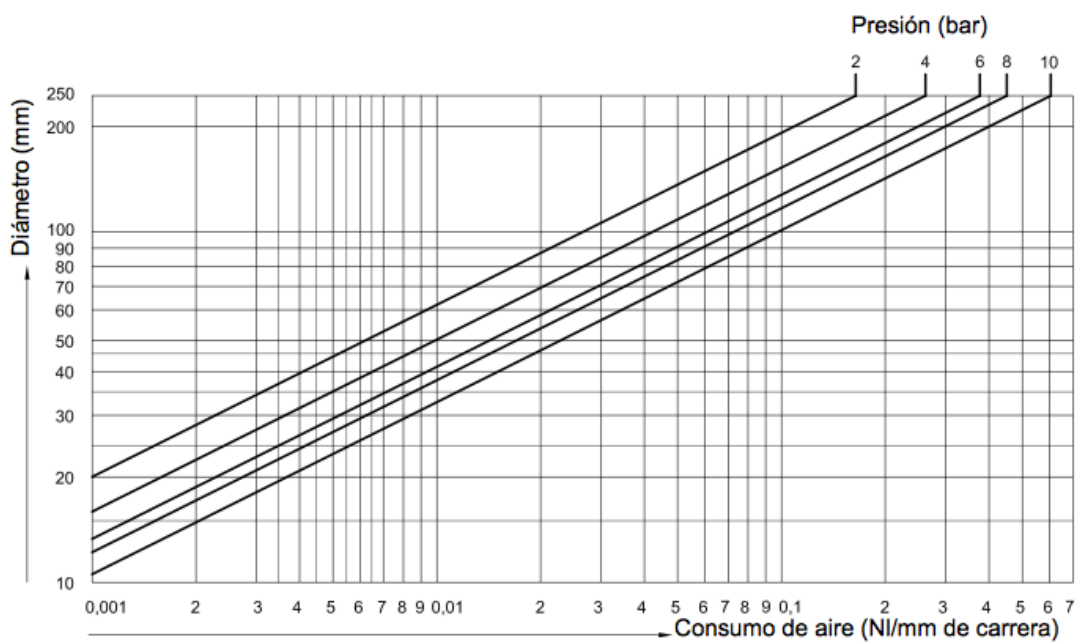
$P$  = Presión absoluta = Presión relativa de trabajo + 1 bar

$N$  = Número de efectos del cilindro ( $N=1$  para simple efecto,  $N=2$  para doble efecto)

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 16^2 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-6}$$

$$Q = 0.804 \left[ \frac{Nl}{min} \right]$$

Al utilizar dos cilindros el consumo total es de  $Q_T = 1.608 \left[ \frac{Nl}{min} \right]$



**Figura 30. Gráfico de diámetro en función de consumo de aire y presión**

**Fuente: (Schmalz, 2015)**

Después de todos los cálculos realizados, se seleccionan dos cilindros MINDMAN MCM1-11-16-50, que cumplen con las condiciones que se buscan y cuentan con las siguientes características:

**Tabla 3**

**Características del cilindro seleccionado**

<b>MINDMAN MCM1-11-16-50</b>
Diámetro nominal: 16mm
Carrera: 50mm
Tipo: Doble efecto
Peso: 200 gr
Presión máxima de operación: 0.7MPa (7bares)
Presión mínima de operación: 0.06MPa (0.6 bares)

Se debe aclarar que se decidió usar dos cilindros para mantener la simetría y evitar el desviamiento del carro móvil, al accionar los dos cilindros a la vez el movimiento es lineal al realizar el paso, asemejando su comportamiento al de un cilindro con guía anti giro de dos vástagos, el cual es más costoso y difícil de conseguir en el mercado local.

### 3.5.3 Selección de Generadores de Vacío

Los generadores de vacío se seleccionan principalmente por su capacidad de aspiración en relación a las ventosas previamente seleccionadas, su presión de trabajo, peso, tamaño y costo.

Sabiendo que el diámetro mínimo de ventosas a usar será de 40mm de diámetro se procede con los siguientes cálculos.

### 3.5.3.1 Capacidad de Aspiración del Generador de Vacío

La capacidad de aspiración de la que debe disponer un generador de vacío para evacuar la ventosa depende del diámetro de la ventosa. La capacidad de aspiración correspondiente a cada generador de vacío se encuentra en las especificaciones técnicas de cada generador.

Basándose en valores empíricos y de medición a la hora de dimensionar sistemas, se recomienda elegir a partir de la siguiente tabla

**Tabla 4**

#### Capacidad de aspiración para la evacuación de una ventosa

Diámetro de la Ventosa	Capacidad de aspiración $V_s$	
Hasta 60 mm	0.5 $m^3/h$	8.3 $l/min$
Hasta 120 mm	1.0 $m^3/h$	16.6 $l/min$
Hasta 215 mm	2.0 $m^3/h$	33.3 $l/min$
Hasta 450 mm	4.0 $m^3/h$	66.6 $l/min$

**Fuente: Componentes de vacío catalogo 2013/2014 SCHMALZ**

Para el cálculo de la capacidad de aspiración que debe disponer el generador de vacío se tiene en cuenta la capacidad de aspiración con los pares de ventosas que se encuentran en contacto al realizar el paso por eso el número de ventosas será de cuatro, que es la cantidad mínima que en todo momento deberán estar en contacto con la superficie.

$$V = n \times V_s$$

$n$ = número de ventosas

$V_s$ = capacidad de aspiración necesaria para una sola ventosa  $l/min$

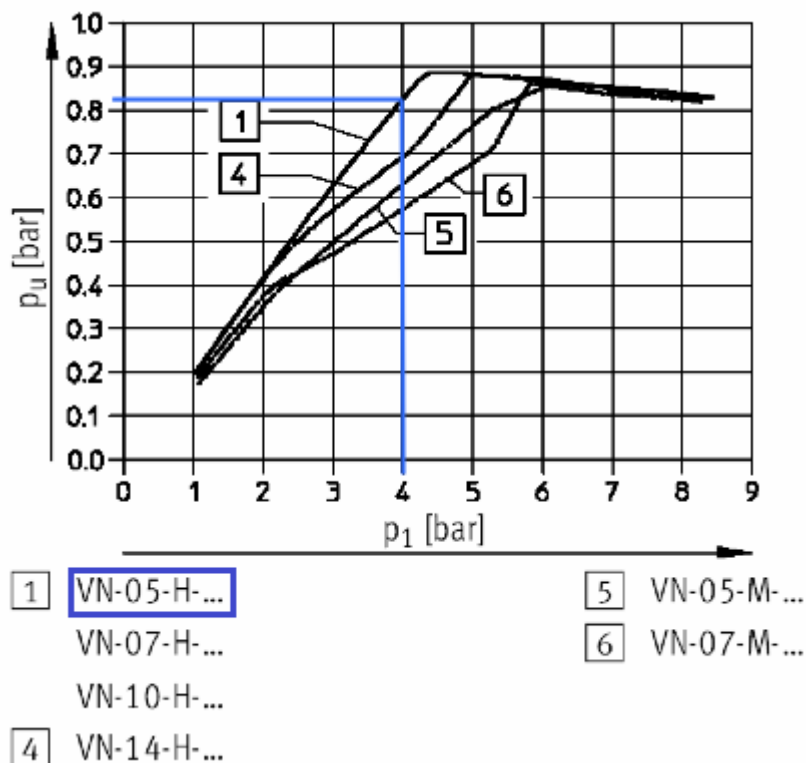
$$V = 4 \times 8.3$$



$$V = 33.2 \frac{l}{min}$$

Se pre selecciona un generador de vacío VN-05-H-T3-PQ2-VA4-RO1 marca FESTO por sus características

Se utiliza la gráfica de presión de vacío – presión de trabajo correspondiente al generador de vacío preseleccionado. Si se entra con el dato de presión de trabajo de 5 bar se obtiene un vacío de cerca de 0,9 bar pero se puede observar que con una presión de trabajo menor el grado de vacío se mantiene sin embargo como se sabe, trabajar a menor presión implica un ahorro energético por lo que se toma la decisión de en este caso usar una presión de 4 bar. Con esta nueva presión de trabajo se puede observar que el vacío será un poco mayor que 0,8 bar. Se va a usar ese dato de 0,8 bar para cálculos posteriores.

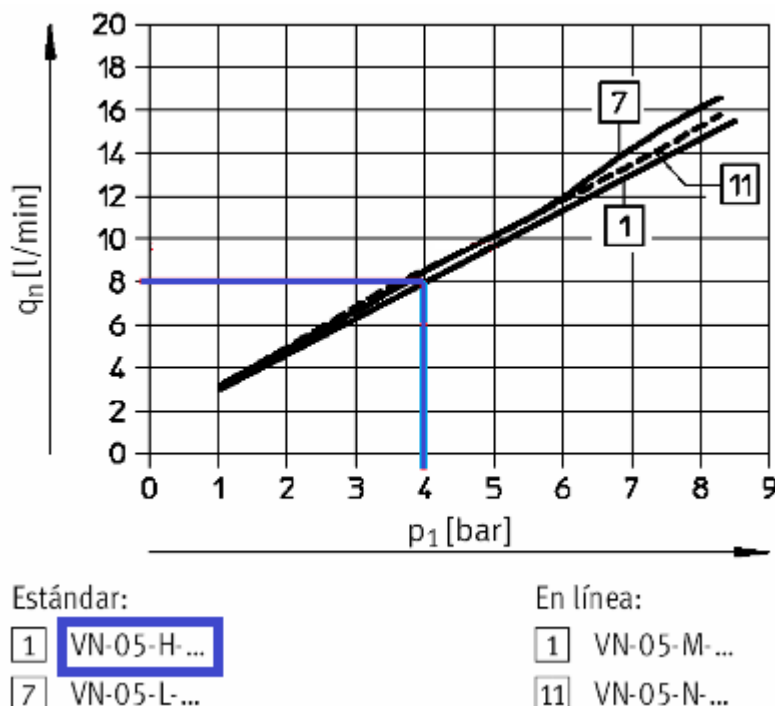


**Figura 31. Grafica de vacío generado a partir de presión de trabajo**

**Fuente: (Festo, 2015)**

### Consumo de aire por los generadores de vacío

Un dato importante para tener en cuenta es el consumo de aire. En este caso como ya se ha elegido dos generadores de caudal tipo VN-05-H-T3-PQ2-VA4-RO1 se puede acudir a la gráfica donde se da el consumo de aire en función de la presión de trabajo.



**Figura 32. Gráfica de consumo de aire en función de presión de funcionamiento**

**Fuente: (Festo, 2015)**

Sabiendo que la presión de trabajo para los generadores de vacío será de cuatro bares, se tiene que el consumo de cada uno es de cerca de 8 l/min, al iniciar el robot y al finalizar cada orden enviada por el control se pretende que el robot se mantenga en un estado en el cual los dos generadores estén en funcionamiento lo que implica que este consumo será el doble mientras permanezca en ese estado es decir de aproximadamente un total de 16 l/min.

### 3.5.4 Selección de Electroválvulas

Las electroválvulas controlan el paso de aire, por medio de señales eléctricas, son del tipo distribuidoras ya que determinan el camino que ha de tomar la corriente de aire y son las encargadas de controlar el movimiento de los pistones de los cilindros así como el aire que llega a los generadores de vacío.

Para los dos cilindros, los cuales son de doble efecto es necesario una válvula distribuidora de aire de cinco vías y dos posiciones (5/2) de accionamiento y retorno eléctrico.

Se selecciona una electroválvula DV 3220-5H de accionamiento doble por solenoide, un voltaje de funcionamiento de 24V DC, no necesita mantenimiento y tiene protección contra polvo.

<b>DV</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>5</b>
Válvula	Series 3000	Doble solenoide	Cuerpo autoportante	24V

**Tabla 5**

#### **Características de electroválvula 5/2**

<b>Características de electroválvula TPC DV 3220-5</b>	
Presión de operación	0.1-0.7 MPa
Temp. Máxima de trabajo	50°C
Lubricación	No requerida
Montaje	Libre
Estructura	DIN IP65
Voltaje de accionamiento	24V $\pm$ 3V

Para los generadores de vacío son necesarias otro tipo de válvulas distribuidoras, las cuales son de tres vías y dos posiciones (3/2) de accionamiento eléctrico y retorno mecánico por resorte.

Debido a su bajo peso y su tamaño reducido se han seleccionado las electroválvulas TAIYO USR- 330

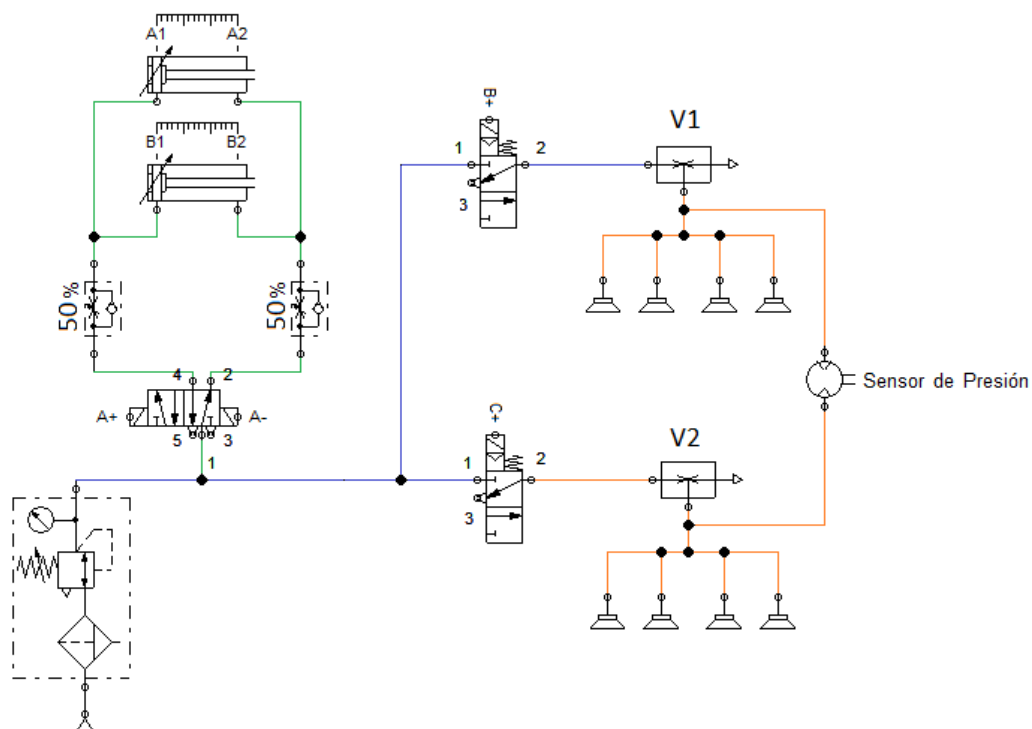
**Tabla 6**

**Características de la electroválvula 3/2**

Características de electroválvula TAIYO USR- 330	
Presión de operación	0.15-0.7 MPa
Temp. Máxima de trabajo	5-50°C
Lubricación	No requerida
Montaje	Libre
Peso	75gr
Voltaje de accionamiento	12V $\pm$ 2V

3.5.5 Circuito Neumático

Después de haber definido los componentes neumáticos que se van a utilizar, se diseña el circuito neumático que garantiza que llegue el fluido a cada uno de los componentes para su funcionamiento como se muestra en la figura.



**Figura 33. Circuito Neumático**

En la figura 32 se muestra el circuito neumático representando cada elemento con su respectivo símbolo los cuales están reunidos en la norma ISO 1219-1<sup>6</sup>

En cuanto a las conexiones neumáticas se utilizan dos tipos de mangueras, rígidas de NBR<sup>7</sup> color azul con un diámetro nominal de 6 mm (Representada en color azul) y 4 mm (Representada en color verde) que son los diámetros de las conexiones rápidas de los elementos utilizados y un tipo de mangueras flexibles de caucho de un único diámetro de 6 mm (Representada en color naranja) en conexiones entre componentes con movimientos relativos.

