

Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Derecha

**Prototipo Exoesqueleto para la Extremidad Superior Derecha  
Con Aplicación a la Industria Automotriz**

**Jose Luis Robayo Paz**

**Ricardo Arboleda**

**Nicolas Roman**

**Tecnología en Mecatrónica Industrial**

**Director**

**Carlos Lino Rengifo Rentería**



**Institución Universitaria Antonio José Camacho**

**Ingeniería**

**Mecatrónica Industrial**

**2021**

**Tabla de contenido**

Introducción .....	12
1.Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Derecha Con Aplicación A la Industria Automotriz .....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo general .....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
2. Marco Referencial .....	17
2.1 Marco teórico .....	27
3.Método .....	42
3.1 Diseño General del Prototipo Exoesqueleto.....	42
3.2 Desarrollo De Prototipo Para La Optimización De Dimensiones Irregulares .....	53
3.3 Construcción Fija y Móvil del Exoesqueleto .....	57
3.4 Cálculos Matemáticos de la Presión Neumática .....	62
3.5 Construcción de Servovalvulas .....	78
3.6 Construcción Mecánica de la Extremidad Superior Derecha.....	84
3.7 Construcción de Cilindros Neumáticos.....	91
3.8 Diseño y Fabricación del Circuito Electrónico .....	97
3.9 Estructura Algorítmica de los microcontroladores.....	104
3.9.1 Ensamblaje Completo del Exoesqueleto .....	109
4.Resultados .....	111
5.Conclusiones .....	118
6.Referencias Bibliográficas .....	121

### Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de Bloques.....	11
Figura 2. Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior .....	28
Figura 3. Exoesqueleto Desarrollado Por Eksovest Para La Industria Ford .....	30
Figura 4. Sensor De Presión Mf01 .....	31
Figura 5. Esquema del sensor ATOMS-S01 .....	32
Figura 6. Sensor ATOMS-S01 .....	33
Figura 7. Relación Lineal de Voltaje vs Presión.....	34
Figura 8. Microcontrolador Atmega 328p Smd .....	35
Figura 9. Servomotor MG996R .....	37
Figura 10. Compresor Porter