### 3.6 DISEÑO ELECTRÓNICO

Para el diseño de la parte electrónica se usan actuadores y sensores que presten varias características como bajo peso, baja corriente nominal y facilidad de programación, como servomotores y sensores de tipo digital.

#### 3.6.2 Selección de servomotores

EL uso de servomotores se debe a las características que estos presentan como peso y tamaño reducido, alto torque, fácil control y alta precisión. Al seleccionar un servomotor se debe tener en cuenta las especificaciones del mismo principalmente el torque, corriente y voltaje de trabajo. Existen otras características secundarias como el material de los engranes de la caja reductora, la geometría, la cual es estándar en una gran variedad de marcas de servomotores con distintas características y el peso que por lo general rodea los 50gr.

---

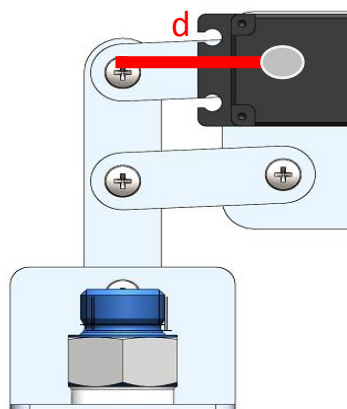
<sup>6</sup> Ver ANEXO

<sup>7</sup> **NBR**. La goma de nitrilo o NBR, es un copolímero de goma sintética formado por acrilonitrilo (ACN) y butadieno.

Según el diseño, para minimizar el peso y los componentes, el uso de pistones para el movimiento de las patas se ha reemplazado por servomotores, los cuales son los encargados de elevar y bajar las patas, debido a que el total de patas son 6 este será el número de servomotores que se van a utilizar, pero los 6 no van a ser de las mismas características.

Para realizar el giro tanto a la derecha como a la izquierda se utiliza también un servomotor que será programado de forma diferente que los otros 6 que estarán en cada pata y tendrá características diferentes.

Para poder seleccionar los servomotores hay que calcular el torque que estos requieren para realizar el trabajo.



**Figura 34. Distancia desde motor hasta pata del robot**

$$T = F \times d$$

$T$  = Torque total [ $kg \cdot cm$ ]

$F$  = Fuerza de trabajo [kg]

$d$  = distancia que realiza el trabajo [cm]

$$T = 2.51 \times 3.5$$

$$T = 8.79 [kg \cdot cm]$$

Torque para las patas externas

$$T_s = \frac{T \times Fs}{n}$$

$T_{s1}$  = Torque necesario por motor en las patas externas

$n$  = numero de motores

$Fs$  = Factor de seguridad (1.5)

$$T_{s1} = \frac{8.79 \times 1.5}{4}$$

$$T_{s1} = 3.29 [kg \cdot cm]$$

Con este valor se selecciona el servomotor FUTABA S3003 con un torque de 4.1 [ $kg \cdot cm$ ]

**Tabla 7**

**Características del servomotor de las patas externas**

<b>Especificaciones del Servomotor FUTABA S3003</b>
Sistema de Control: Control neutral por ancho de pulso 1520 $\mu$ seg
Pulso Requerido: 3 -5 voltios pico a pico de onda cuadrada
Voltaje de Operación: 4.8- 6.0 V
Rango de Temperatura de Funcionamiento: -20 a 60 °C
Velocidad de Operación (4.8 V): 0.23 sec/60°
Velocidad de Operación (6.0 V): 0.19 sec/60°
Torque de Salida (4.8 V): 3.2 kg cm
Torque de Salida (6.0 V): 4.1 Kg cm

Torque para las patas internas

Las patas internas son solo dos, por lo que el cálculo de estas es diferente y seguramente se necesite un motor con un torque mayor.

$$T_s = \frac{T \times F_s}{n}$$

$T_{s2}$  = Torque necesario por motor en las patas internas

$n$  = numero de motores

$F_s$  = Factor de seguridad (1.5)

$$T_{s2} = \frac{8.79 \times 1.5}{2}$$

$$T_{s2} = 6.59 [kg \cdot cm]$$

Con este valor se selecciona el servomotor Hitec-485HB con un torque de 4.8 [ $kg \cdot cm$ ] cada uno y un peso de 45g.

Tabla 8

## Características del servomotor de las patas internas

Especificaciones del Servomotor Hitec-485HB	
Sistema de Control:	Control neutral por ancho de pulso 1520 $\mu$ seg
Pulso Requerido:	3 -5 voltios pico a pico de onda cuadrada
Voltaje de Operación:	4.8-6.0 V DC
Rango de Temperatura de Funcionamiento:	-20 a 60°C
Velocidad de Operación (4.8 V):	0.22sec / 60°
Velocidad de Operación (6.0 V):	0.18sec / 60°
Torque de Salida (4.8 V):	4.8 kg cm
Torque de Salida (6.0 V):	6.0 kg cm

## Torque para el servomotor de giro

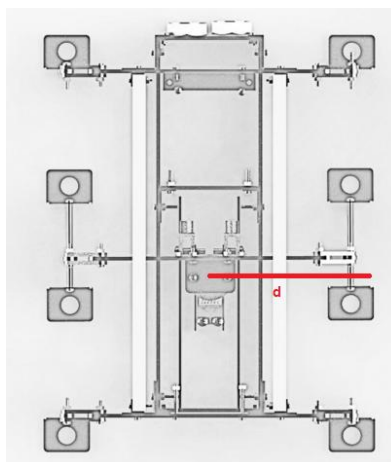


Figura 35. Distancia desde motor de giro hasta pata interna

$$T = \frac{9550 \cdot P}{n}$$

$T$  = Torque total [ $kg \cdot cm$ ]

$P$  = Potencia [ $kw$ ]

$n$  = velocidad angular [ $rpm$ ]



La potencia del motor se calcula multiplicando el voltaje de operación por la corriente que consume.

$$P = V \cdot I$$

$P$ =Potencia del motor [kw]

$V$ = Voltaje [V] (5V)

$I$ =corriente [A] (corriente máxima del servomotor según catálogos es de 1 [A])

$$P = 5 \cdot 1$$

$$P = 5 [w]$$

La velocidad es seleccionada por medio de programación del servomotor la cual esta referenciada a 60 [rpm].

$$T = \frac{9550 \cdot \frac{5}{1000}}{60} [N \cdot m] \times \frac{100}{10} [kg \cdot cm]$$

$$T = 7.95 [kg \cdot cm]$$

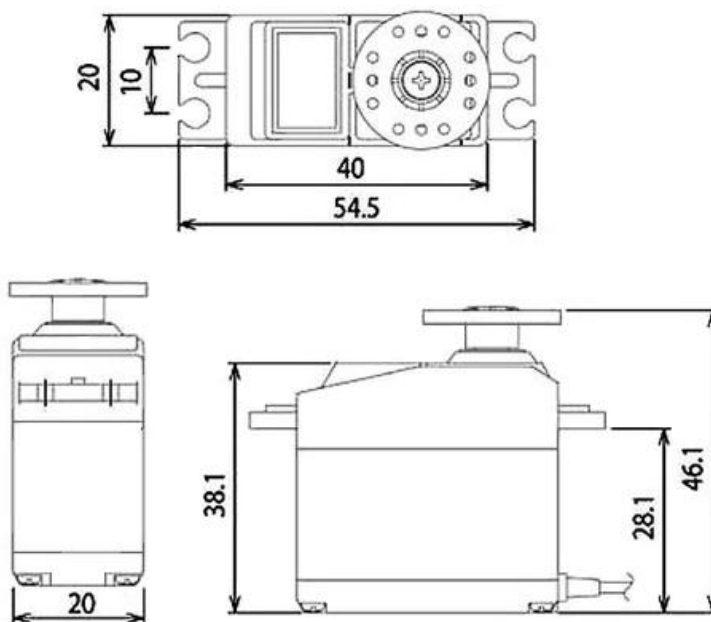
Según este valor de torque se necesita utilizar el servomotor FUTABA S3305 con un torque máximo de 8.9 [kg · cm]

## Tabla 9

### Características del servomotor de giro

<b>Especificaciones del Servomotor FUTABA S3305</b>
Sistema de Control: Control neutral por ancho de pulso 1520 µseg
Pulso Requerido: 3 -5 voltios pico a pico de onda cuadrada
Voltaje de Operación:4.8- 6.0 V
Rango de Temperatura de Funcionamiento: -20 a 60 °C
Velocidad de Operación (4.8 V): 0.25 sec/60°
Velocidad de Operación (6.0 V): 0.20 sec/60°
Torque de Salida (4.8 V): 7.1 kg cm
Torque de Salida (6.0 V): 8.9 Kg cm

Los 3 tipos de motores seleccionados a pesar de ser de distintas características y marcas comerciales, son de las mismas dimensiones, las cuales se muestran a continuación.



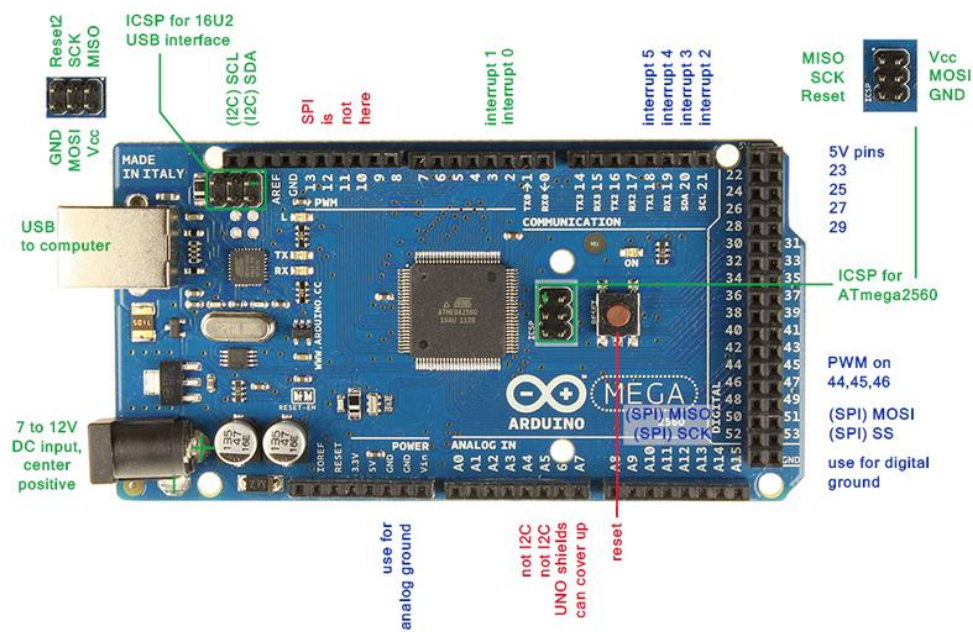
**Figura 36. Dimensiones en mm de servomotores seleccionados**

### 3.6.3 Placa Central ARDUINO

Se decidió usar una placa Arduino por ser una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

Las placas Arduino pueden medir valores ambientales al recibir información de variedad de sensores y afectar sus alrededores controlando luces, motores y otros actuadores, además el software puede ser descargado gratuitamente y los diseños de referencia están disponibles bajo una licencia de código abierto, así que cualquiera es libre de adaptar el diseño a sus necesidades, sin mencionar que existe una gran variedad de librerías para prácticamente cualquier componente externo que se requiera acoplar. Estas son características suficientes para confirmar la selección de una de estas placas

Existe una multitud de placas Arduino con diferentes prestaciones que el mercado ofrece, las mismas que se pueden adquirir a precios muy convenientes. Al conocer las necesidades de este proyecto se optará por una placa con un gran número de entradas y salidas, robusta y con entradas analógicas



**Figura 37. Placa Arduino MEGA**

**Fuente: (Arduino, 2015)**

La placa que cumple estas características es la Arduino MEGA Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas analógicas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa.

**Tabla 10****Características de la placa Arduino**

<b>Características de la Placa Arduino MEGA</b>	
Micro controlador	ATmega2560
Voltaje Operativo	5 V
Voltaje de Entrada(Recomendado)	7-12 V
Voltajes de entrada (limites)	6-20 V
Pines digitales de Entrada/Salida	54 (15 con salida PWM)
Pines análogos de entrada	16
Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida	40 mA
Corriente DC entregada en el Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8KB usados por el bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad de Reloj	16 MHz

**Fuente: (Arduino, 2015)**

La comunicación entre el computador y el Arduino se produce a través del puerto serie, sin embargo posee un convertidor USB-serie, por lo que sólo se necesita conectar el dispositivo a la computadora utilizando un cable USB como el que utilizan las impresoras.

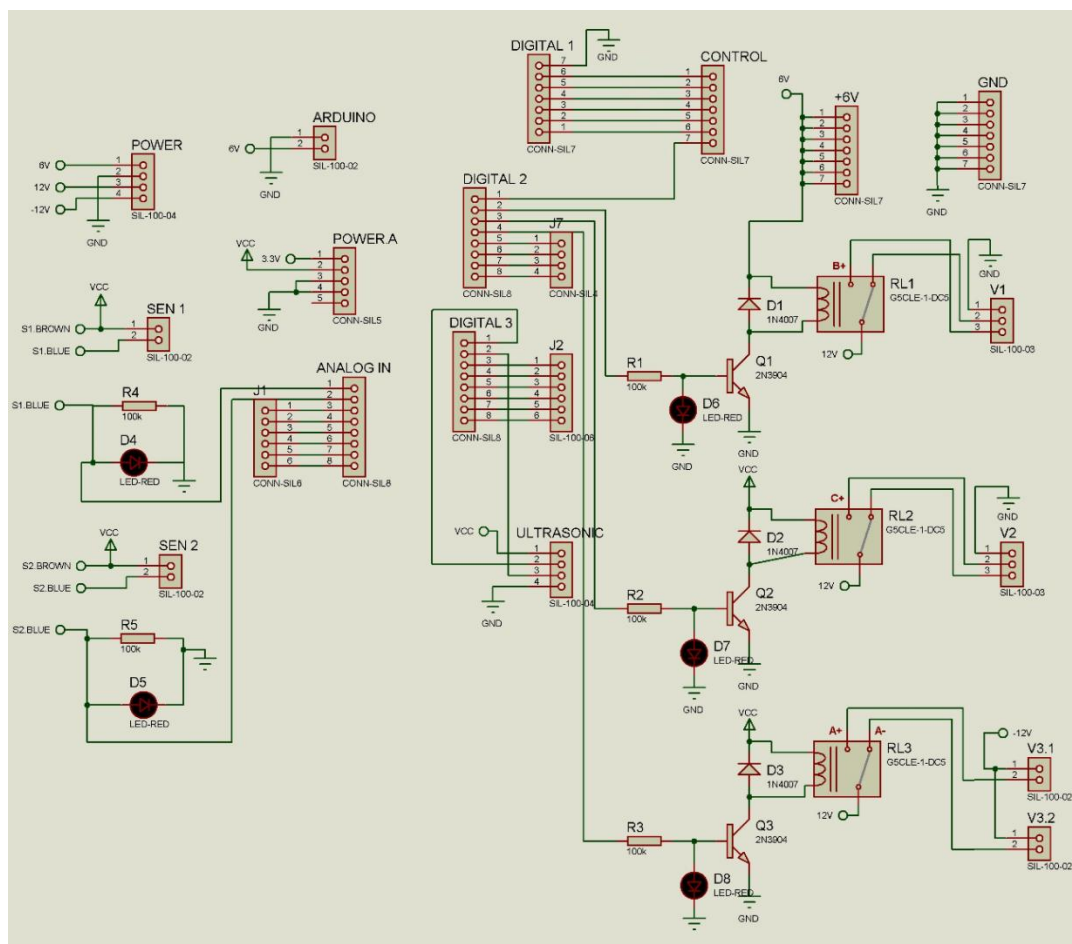
#### 3.6.4 Diseño de circuitos eléctricos

El circuito principal usado es la placa Arduino de la cual salen todas las señales de control para los diferentes actuadores como servomotores y electroválvulas también se encarga de recoger y procesar las señales de todos los sensores.

Se diseña una placa auxiliar la cual cuenta con relés para la activación de las electroválvulas las cuales se activan con voltajes mayores

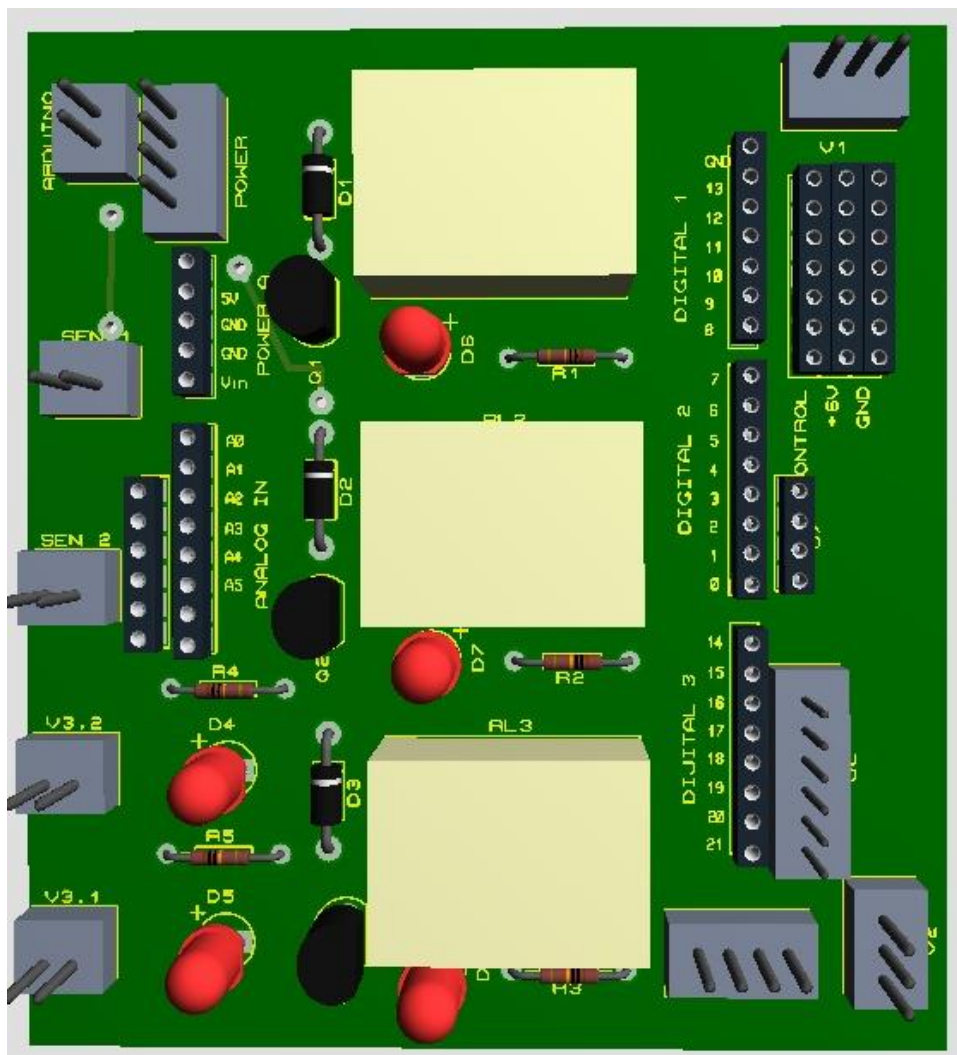
a los que puede entregar la placa principal y se añaden algunos elementos de protección contra subidas de voltaje o corriente.

Se debe tener en cuenta que los elementos electrónicos seleccionados tienen diferentes voltajes y corrientes de funcionamiento por lo que la fuente debe suministrar estos voltajes y corrientes.



**Figura 38. Diagrama del circuito electrónico**

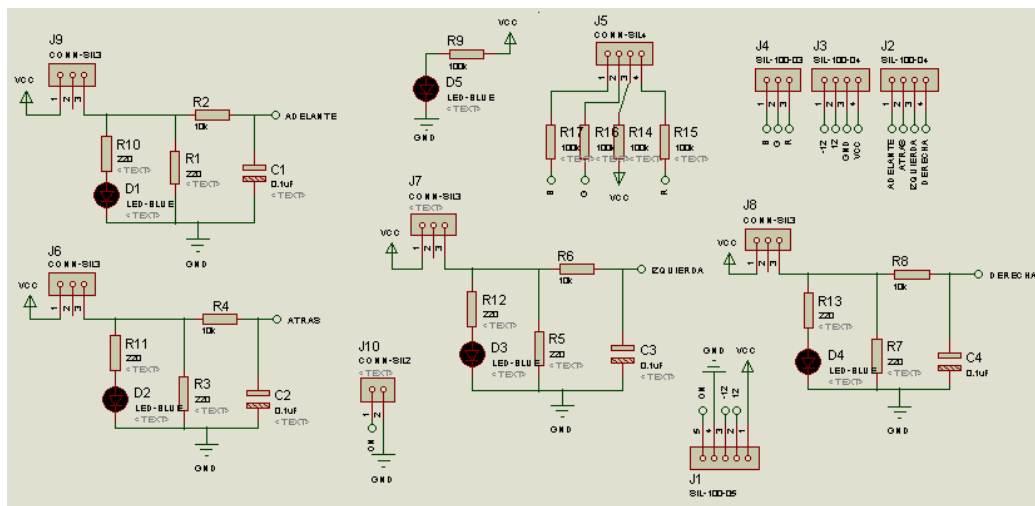
La figura 38 muestra el diseño de la placa auxiliar donde se puede ver claramente los componentes como relés y los pines de conexión de los demás componentes y de alimentación de los mismos así como también luces led indicadoras que servirán para comunicar al usuario el correcto funcionamiento de los componentes vinculados a este circuito .



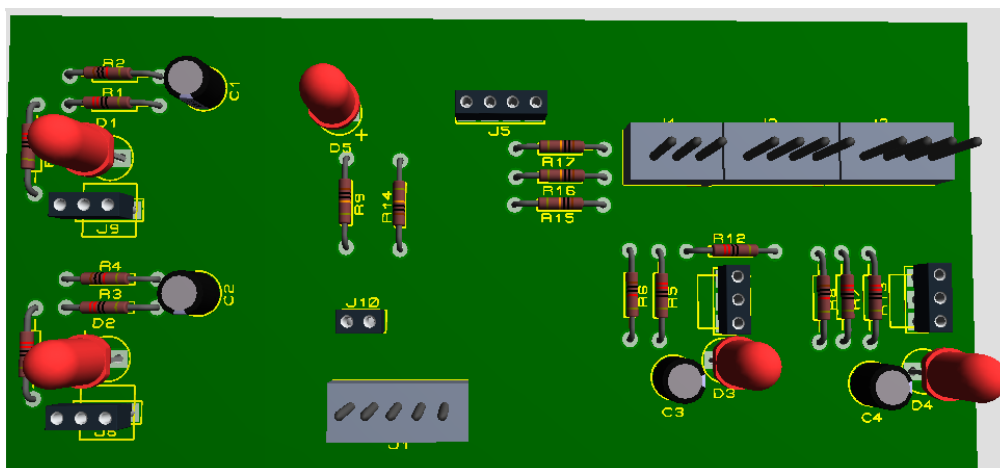
**Figura 39. Diseño de la Placa auxiliar**

### 3.6.5 Diseño del sistema de mando

Debido a que el robot va a ser operado a distancia se diseña también un circuito en una placa que se denomina de control el cual está a una distancia de 4 metros del robot y cuenta con un switch de 2 posiciones, encendido y apagado y 4 pulsadores que envían señales hasta la placa principal Arduino para realizar los 4 diferentes movimientos que serán programados en el robot, indicadores leds de encendido y de aviso cuando se encienden con ciertas condiciones programadas.

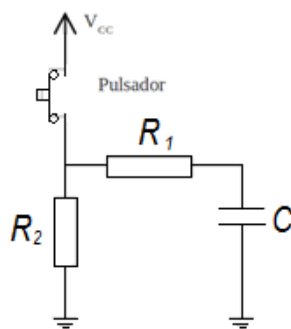


**Figura 40. Diagrama eléctrico del circuito de mando**



**Figura 41. Diseño de la placa de mando**

Existen básicamente dos tipos de conexiones para los pulsadores, el que siempre está en High o en uno lógico (5 V), y el que siempre está en LOW o cero lógico (0 V), al presionar el pulsador en cualquiera de las dos configuraciones la señal cambia de HIGH a LOW y viceversa. Es importante evitar el rebote cada vez que se active el pulsador ya que podría enviar más de un pulso a las entradas del controlador ARDUINO, por eso se emplea para cada pulsador un circuito de protección anti rebote.



**Figura 42. Diagrama de circuito anti rebote para pulsadores**

Un total de 4 pulsadores son utilizados para enviar un nivel lógico al presionarlos, dando una señal de entrada a la placa Arduino para ejecutar y dar las ordenes al robot de moverse hacia delante, atrás, izquierda y derecha.

### 3.7 INSTRUMENTACIÓN

En cuanto a la instrumentación se tiene pensado el uso de 3 tipos de sensores que servirán para obtener información del robot como del medio, poder procesarla y permitirán que cumpla su tarea con mayor precisión.

#### 3.7.2 Uso del Sensor Magnético

Este sensor sirve como un sensor interno que entrega información sobre la posición de los cilindros, se ubican en el inicio y en el final de los mismos. En base a la lectura de estos sensores se realiza la programación y la activación de los mismos sirven de condiciones para seguir ejecutando los comandos preestablecidos.

#### 3.7.3 Uso del Sensor de Presión



Es importante tanto para la seguridad del robot como para su correcto funcionamiento, que el vacío se realice correctamente en las ventosas que están en contacto con la superficie, ya que si una de estas no genera vacío reduce el poder de succión a las otras que están conectadas al mismo generador, de esta forma se evita que el robot caiga pudiendo dañarse seriamente.

Es por esto que se propone implementar un sensor de presión diferencial, ya que este mide la presión de una entrada con respecto a la otra, es ideal para detectar si el vacío se realizó correctamente en un circuito de ventosas antes de elevar las patas donde se encuentra el otro circuito en el cual se mantiene apoyado el robot, evitando su caída.

Para Satisfacer lo requerido se decide usar un sensor diferencial de presión, así solo se usará un sensor para obtener datos de los dos circuitos de ventosas, tanto internas como externas. EL sensor seleccionado es el MPX10dp con las siguientes características.

**Tabla 11**

**Características del sensor de presión diferencial**

<b>Características del Sensor MPX10dp</b>	
Tipo de presión a medir	Diferencial
Voltaje de alimentación recomendado	3 V
Voltaje máximo de alimentación	6 V
Corriente de funcionamiento	6 mA
Sensibilidad	3.5 mV/KPa
Presión máxima	100 KPa
Lineal	Si

### 3.7.4 Uso del Sensor Ultrasónico

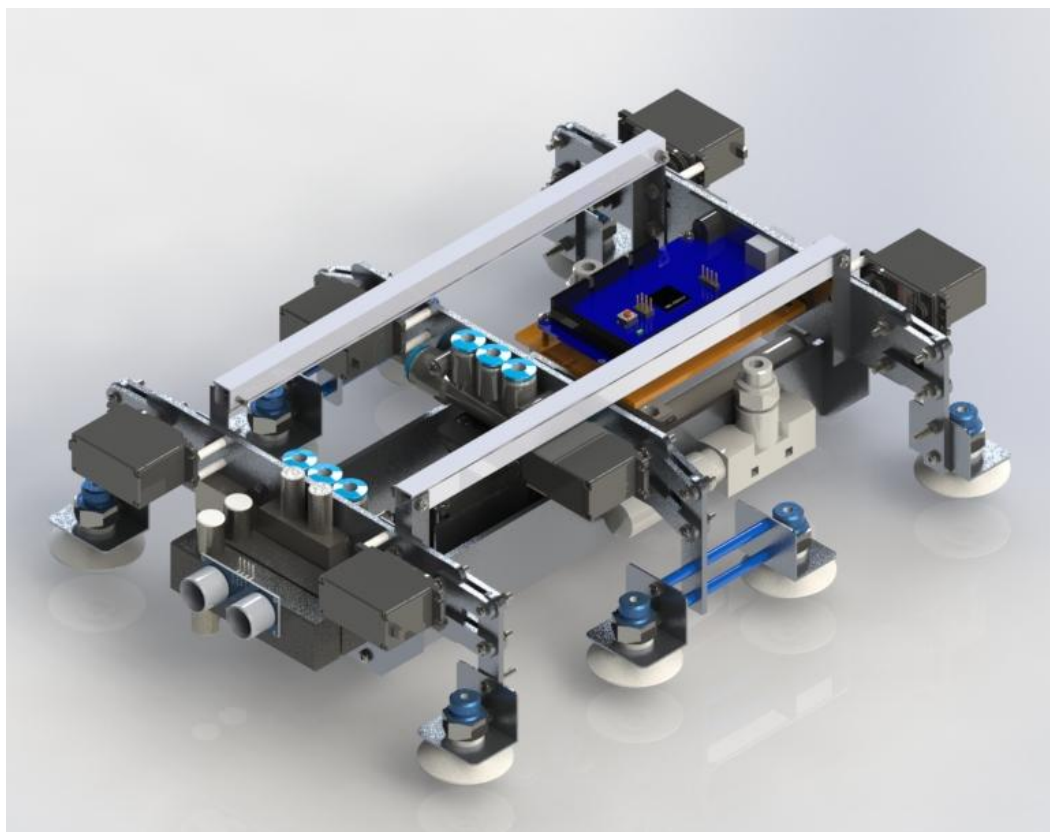
El uso de este sensor sirve para que el robot tome información del medio donde se está desplazando, por lo que se considera un sensor externo. Éste sensor se ubicará en la parte delantera del robot y se programará de tal manera que al detectar un objeto dentro de un rango definido, se ejecuten líneas de programación para evitar colisionar con el mismo, impidiendo que se causen daños en el hardware del robot.

El sensor seleccionado es el hc-sr04, contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición. Su uso es tan sencillo como enviar el pulso de arranque y medir la anchura del pulso de retorno. De muy pequeño tamaño, el HC-SR04 se destaca por su bajo consumo, gran precisión y bajo precio.

**Tabla 12**

#### **Características del sensor ultrasónico**

<b>Características del Sensor HC-SR04</b>	
Dimensiones del circuito	43 x 20 x 17 mm
Tensión de alimentación	5 Vcc
Angulo de medición	15 grados
Frecuencia de trabajo	40 KHz
Rango máximo:	450 cm
Rango mínimo	1.7 cm



**Figura 43. Modelo CAD final del robot**

## **CAPITULO IV**

### **4. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL ROBOT**

Todas las piezas previamente seleccionadas deben ser construidas y ensambladas en un orden definido de tal manera, que todo el conjunto tanto del sistema mecánico como neumático y electrónico funcionen como un todo.

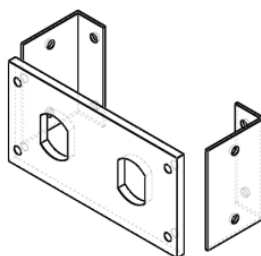
#### **CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO BASE Y ARTICULACIONES**

Una vez establecido el diseño y material de las partes que conforman el robot, se debe iniciar su fabricación paso a paso con cada acción determinada en los diagramas de procesos de todas las piezas que se utilizaran (Ver ANEXO ). Es importante mencionar que los elementos como se muestran en el prototipo pueden variar un poco a medida que se construyen, para mejorar y ampliar sus aplicaciones o corregir problemas imprevistos en el diseño.

##### **4.1 ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA**

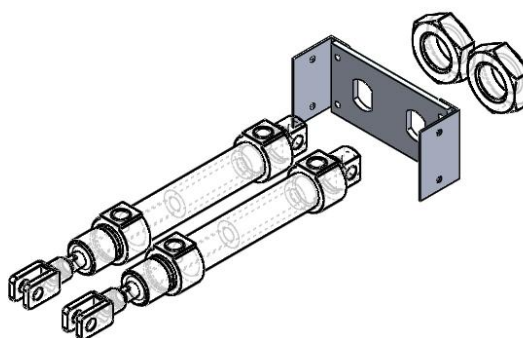
Con todas las piezas y elementos disponibles se procede a ensamblar la estructura.

En primer lugar se empieza armando un marco base uniendo los perfiles de cuadro con la platina de la parte de atrás.



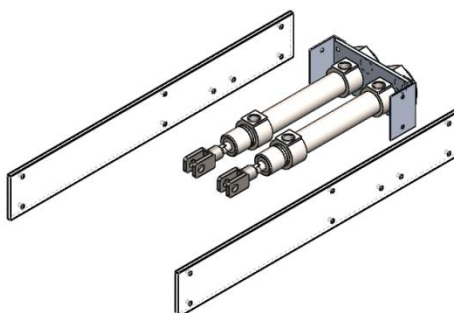
**Figura 44. Unión de perfil de cuadro y platina**

Después, con las primeras 2 piezas ensambladas, se procede al montaje y colocación de los cilindros, aunque estos sean elementos neumáticos es mucho más fácil colocarlos en este punto ya que toda la estructura mecánica se arma alrededor de ellos. Se Conectan los cilindros en los espacios correspondientes asegurándolos con las tuercas de acero UNF 16 – 1.50.



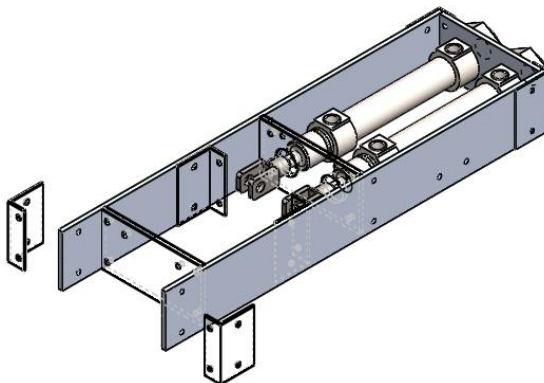
**Figura 45. Ensamble de cilindros a la estructura**

Una vez asegurados los cilindros, todo lo ensamblado anteriormente se une con las piezas laterales principales colocándolas hacia el interior



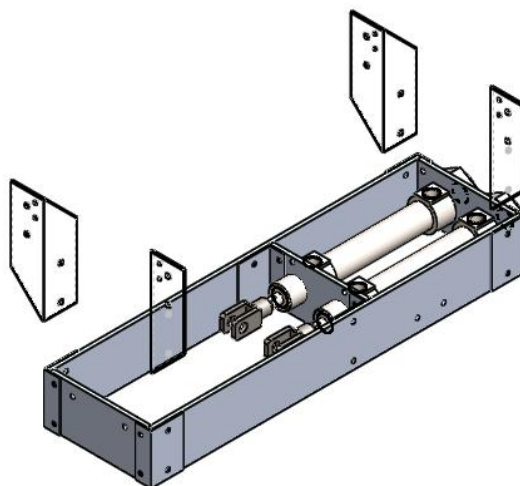
**Figura 46. Ensamble de piezas laterales del cuerpo de la estructura**

A continuación se colocan los perfiles restantes del cuadro base en el medio y en los extremos faltantes de la estructura para reforzarla.



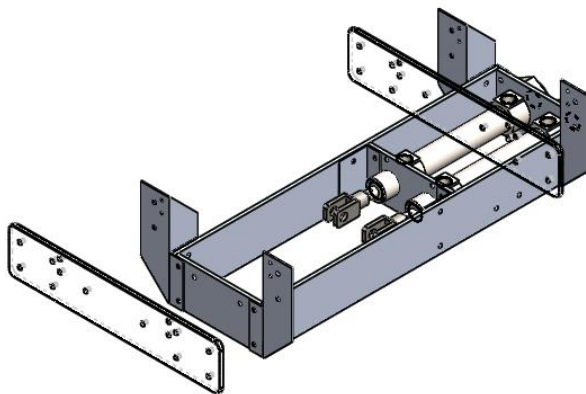
**Figura 47. Colocación de perfiles restantes del cuadro base de la estructura**

Luego, se ensamblan los 4 perfiles de refuerzo cerca de cada ángulo del cuadro base como se muestra en la figura, estos a más de reforzar la estructura también servirán de soporte para las placas principales anterior y posterior.



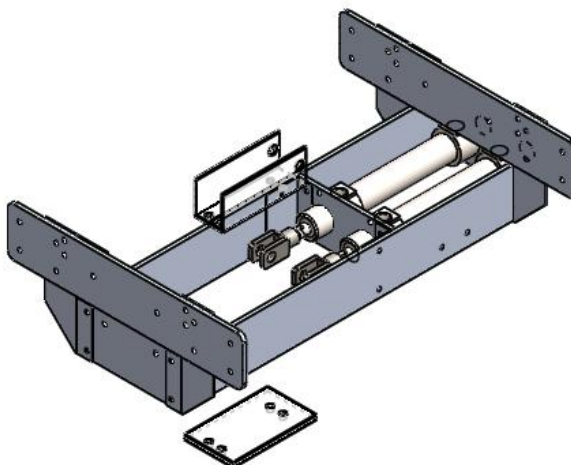
**Figura 48. Ensamble de refuerzos angulares**

Sobre las piezas de refuerzo se procede a colocar las 2 placas principales, en el frente y detrás respectivamente.



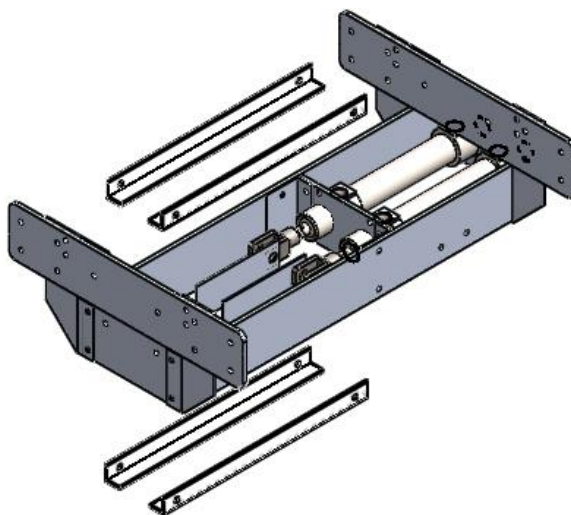
**Figura 49. Ensamble de placas principales en la estructura del robot**

Como siguiente, unir la pieza base de servo de giro con las piezas, perfil servo 1 y perfil servo 2 para formar el espacio en el que se colocara el servomotor de giro, este cuadro se une a las horquillas de los 2 cilindros, como se muestra en la figura.



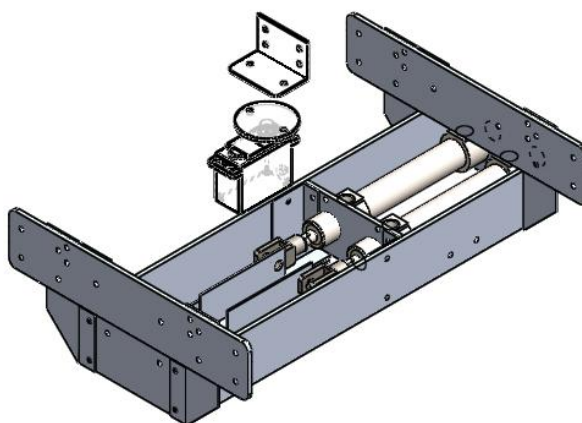
**Figura 50. Unión de soporte de servomotor de giro con la estructura**

Una vez armado el soporte para el motor de giro, el cual va a ser desplazado en un eje gracias al movimiento de los émbolos de los cilindros, se procede a colocar los perfiles guía, asegurándose de colocar un par sobre la pieza base de servo y otro par bajo la misma, creando un canal por el cual se desplaza el soporte del servomotor.



**Figura 51. Ensamble de guías para el movimiento del carro**

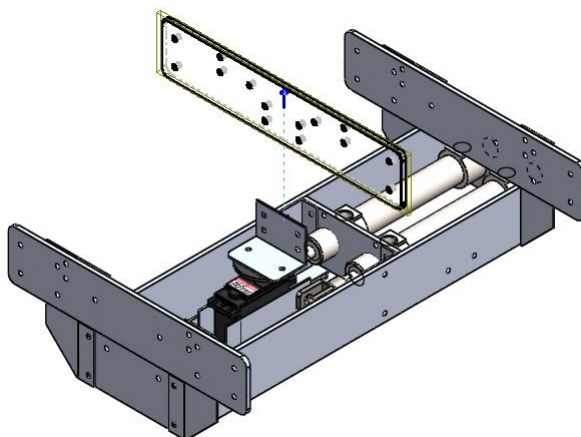
A continuación se debe ya ensamblar la parte de la estructura que es la encargada del giro del robot y dentro de la misma se encuentra el servomotor de giro, el que será fijado con el ángulo principal para el giro antes de montarlos sobre la estructura.



**Figura 52. Ensamble de ángulo principal de giro con servomotor**

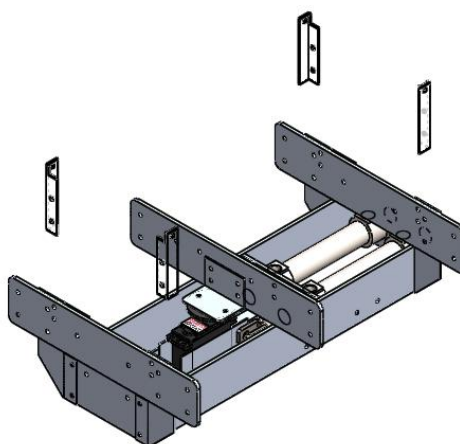
Al ángulo principal de giro unido al servomotor anteriormente se le coloca la placa principal para el giro, como se muestra en la figura.





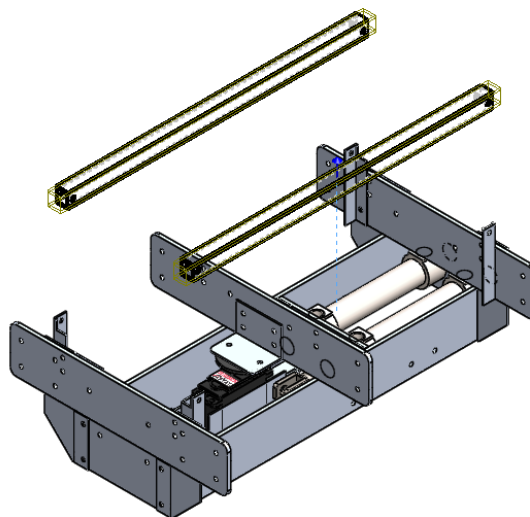
**Figura 53. Ensamble placa principal de giro en la estructura del robot**

Concluido el ensamblaje de la parte que va a realizar le giro del robot, se continúa colocando las cuatro piezas de soporte para las guías superiores.



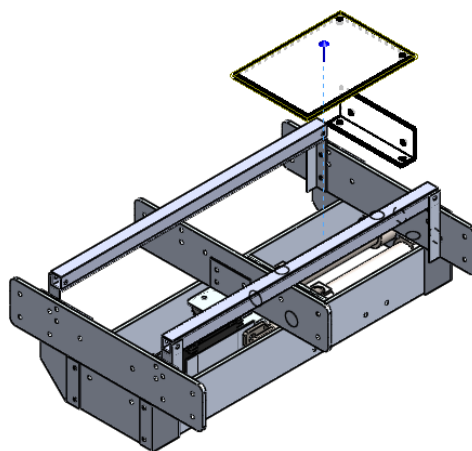
**Figura 54. Colocación de soportes para guías superiores**

En las piezas de soporte colocadas en el paso anterior se colocan los perfiles correspondientes a las guías superiores, los cuales van a impedir que el perfil de giro se mueva de una forma prismática no deseada.



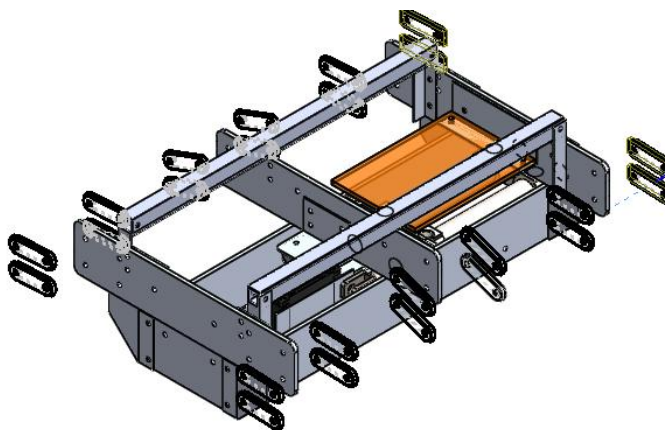
**Figura 55. Ensamble de guías superiores**

Al colocar las guías superiores se puede decir que se concluyó con la parte del cuerpo del robot, solo queda colocar la pieza de acrílico con su respectivo perfil que une a la estructura, que es en donde estarán colocadas las placas electrónicas del robot.



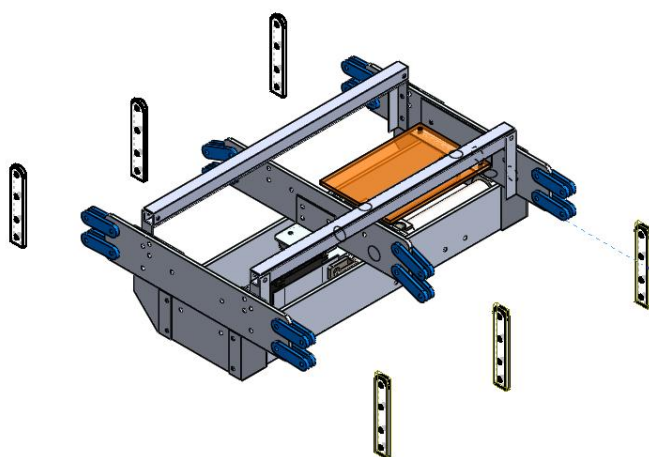
**Figura 56. Ensamble de soporte para placas y perfil**

Terminado el ensamblaje del cuerpo del robot se procede al ensamblaje de las patas comenzando por colocar las 24 piezas de acrílico, que unen el cuerpo con las patas.



**Figura 57. Ensamble de eslabones de acrílico al cuerpo del robot**

En medio de cada par de piezas de acrílico se colocan las seis patas del robot y se aseguran con tornillos y tuercas sin ajustar demasiado, permitiendo así el movimiento de las mismas.



**Figura 58. Colocación de las seis patas del robot**

Antes de concluir el armado de las patas primero se deben colocar los elementos neumáticos de sujeción a los perfiles de ventosas y de esa forma se concluirá con el armado de la parte de la estructura mecánica del robot.

## 4.2 ENSAMBLE DE ELEMENTOS NEUMÁTICOS

### 4.2.1 Ensamble de Cilindros Neumáticos

Estos elementos son los primeros que deben ser ensamblados en cuanto a partes neumáticas en la estructura por la posición en donde se decidió colocarlos, la dificultad para ensamblar estos elementos aumenta a medida que se ensamble el resto de partes.

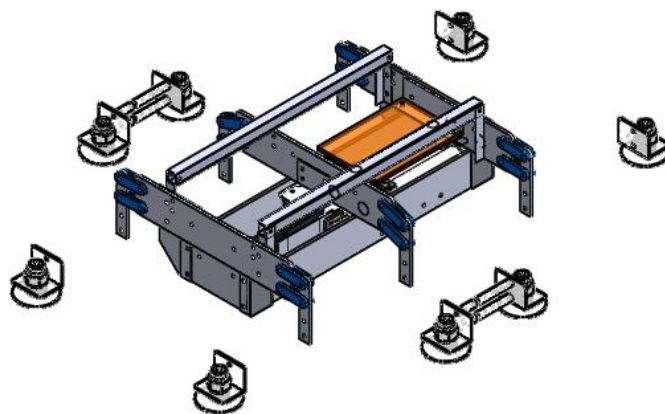
Para el ensamble de los actuadores neumáticos se procede a seguir los siguientes pasos:

- Primero se debe acoplar las horquillas a los cilindros neumáticos, roscando todo el vástago con la horquilla hasta que coincidan las caras.
- Se sujeta los extremos fijos de los cilindros al cuerpo de la estructura con tuercas hasta que queden fijos
- El otro extremo de los cilindros se unen a la base del carro, el cual se desplaza por el centro de la estructura.

Se ensamblaron primero en la sección anterior y se puede apreciar el lugar donde van en la figura 44.

### 4.2.2 Colocación de ventosas de vacío

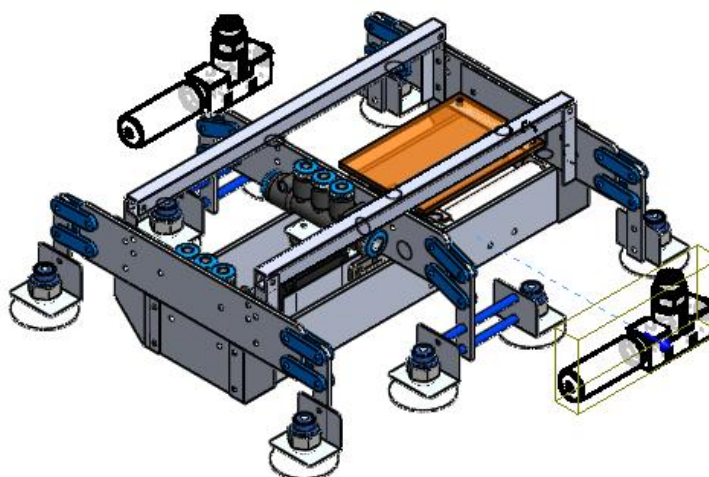
Una vez armadas las seis patas, se procede a ensamblar una ventosa por cada pata externa y dos por cada interna. El lugar donde deben ir las ventosas en todas las patas, es el la pieza denominada ángulo para las ventosas.



**Figura 59. Colocación de ventosas en ángulos para ventosas**

#### 4.2.3 Montaje de generadores de vacío

Según el diseño, los dos generadores de vacío se ubican uno a cada lado de la estructura del robot para mantener la simetría del mismo y equilibrar el peso.



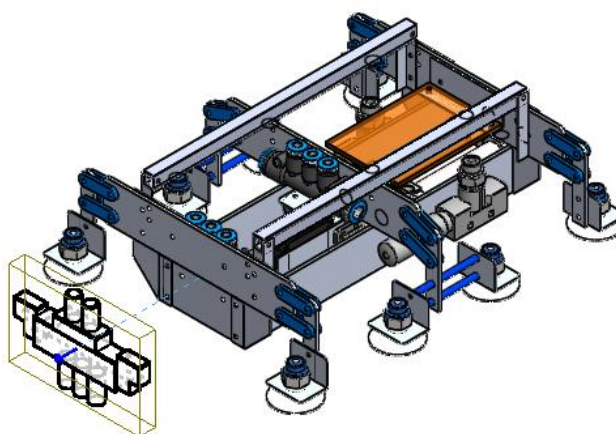
**Figura 60. Montaje de generadores de vacío**

#### 4.2.4 Montaje de Electroválvulas

Antes de montar cada electroválvula se debe colocar y asegurar las conexiones rápidas a las salidas y entradas de cada una de ellas

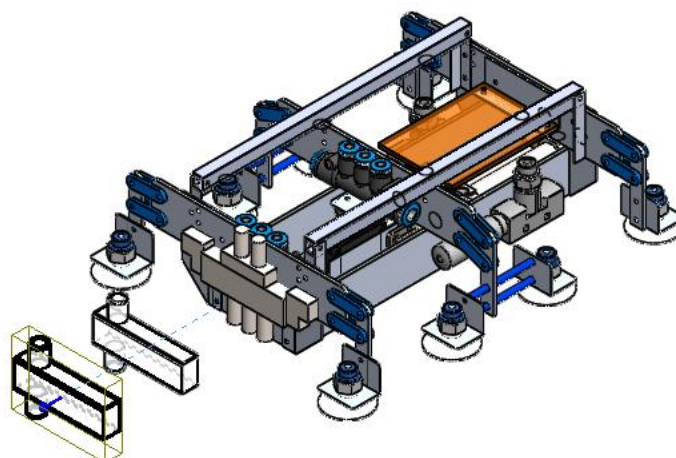
Las 3 electroválvulas por cuestiones de equilibrar el peso del robot se las ha decidido colocar en la parte frontal del robot y se las asegurará con la ayuda de amarras de plástico, teniendo en cuenta el espacio que las mangueras que salen y entran de ellas vana ocupar. Las amarras van a rodear las válvulas y pasar por agujeros realizadas en la estructura del robot específicamente en la pieza frontal.

Primero se coloca la electroválvula 5/2 en la parte delantera del robot por ser la más grande y se la asegura a la placa frontal con amarras.



**Figura 61. Colocación de electroválvulas 5/2**

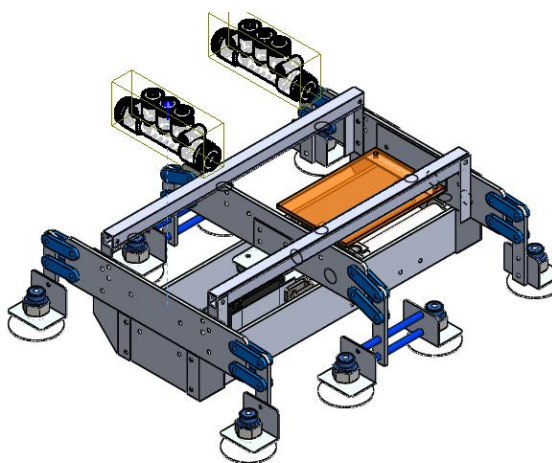
A continuación se procede a colocar las otras dos electroválvulas delante de la electroválvula ya colocada asegurando las 3 con amarras para evitar su movimiento.



**Figura 62. Colocación de electroválvulas 3/2**

#### 4.2.5 Conexiones neumáticas

Finalmente se conectan todos los elementos neumáticos con las mangueras tal como se indica en el diagrama neumático, con la ayuda de pequeñas piezas reductoras de diámetro, distribuidoras y piezas conectoras de tipo T que se pueden sujetar a la estructura en los lugares que se indican en el siguiente gráfico.



**Figura 63. Colocación de distribuidores neumáticos**

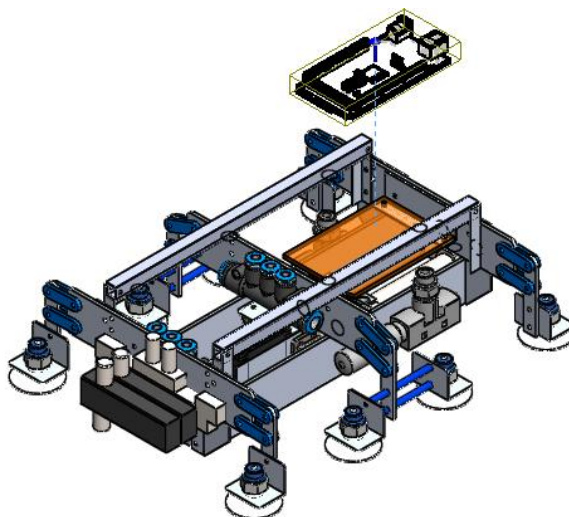
### 4.3 ENSAMBLE DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

Antes de ensamblar los elementos electrónicos en el motor se deben construir las placas tanto auxiliar como la de mando, esto se lo realiza adquiriendo los elementos necesarios los cuales se muestran en el capítulo anterior, en la sección de diseño electrónico

#### 4.3.1 Colocación de la placa Arduino

La placa Arduino se coloca sobre la pieza de acrílico la misma que fue destinada a mantener esta placa, sobre la placa Arduino se colocará la placa auxiliar.





**Figura 64. Colocación de la placa Arduino Mega**

#### 4.3.2 Montaje de servomotores

##### 4.3.2.1 Consideraciones al trabajar con servomotores

Antes de montar los servomotores se debe tener en cuenta ciertas consideraciones para el buen funcionamiento de los mismos y evitar que estos sufran daños totales o parciales.

La conexión a tierra se debe tomar en cuenta, está tiene que ir conectada a la tierra de su fuente de alimentación y también a la tierra del controlador, en este caso a la tierra de la placa Arduino.

Al usar cables demasiado largos para enviar la señal de control a los servomotores, es posible que exista un ruido, esto ocurre porque mientras más largo el cable, es más propenso a ruidos electromagnéticos que pueden provenir incluso de señales de control de otros servomotores cercanos.

Se debe intentar de no cargar demasiado peso a los servomotores del que está en sus características el cual depende del voltaje al que trabaja. Un servomotor en operaciones normales no se debe recalentar, el recalentamiento indica que se lo está exigiendo demasiado y puede

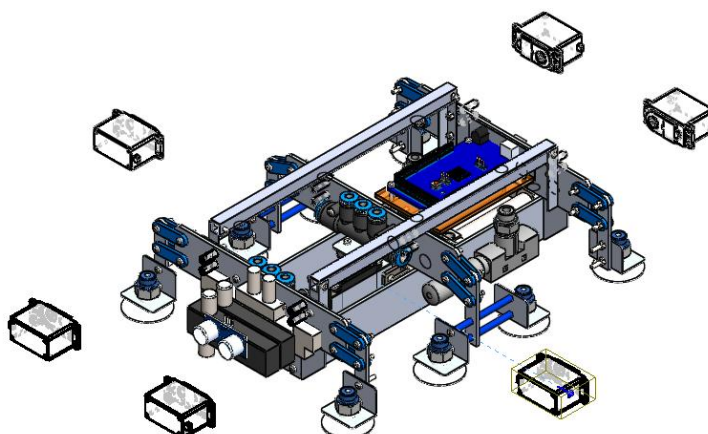


disminuir su vida útil. Hay que recordar que básicamente un servomotor sirve para mover algo y no para cargarlo.

Siempre que sea posible es recomendable usar fuentes de voltaje separadas para los servomotores y para la parte digital, pero manteniendo siempre unidas las tierras de ambas fuentes.

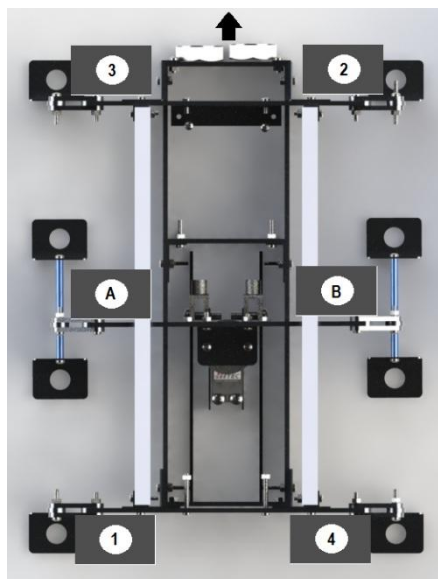
#### 4.3.2.2 Montaje de servomotores

Los seis servomotores restantes, los que tienen que ir en cada pata, se deben colocar como se muestra en la figura y asegurados a la estructura con dos tornillos por cada uno y el eje de los mismos ajustados a un eslabón de acrílico de las patas.



**Figura 65. Colocación de servomotores**

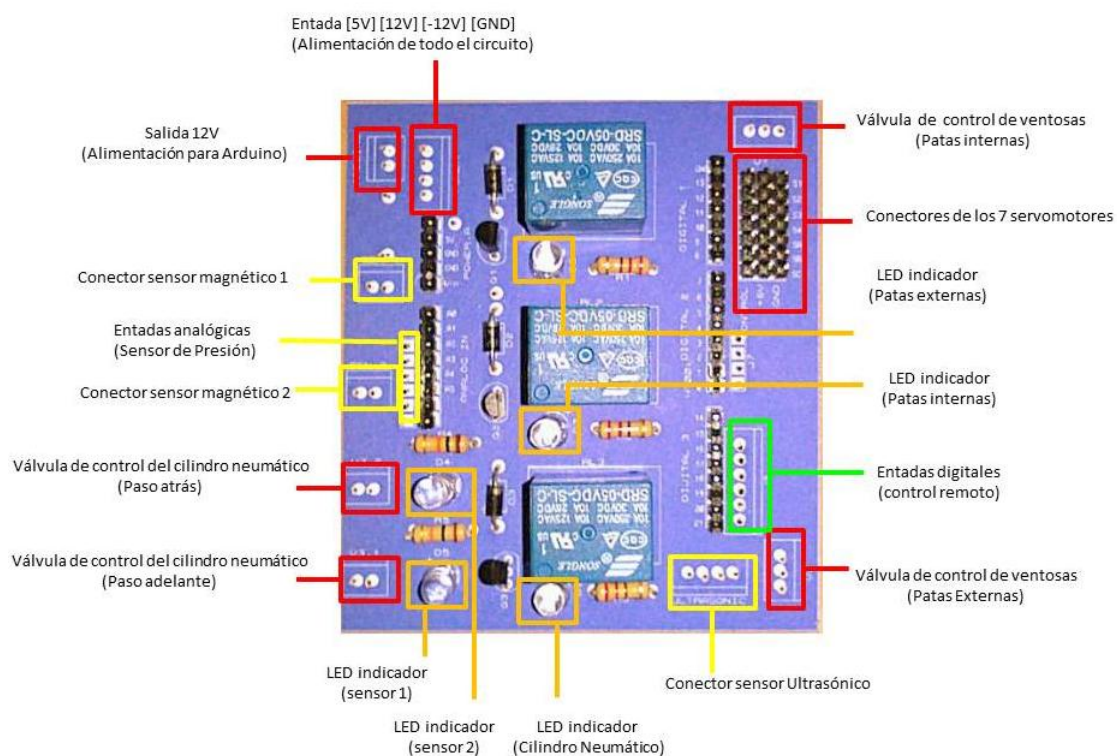
Para facilidad de programación y de montaje se procede a nombrar a cada motor por la posición en donde se encuentran, así los servomotores de las patas externas serán 1,2 ,3 y 4 y los de las patas internas serán A y B como se muestra en la figura.



**Figura 66. Disposición de servomotores**

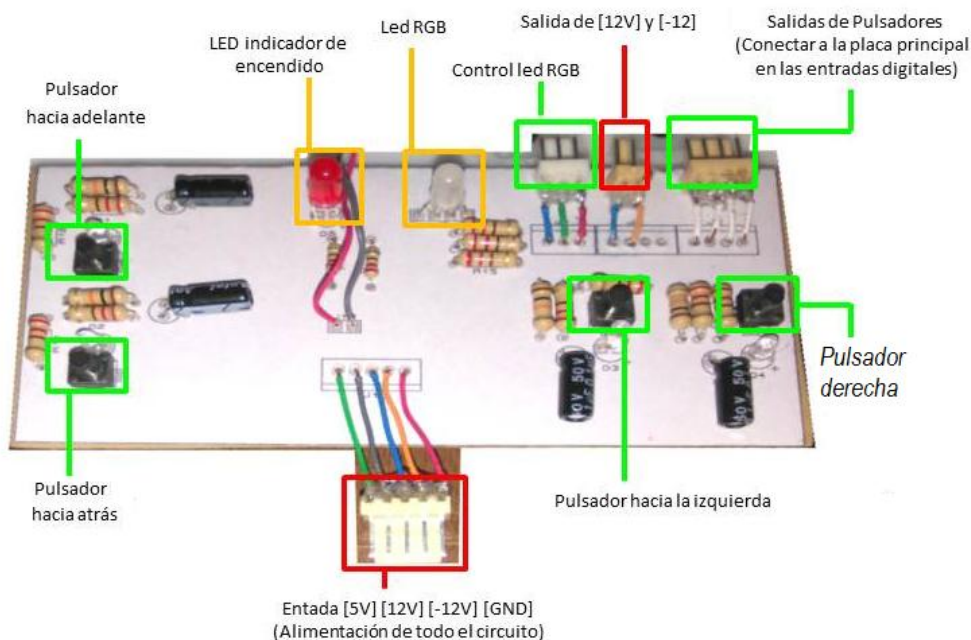
4.3.3 Conexiones eléctricas

Luego de haber montado todos los elementos electrónicos, se deben conectar al microprocesador que se encuentra en la placa Arduino, pero para hacer más fáciles las conexiones estas se realizaran por medio de la placa auxiliar como se muestra en la figura a continuación.



**Figura 67. Conexiones de la placa auxiliar**

De la misma manera se realizan las conexiones de la placa de mando que se encuentra conectada a la placa auxiliar por un cable de cuatro metros y también a la fuente de poder, como se muestra en la figura.

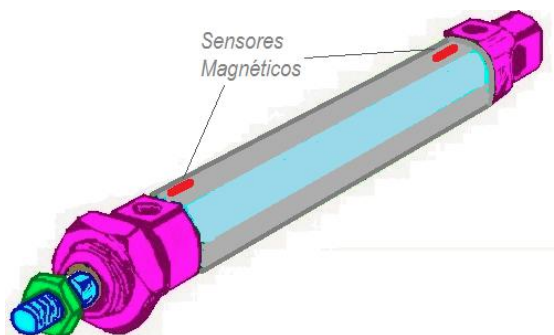


**Figura 68. Conexiones de la placa de mando**

## 4.4 MONTAJE DE SENSORES

### 4.4.1 Montaje de sensores magnéticos

Los sensores se posicionan en el inicio y el final del cilindro para poder detentar la salida total del embolo y su retorno. Debido a su tamaño reducido se los puede simplemente adherir con algún tipo de cinta adhesivo o cinta la cual fije los mismos al lugar que se desea.



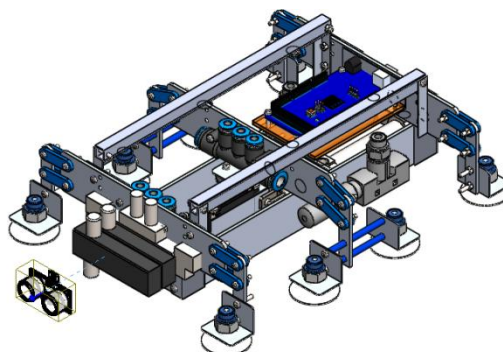
**Figura 69. Ubicación de sensores magnéticos**

Al utilizar dos cilindros se coloca un sensor en cada cilindro, uno al inicio del primero y el otro al final del segundo, consiguiendo así saber el comportamiento de los dos como uno solo.

Como consideración a la hora de utilizar este tipo de sensores es que al ser utilizados como interruptores, se debe evitar la presencia de partes magnéticas en la inmediata proximidad del mismo, excepto de las que estén previstas para ellos.

#### 4.4.2 Montaje de sensor Ultrasónico

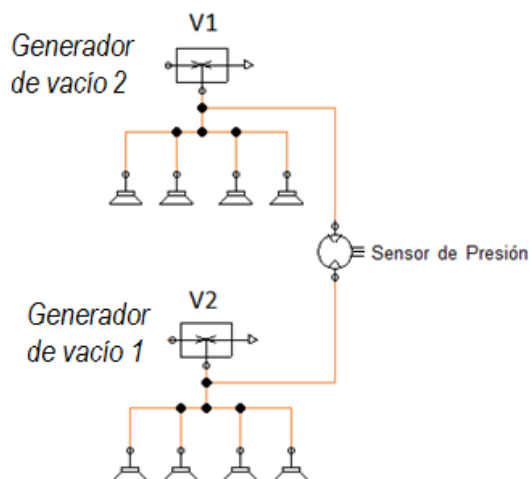
Se ha establecido que el sensor ultrasónico se ubique en la parte frontal del robot, éste no debe estar interferido por ningún otro objeto para que su funcionamiento sea correcto.



**Figura 70. Colocación de sensor ultrasónico**

#### 4.4.3 Montaje de Sensor Diferencial de Presión

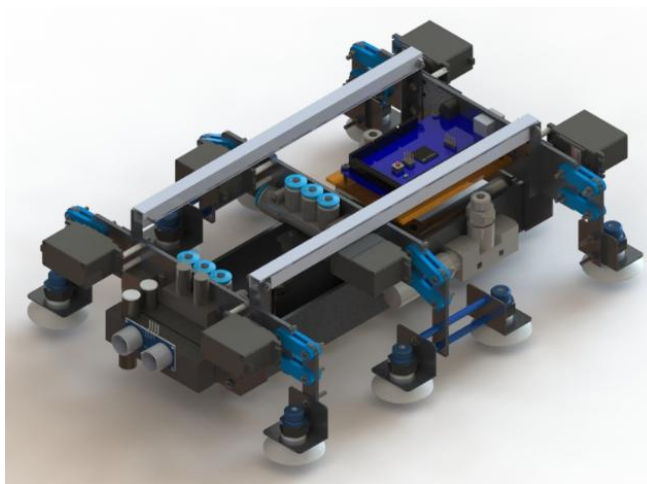
El sensor diferencial debe ir conectado, como el diagrama neumático lo indica, entre la conexión de los generadores de vacío y las piezas distribuidoras de las ventosas, con la ayuda de dos distribuidores de mangueras neumáticas tipo T de 6mm.



**Figura 71. Conexión de sensor de presión**

Verificar que las piezas se encuentren correctamente colocadas, ajustar todos los tornillos y tuercas, para poder colocar las mangueras neumáticas entre los elementos con conexiones rápidas.

Una vez contruidos, montados y conectados todos los elementos del robot, éste estará listo para realizar las pruebas.



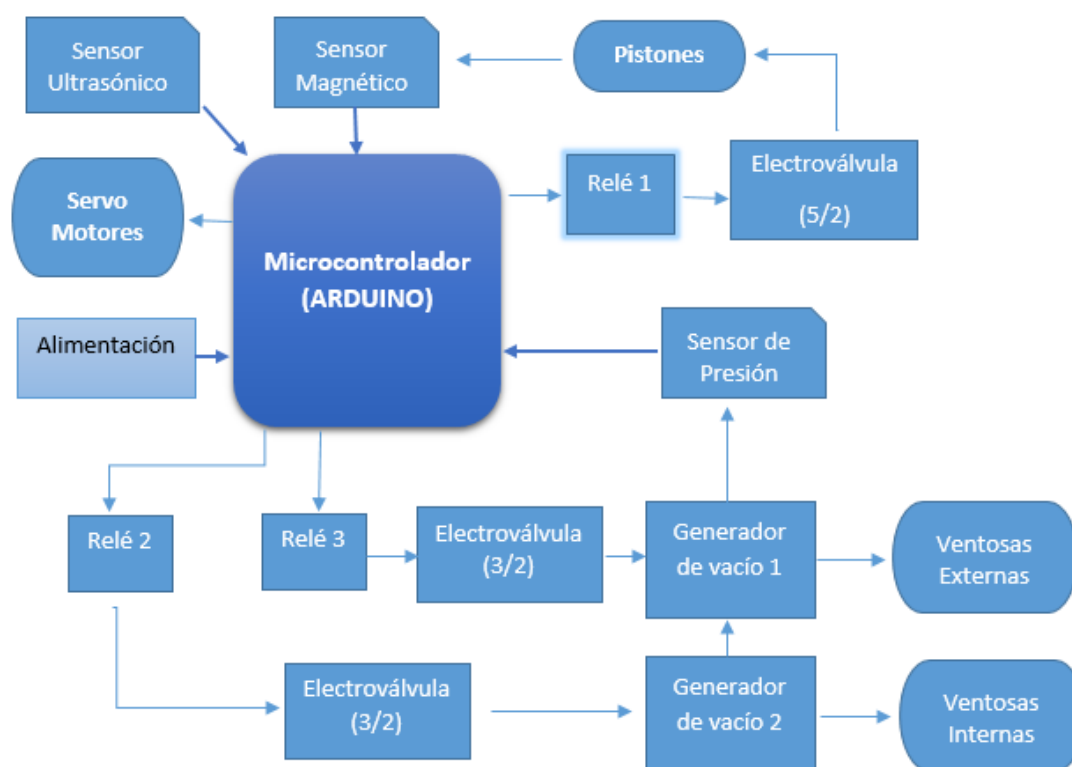
**Figura 72. Robot con todas las partes**

## CAPITULO V

### 5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del robot está prácticamente gobernado por las líneas de código que se programa en la placa Arduino (Ver ANEXO), ya que en las mismas se encuentran las secuencias, condiciones, acciones y comportamientos que el robot debe realizar.

La placa Arduino entonces es la encargada de procesar los datos que vienen de los sensores y enviar señales para activar los actuadores según la programación para cumplir las tareas deseadas. En el siguiente diagrama de bloques se explica de una manera gráfica el control general del robot.



Como se puede ver en el diagrama, la placa Arduino es el cerebro del robot, el que lo hace funcionar de manera coordinada.

## 5.1 Función de los Sensores

Los tres tipos de sensores juegan un papel importante en el funcionamiento del robot ya que se programaron condiciones en base a sus lecturas, las que permiten seguir con la acción o realizar acciones evasivas de seguridad.

### 5.1.1 Función del Sensor de presión diferencial

El sensor de presión diferencial entra en funcionamiento como medida de seguridad siempre que en algún proceso en el cual sea necesario cambiar de punto de apoyo de las patas externas a las internas o viceversa.

Antes de realizar el cambio de apoyos el sensor se asegura que en el nuevo apoyo donde va a estar apoyado el robot esté correctamente sujeto a la pared por la correcta realización del vacío en las cavidades de las ventosas.

En caso de que el vacío no se haya realizado en una o más ventosas del circuito que va a mantener todo el peso del robot, el mismo no va a cambiar de apoyo para evitar caerse y envía una señal luminosa de color rojo al led RGB del mando.

Una vez que el vacío se realice, la condición será superada y el proceso puede seguir normalmente.

### 5.1.2 Función del Sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico ubicado en el frente del robot, sirve para evitar que al dar un paso adelante el robot choque con algún objeto que se encuentre en su camino, de dará lectura de este sensor solamente cuando se esté realizando el paso hacia adelante.

En caso de que un objeto se detecte, el robot realizara todos los movimientos que realizo antes de detectar el objeto de manera regresiva y enviará una señal luminosa de color naranja al led RGB del mando.

### 5.1.3 Función del Sensor magnético

Se usan dos sensores magnéticos con la finalidad de saber la posición de los émbolos de los cilindros, gracias a que estos tienen imanes, el uso de estos sensores presentan ventajas en relación a sensores mecánicos como fines de carrera o electromecánicos.

La activación de estos sensores permite que se continúe con los procesos de paro hacia adelante y paso hacia atrás, ya que es importante que el embolo recorra toda su carrera para que las patas bajen y no se arrastren sobre la superficie pudiendo dañar las patas o las ventosas.

## 5.2 LED RGB

Un led RGB ubicado en el mando es el encargado de dar información al operador sobre lo que está pasando con el robot, este led puede iluminarse con diferentes colores y en la siguiente tabla se muestra lo que cada color significa.



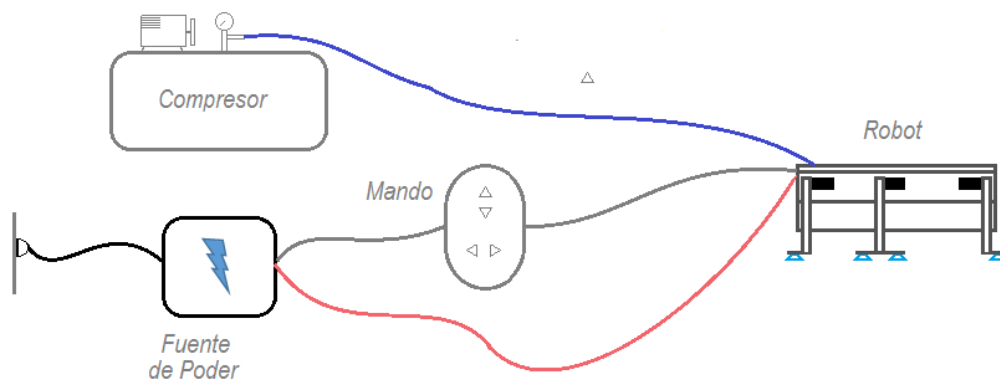
**Tabla 13****Significado de colores en el mando a distancia**

<b>Color</b>	<b>Descripción</b>	<b>Recomendación</b>
Rojo	El vacío no se realizó en alguna de las ventosas en donde se va a apoyar el robot	Revisar visualmente que todas las ventosas estén en contacto con la superficie
Naranja	Al dar el paso adelante existe un objeto con el cual puede chocar el robot	Cambiar de dirección (derecha, izquierda, atrás) o si es posible quitar el objeto
Azul	El robot se encuentra realizando algún proceso	Esperar que cambie de color al luz para presionar un pulsador o dar una orden al robot
Verde	El robot está listo para recibir una de las cuatro señales para realizar el movimiento	

**5.3 CONEXIONES PREVIAS**

Antes de iniciar el funcionamiento del robot se debe comprobar que tanto la fuente eléctrica como la fuente de aire presurizado estén correctamente conectados y en caso del compresor, con la presión de salida establecida en la presión de trabajo (4 bares).

En la siguiente figura se puede ver las conexiones que deben realizarse entre los diferentes componentes que conforman el robot antes de iniciar el funcionamiento del mismo.



**Figura 73. Representación de conexiones previas al funcionamiento del robot**

Solo una vez conectadas todos los componentes que comprenden el robot y su alimentación tanto eléctrica como neumática se puede proceder al encendido del mismo.

## 5.4 INICIALIZACIÓN

Para dar inicio al funcionamiento del robot la válvula de la fuente de aire debe estar abierta, es decir debe existir presión de aire en las mangueras, después se debe simplemente mover el switch del mando a la posición de encendido, lo que alimenta todos los elementos electrónicos incluyendo la placa Arduino lo que la hace inmediatamente enviar órdenes para poner el robot en una posición inicial.

Al mover el switch del control a la posición de encendido, lo primero que va a hacer el robot antes de todo será mover las seis patas a su posición baja e inmediatamente enviar la señal a los relés para activar las válvulas que controla el paso de aire a los dos generadores de vacío, generando succión en las ocho ventosas a la vez. Además el actuador de giro se coloca en la posición de  $60^\circ$  que es la configurada como central.

**Tabla 14****Posición del robot al encenderlo**

<b>Posición Inicial del Robot</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Estado</b>
Servomotores de patas Externas	Posición baja
Servomotores de patas internas	Posición baja
Ventosas de patas Externas	Con succión
Ventosas de patas internas	Con succión
Servomotor de giro	Posición central
Pistones	Contraídos A-
Sensor magnético A-	Activado
Sensor magnético A+	Desactivado

De aquí en adelante cuando se hable de posición inicial se hará referencia a las posiciones y comportamientos de cada elemento descritos en la tabla anterior.

## **5.5 ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS**

Como se estableció previamente, el robot se moverá en dos ejes con un total de cuatro movimientos programados los cuales inicia con la señal de cada uno de los cuatro pulsadores que están en el mando a distancia, estos son adelante o arriba, atrás o abajo, derecha e izquierda. Mientras no se dé ninguna señal de parte del mando, el robot permanecerá en la posición inicial.

Todos los movimientos que se van a describir a continuación parten desde la posición inicial del robot y terminan en la misma.

### 5.5.1 Paso Hacia Adelante

Al presionar el pulsador que inicia este proceso, el robot se va a mover hacia adelante una distancia total de 5 cm y lo realiza siguiendo una serie de movimientos que se describen a continuación.

En el tiempo cero el robot se encuentra en la posición inicial. A continuación en el tiempo 1 antes de iniciar el paso se da la lectura del sensor de presión, la cual debe indicar que el vacío en las ventosas externas debe haberse realizado satisfactoriamente ya que estas son las que van a soportar a todo el robot, en caso de que el sensor detecte que el vacío no fue realizado el led RGB del control mostrará una luz de color rojo y no se realizará el paso. Después se corta el flujo de aire que alimenta el generador de vacío de las ventosas internas y los servomotores de las patas externas pasan a la posición alta.

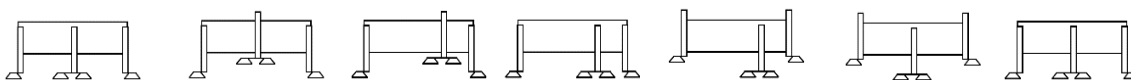
En el tiempo 2, el relé que controla la electroválvula 5/2 se activa y permite que el embolo se desplace hacia adelante, en este mismo momento se procede a leer el sensor ultrasónico y realiza su trabajo de evitar colisiones regresando los movimientos realizados y enviando una señal al mando de color naranja.

En el tiempo 3, el pistón está en la posición externa y la activación del sensor A+ permite que el proceso continúe, las patas internas bajan y el flujo del aire del generador de vacío interno se activa.

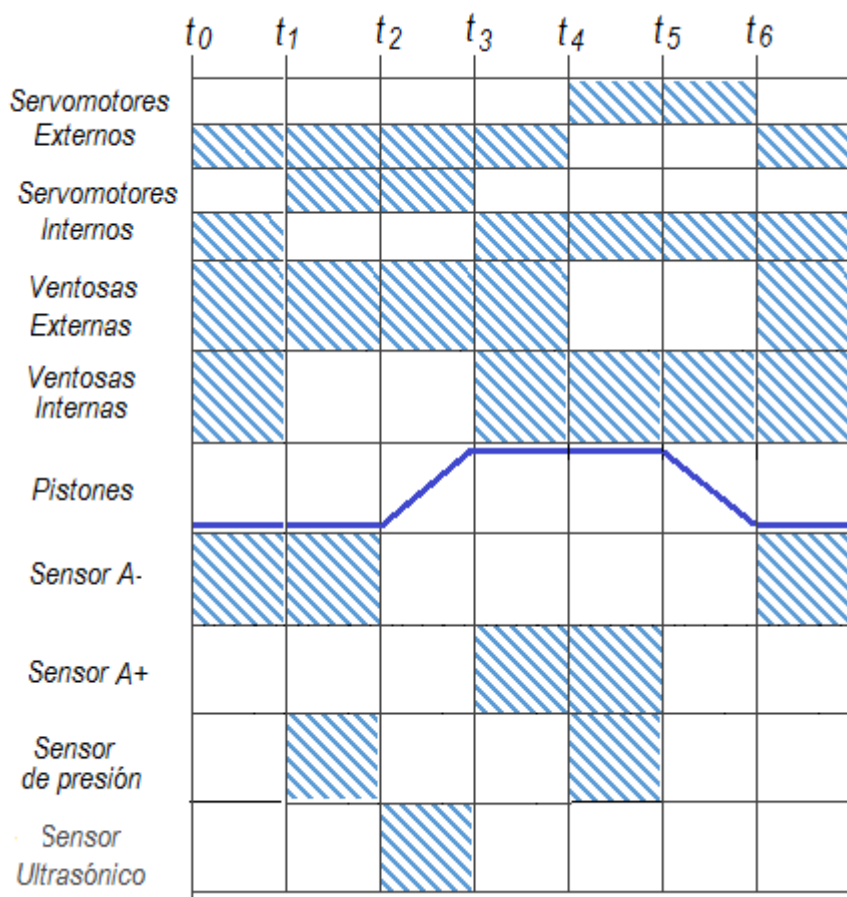
Para el tiempo 4, se vuelve a leer los datos del sensor de vacío que es condición para cambiar de apoyo, en este caso deberá existir vacío en las patas internas antes de continuar caso contrario la señal de alerta del led RGB será enviada. Las patas externas pierden la succión de cada una de sus ventosas y suben con la ayuda de los servomotores.

En el tiempo 5 el embolo del pistón ingresa al cilindro, cuando el sensor magnético A- es activado, todo el robot vuelve a su posición inicial, bajando todas las patas y activando ambos generadores.

Todo el proceso descrito se puede resumir en el siguiente diagrama de estado, cabe recalcar que durante todo este proceso el motor de giro no se mueve de su posición central.



**Figura 74. Representación paso adelante**



**Figura 75. Diagrama de estado paso adelante**

5.5.2 Paso Hacia Atrás

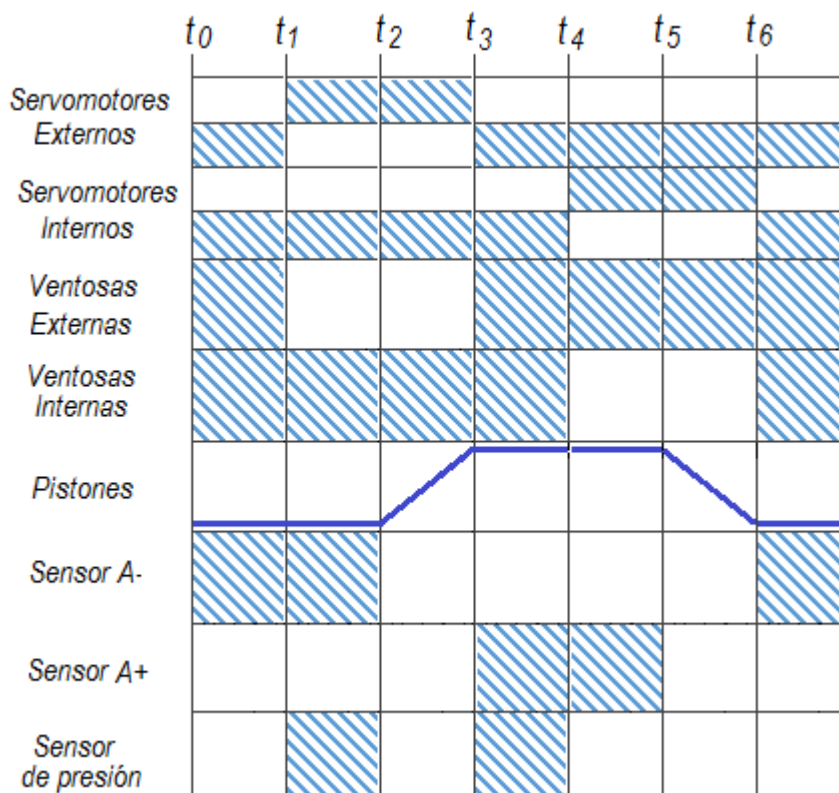
Para el paso atrás el robot inicia el proceso cortando el flujo de aire al generador de vacío de las patas externas y los servomotores de estas cuatro

patas hacen que las mismas se eleven, siempre que la condición del sensor de presión de tener vacío de las ventosas internas se haya cumplido.

Después con las patas internas adheridas a la superficie, la electroválvula 5/2 activa el pistón para que el embolo se desplace, al llegar a la posición final el sensor magnético se activa y las patas externas descenden activando la succión en el generador.

Antes de elevar y quitar la succión de las patas internas se debe cumplir la condición del sensor de presión y el pistón regresa a su posición inicial, al activarse el sensor magnético que indica que el embolo está completamente dentro del cilindro todo el robot vuelve a su estado inicial.

En este paso el servomotor de giro permanece en la posición central, se puede ver el estado de los elementos en el siguiente diagrama.



**Figura 76. Diagrama de estado paso hacia atrás**

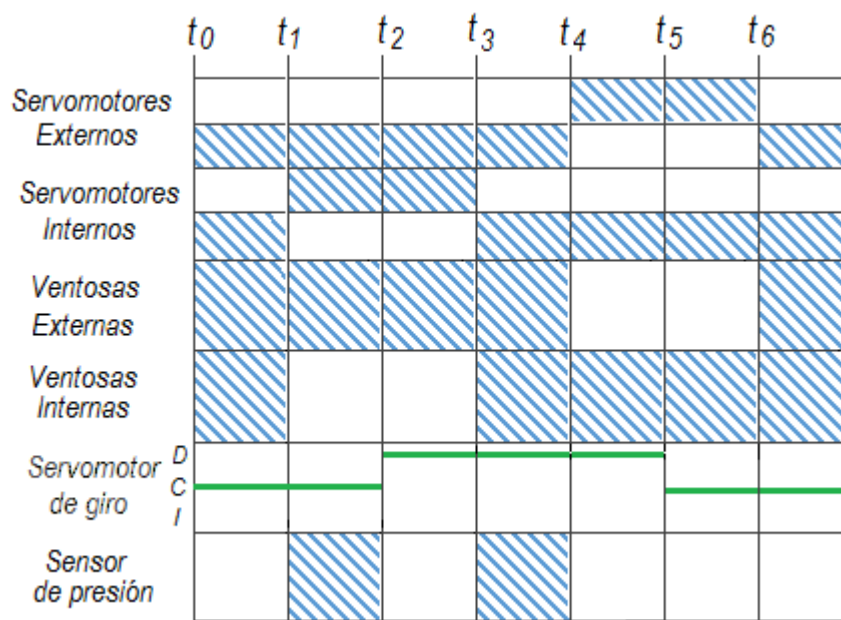
### 5.5.3 Giro Hacia la Derecha

Para realizar el movimiento de cambio de dirección, se debe girar toda la estructura un ángulo de  $20^\circ$  gracias al servomotor que controla el giro.

Al presionar el botón de giro hacia la derecha el robot quita el flujo del generador de las ventosas internas y eleva las dos patas internas, todo esto sucedido por la condición del sensor de presión que no permitirá elevar las patas si es que no hay vacío en las que se quedan en la superficie.

Para un tiempo 2 el servomotor de giro, gira  $20^\circ$  hacia la derecha, después para un tiempo 3 las patas internas descienden y se activa la succión en las mismas.

En el tiempo 4 se elevan las patas exteriores pero antes cumpliéndose la condición del sensor de presión, para que en el tiempo 5 el motor de giro vuelva a la posición central y finalmente todo el robot vuelva a la posición inicial.



**Figura 77. Diagrama de estado giro a la derecha**

Durante este movimiento los pistones permanecen en su posición inicial y por lo tanto el sensor magnético A- activado pero eso no es influyente en este caso.

#### 5.5.4 Giro Hacia la Izquierda

El giro hacia la izquierda inicia al presionar el botón que representa esta acción en el mando a distancia, la secuencia de movimientos y acciones a realizar para lograr este giro es igual que la de giro a la derecha con la diferencia que el motor de giro va a girar en sentido contrario los mismos  $20^\circ$ . Se explica este movimiento en el siguiente diagrama de estado.

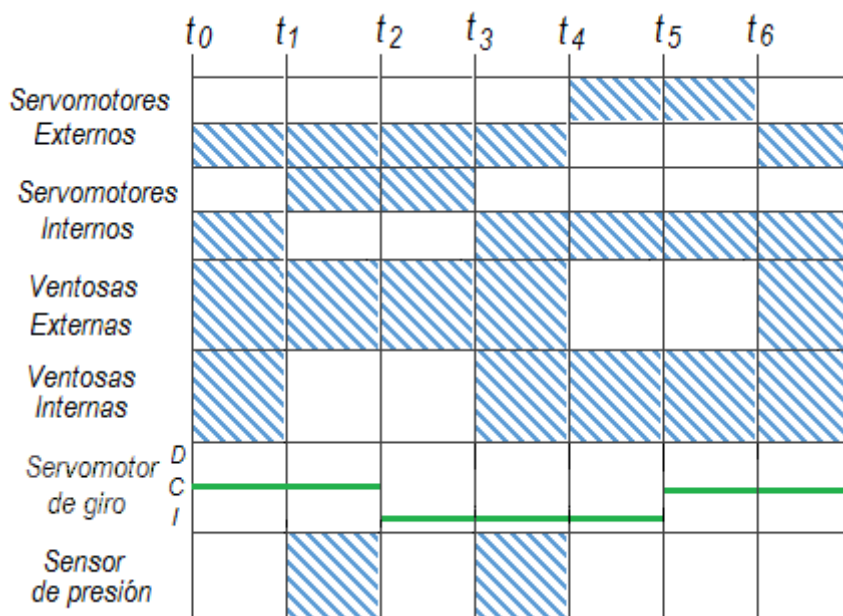


Figura 78. Diagrama de estado giro hacia la izquierda



## CAPITULO VI

### 6. CALIBRACIÓN Y PRUEBAS

#### 6.1 CALIBRACIÓN DE SERVOMOTORES

Gracias a las librerías de Arduino, basta ingresar la posición que se quiere que alcance el servomotor y esta se encarga de mover hasta la posición deseada.

Esto ayuda mucho para el servomotor de giro que fue programado como centro  $60^{\circ}$  y  $20^{\circ}$  para cada lado al girar esto es  $40^{\circ}$  y  $80^{\circ}$  serán las posiciones para dar el giro

En cuanto a los motores de las patas, debido a su colocación algunos inician en  $0^{\circ}$  y otros en la posición final, que se debe establecer por alturas de las patas ya que todas deben estar a la misma altura para que las ventosas estén en contacto con la superficie.

Es incorrecto pensar que, para que todas las patas alcancen la misma altura y bajen al mismo nivel, los valores de programación deben ser los mismos, por la posición y características de cada pata cada uno debe ser calibrado y nivelado.

#### 6.2 CALIBRACIÓN DE SENSORES

Cada sensor entrega una señal distinta, y es importante comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia

##### 6.2.1 Calibración del sensor de presión diferencial

Alimentado con 5 voltios, este sensor entrega un voltaje el cual es diferencial entre las dos presiones de sus entradas, al tener la misma presión en ambas entradas.

#### Tabla 14

##### Datos de lectura del sensor de presión

Presión de Trabajo 3 Bares				
PIN	Ventosas		Valor entregado	
<b>PIN 5</b>	VEN INT	sin vacío	15	$\pm 5$
		con vacío	39	$\pm 5$
		apagado	5	$\pm 5$
<b>PIN 6</b>	VEN EXT	sin vacío	24	$\pm 5$
		con vacío	63	$\pm 5$
		apagado	0	$\pm 5$

#### 6.2.2 Calibración de sensor Ultrasónico

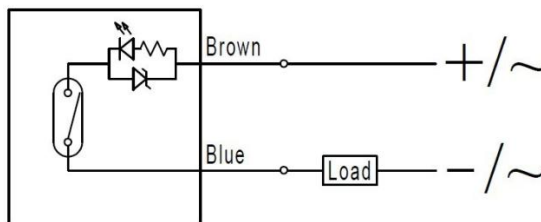
El sensor Ultrasónico se lo utiliza para evitar el choque al momento de dar el paso hacia adelante, debido a eso su rango máximo de medida es de 45 [cm], y se encuentra calibrado para que de la alerta cuando se encuentra un obstáculo a 15 [cm] del robot.

La distancia de medición máxima de 45 [cm] está definida por la librería que el sensor necesita para funcionar con el Arduino, si se requiere una calibración diferente es necesario cambiar esta librería (no se puede realizar la calibración desde el programa)

#### 6.2.3 Calibración de sensor magnético

El sensor magnético funciona como un interruptor al detectar los imanes que se encuentran en los extremos de los cilindros manda una señal de encendido o apagado.

Consta de 2 cables de diferente color (café y azul), indicando la conexión positiva y negativa respectivamente.



**Figura 79. Diagrama interno del sensor magnético**

### 6.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En esta sección se detallan las pruebas realizadas en cada uno de los elementos que componen el robot, así como las pruebas de todo el robot.

#### 6.3.1 Servomotores

Antes del montaje, los siete servomotores se probaron individualmente, conectados a la placa Arduino, con un programa que los mueve tanto en un como en otra dirección gracias a la librería de Arduino <Servo.h> la cual se encarga de generar el ancho de pulso necesario para el movimiento del servomotor y facilita el control de éste al solo ingresar el ángulo final de su movimiento.

Con la ayuda de este programa los siete motores realizaron los movimientos sin ningún problema

#### 6.3.2 Pistones

Antes de instalar los cilindros en el robot se realizan las siguientes pruebas:

- Estanqueidad: presurizar a 6 bares alternativamente ambas cámaras verificando estanqueidad de la cámara presurizada y ausencia de fugas por la boca de la cámara opuesta. Cuando se presurice la cámara delantera verificar además el sellado de la guarnición de vástago.
- Funcionamiento: con aire a baja presión (1 bar) verifique el suave desplazamiento en ambos sentidos del vástago, girando el mismo entre operaciones 90° manualmente.
- Amortiguaciones: cerrando totalmente los registros de amortiguación y presurizando las cámaras alternativa- mente a 6 bares, el vástago debe prácticamente detenerse y completar la parte final de su recorrido lentamente. Verificar estanqueidad por los tornillos de registro.

Para comprobar el correcto montaje y la capacidad de apertura y cierre de los mismos, se conecta el compresor de aire a cada pistón y se regula la entrada de aire, de manera que el pistón se extiende y se comprime.

### 6.3.3 Válvulas

Se comprueba que las válvulas tienen un correcto funcionamiento conectándolas a las fuentes de la alimentación con un voltaje de 12V y 24V, según lo necesitado por cada una, lo que resulta en un cierre de la válvula al recibir el voltaje tal como se esperaba.

### 6.3.4 Pruebas en Ventosas

Se realizaron pruebas con diferentes números de ventosas de 45mm de diámetro, pegándolas a una superficie lisa (Vidrio) a 90°, con una longitud de manguera de 4m y 6mm de diámetro y cargando peso a estas hasta que pierdan el vacío y se despeguen de la superficie y este fue el resultado

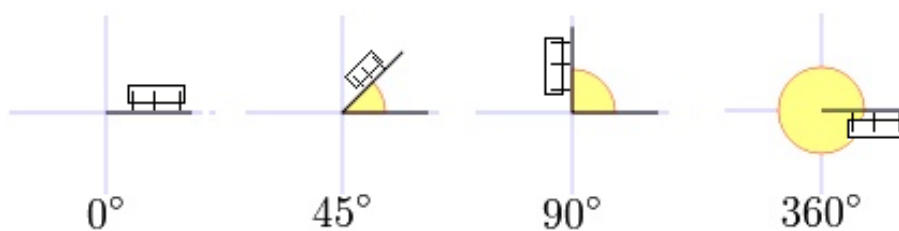
**Tabla 15****Pruebas de funcionamiento a las ventosas individuales**

Numero de Ventosas	Presión de Trabajo que entra al generador[bar]	Deslizamiento	Carga al despegue [kg]
1	1,0	si	0,20
1	2,0	si	0,40
1	3,0	no	0,70
1	4,0	no	0,80
2	1,0	si	0,30
2	2,0	si	0,70
2	3,0	no	1,40
2	4,0	no	1,70
3	1,0	si	0,40
3	2,0	si	1,10
3	3,0	no	2,10
3	4,0	no	2,50
4	1,0	si	0,50
4	2,0	si	1,40
4	3,0	si	2,80
4	4,0	no	4,20

**6.3.5 Pruebas de Sujeción**

Esta prueba es de gran importancia para el funcionamiento del robot, ya que antes de que el robot inicie su funcionamiento, éste debe primero lograr una muy buena adhesión a la superficie.

Las Pruebas de sujeción se realizaron sobre dos tipos de superficie, con los dos generadores de vacío funcionando y las ocho ventosas sobre la superficie a diferentes ángulos de inclinación, con una presión de trabajo de cuatro bares y los resultados fueron los siguientes



**Figura 80. Ángulos utilizados para las pruebas de sujeción**

**Tabla 16**

**Resultados de pruebas de sujeción del robot**

<b>Pruebas de sujeción</b>		
<b>Superficie</b>	<b>Inclinación</b>	<b>Resultado</b>
Madera	0°	Sujeción sin deslizamiento
	45°	Sujeción sin deslizamiento
	90°	Sujeción sin deslizamiento
	360°	Sujeción sin deslizamiento
Vidrio	0°	Sujeción sin deslizamiento
	45°	Sujeción sin deslizamiento
	90°	Sujeción sin deslizamiento
	360°	Sujeción sin deslizamiento

Analizando los resultados obtenidos, podemos decir que el robot no tiene problemas en cuanto a sujeción, ya que esta es buena incluso a 360° (sobre cabeza). Esto indica que las ocho ventosas, como se calculó en el capítulo tres, son capaces de soportar todo el peso del robot y la presión de trabajo es suficiente para generar el vacío por medio de los generadores sin problemas.

### 6.3.6 Pruebas de Desplazamiento

Después de comprobar la sujeción en diferentes ángulos y superficies se procede con las pruebas de desplazamiento, ya que el robot no se podrá mover si primero no se encuentra sujeto a la superficie.

Se realizó esta prueba básicamente en dos superficies, que son las mismas sobre las que se hizo las de sujeción, con una presión de salida del compresor de 4 bares y se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 17**

#### Resultados de pruebas de movimiento del robot

<b>Pruebas de Movimiento</b>		
<b>Superficie</b>	<b>Inclinación</b>	<b>Resultado</b>
Madera	0°	Realiza movimientos con normalidad
	45°	Realiza movimientos con normalidad
	70°	Realiza movimientos con normalidad
	90	En las acciones de paso hacia adelante al cambiar de apoyo existe un pequeño resbalón, pero no es impedimento para completar la acción, en cuanto a giros no hay problemas
Vidrio	0°	Realiza movimientos con normalidad
	45°	Realiza movimientos con normalidad
	70°	Realiza movimientos con normalidad
	90°	En las acciones de paso hacia adelante al cambiar de apoyo existe un pequeño resbalón, pero no es impedimento para completar la acción, en cuanto a giros no hay problemas

## CAPITULO VII

### 7. ASPECTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS

#### 7.1 COSTOS DIRECTOS

Se denominan costos directos a los que están directamente relacionados a la obtención del producto o servicio en torno al cual gira el desempeño de este proyecto. Principalmente se tiene el valor de los elementos y materiales utilizados para la construcción del robot.

**Tabla 18**

#### Costos de componentes mecánicos

Costos Directos de Partes Mecánicas			
Cant.	Descripción	Valor unitario	Valor Total
1	Platina de aluminio de 38.1mm x 3mm y 6m de longitud	\$ 14,47	\$ 14,47
1	Angulo de aluminio 1x1 de 6m longitud	\$ 6,96	\$ 6,96
1	Angulo de aluminio 11mm x 11mm y 6m longitud	\$ 5,50	\$ 5,50
60	Tuerca de Acero 3mm	\$ 0,02	\$ 1,20
30	Tornillo milimétrico cabeza redonda M3x10	\$ 0,02	\$ 0,60
20	Tornillo milimétrico cabeza redonda M3x15	\$ 0,02	\$ 0,40
15	Tornillo milimétrico cabeza redonda M3x30	\$ 0,02	\$ 0,30
4	Tornillo milimétrico cabeza redonda M4x40	\$ 0,05	\$ 0,20
2	Tornillo milimétrico cabeza redonda M6x2	\$ 0,06	\$ 0,12
60	Rodela plana galvanizada 5/32	\$ 0,02	\$ 1,20
2	Tuerca de acero MM UNF 16-1.50	\$ 0,40	\$ 0,80
1	Arco P/sierra 12"	\$ 1,54	\$ 1,54
1	Lima triangular 6"	\$ 2,82	\$ 2,82
1	Lima redonda 6" Fina	\$ 2,46	\$ 2,46
1	Broca HSS 12mm	\$ 5,35	\$ 5,35
	<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 43,92</b>



Tabla 19

## Costos de componentes electrónicos

Costos Directos de Partes Electrónicas			
Cant.	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	Arduino Mega	\$ 69,00	\$ 69,00
3	Relés 5V	\$ 0,90	\$ 2,70
4	Pulsadores	\$ 0,13	\$ 0,52
4	Capacitores	\$ 0,09	\$ 0,36
4	Led 3mm	\$ 0,13	\$ 0,52
6	Led 5mm	\$ 0,08	\$ 0,48
2	Placa Baquelita 10x15	\$ 1,56	\$ 3,12
3	Acido	\$ 0,31	\$ 0,93
1	Switch	\$ 0,71	\$ 0,71
2	Espadines	\$ 0,50	\$ 1,00
3	Estaño	\$ 0,50	\$ 1,50
7	Conector Polarizado 2 pines H-M	\$ 0,31	\$ 2,17
4	Conector Polarizado 3 pines H-M	\$ 0,34	\$ 1,36
5	Conector Polarizado 4 pines H-M	\$ 0,40	\$ 2,00
1	Conector Polarizado 5 pines H-M	\$ 0,53	\$ 0,53
1	Conector Polarizado 6 pines H-M	\$ 0,60	\$ 0,60
5	Cable flexible categoría 5E	\$ 1,86	\$ 9,30
1	Cable multipar 3 pares categoría 3	\$ 0,74	\$ 0,74
1	Amarras 12"x4.5mm	\$ 2,56	\$ 2,56
4	Servomotor FUTABA 3003	\$ 10,00	\$ 40,00
1	Servomotor FUTABA S3305	\$ 30,00	\$ 30,00
2	Servomotor HITEC	\$ 22,00	\$ 44,00
1	Fuente de Poder 500W	\$ 20,00	\$ 20,00
	<b>SUBTOTAL</b>		\$ 234,10

Tabla 20

## Costos de componentes neumáticos

Costos Directos de Partes Neumáticas			
Cant.	Descripción	Valor unitario	Valor Total
2	Cilindros neumáticos MCMI-11-16-50	\$ 40,94	\$ 81,88
2	Válvulas Electro neumáticas 3/2	\$ 47,24	\$ 94,48
1	Válvula Electro neumática TPC DV3230	\$ 40,00	\$ 40,00
2	Generadores de Vacío	\$ 30,00	\$ 60,00
8	Ventosas	\$ 4,00	\$ 32,00
3	Unión reductora 6x4 mm	\$ 1,43	\$ 4,29
5	Manguera de poliuretano 4mm	\$ 1,43	\$ 7,15
8	Manguera de poliuretano 6mm	\$ 1,51	\$ 12,08
5	Manguera para caucho 5/32	\$ 0,85	\$ 4,25
3	Derivación Tee de 4mm	\$ 2,52	\$ 7,56
3	Derivación Tee de 6mm	\$ 1,84	\$ 5,52
	<b>SUBTOTAL</b>		\$ 349,21

Tabla 21

## Costos de sensores

## Costos Directos de Sensores

Cant.	Sensores	Valor unitario	Valor total
1	Sensor ultrasónico HC-SR04	\$ 15,00	\$ 15,00
2	Sensor Magnético para cilindros	\$ 10,00	\$ 20,00
1	Sensor de Presión MDX10DP	\$ 17,00	\$ 17,00
	<b>Subtotal</b>		\$ 52,00

Tabla 22

**Costos Totales**

<b>Costos Directos Totales</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
<b>Subtotal de partes mecánicas</b>	\$ 43,92
<b>Subtotal de partes eléctricas</b>	\$ 234,10
<b>Subtotal de partes neumáticas</b>	\$ 349,21
<b>Subtotal de sensores</b>	\$ 52,00
<b>Subtotal gastos extras</b>	\$ 25,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 704,23</b>

**7.2 COSTOS INDIRECTOS**

Para la determinación de los costos indirectos, se toman en cuenta todos aquellos gastos extras que fueron hechos para el desarrollo del proyecto, tales como los costos de insumos de oficina , pagos de derechos y otros gastos extras que se presentaron durante el transcurso del proyecto.

## CAPITULO VIII

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

Los robots caminantes son vehículos con unas grandes prestaciones y ventajas sobre los vehículos convencionales. Tradicionalmente, se admite que tienen todas las ventajas sobre los vehículos con ruedas y orugas salvo dos: velocidad y complejidad.

Se conocen bien las ventajas e inconvenientes de cada estructura de pata y configuración de robot. Sin embargo, debe hacerse un esfuerzo para incorporar nuevos materiales que aligeren la masa total del robot y sobre todo deben incorporarse nuevos actuadores que ofrezcan mejores relaciones par/peso y con velocidades superiores.

Al contrario de lo que se pensaba en cuanto a los generadores de vacío, el aumentar su presión de trabajo no aumenta la generación de vacío e incluso llega a disminuir la misma, se debe trabajar en base a la gráfica.

Dentro de cada proceso de investigación existen condiciones no predecibles que se transforman en puntos clave para alcanzar los objetivos planteados

El robot presenta un excelente funcionamiento cuando la inclinación de la superficie es  $0^{\circ}$ , ya que los momentos flectores son nulos al igual que las fuerzas cortantes, además de eso todo el peso del robot esta axialmente sobre las ventosas, ayudando a que se produzca un vacío perfecto y por lo tanto una sujeción ideal.

El proyecto posee varios elementos que pueden ser reemplazados por otros de mejores características que debido a mantener bajo el costo total no se realizó, pero siempre manteniendo el principio fundamental.

Se ha conseguido mejorar los resultados de las pruebas y de funcionamiento en relación al trabajo previo en el cual se basa el presente proyecto.

## 8.2 RECOMENDACIONES

Para evitar el deslizamiento del robot sobre la superficie es recomendable asegurar que todas las ventosas se encuentren limpias ya que las mismas al estar en contacto con la superficie tienden a acumular partículas de polvo o grasa y esto hace que disminuya la adhesión y aumente el deslizamiento de estas con la superficie.

Se recomienda revisar las conexiones neumáticas, principalmente las mangueras y conexiones rápidas, comprobando que no existan fugas y esto afecte al funcionamiento de la parte neumática del robot.

El remplazo de los elementos utilizados por otros que cumplan las mismas funciones pero que sean de menor peso, ayudará a la sujeción y movimiento del robot sobre las superficies, mejorando su desempeño.

Evitar mover el robot mientras estén activos los generadores de vacío y se encuentre sujeto a una superficie ya que esto podría dañar las ventosas o romper las patas del robot, primero se debe apagar la succión.

## **ANEXOS**

## Referencias

- Antonio Fernández, M. G. (2004). Diseño y Construcción de un Robot Hexápodo. *Memoria de Proyecto, Hardware y software*. Málaga, España: Facultad de Informática de la Universidad de Málaga.
- Armada, M. (2005). *Robotics: now and beyond, Industrial Robot*.
- Asimov, I. (1985). *Máquinas a Imagen y Semejanza del Hombre*. Plaza y Janés.
- Fernandez, A. G. (2000). Metodología de diseño y control de robots escaladores. *Aplicación a las tareas de inspección*. Madrid.
- FESTO. (2010). *Técnica de vacío FESTO*. Obtenido de [http://www.festo.com/cms/es-mx\\_mx/9814.htm](http://www.festo.com/cms/es-mx_mx/9814.htm)
- Gonzalez de Santos, P. J. (2007). *A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions*. Mechatronics, In press.
- Mercader, F. (1993). *Automática e Instrumentación*.
- Micro. (2011). *Cilindros Neumáticos*. Obtenido de Microautomacion: <http://www.microautomacion.com/catalogo/Actuadores.pdf>
- Panich, S. (2010). *Development of a Wall Climbing Robot*. Bangkok: Thailand Journal of Computer Science.
- Pérez, D. (2006). *Sensores de distancia por ultrasonidos*. Obtenido de <http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/Trabajos/DiegoPerezDeDiego.pdf>
- Piñeiro, M. M. (2000). *Metrología: introducción, conceptos e instrumentos*. Oviedo: Universidad de Oviedo .
- Pulido, M. A. (2000). *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*.
- Robótica, F. I. (2011). *IFR International Federation of Robotic*. Obtenido de <http://www.ifr.org/association/>
- Todd, D. (1985). *Walking Machines: An introduction to legged robots*. Londres: Kogan Page.
- Viloria, J. R. (2014). *Motores de corriente continua*. S.A Ediciones paraninfo.

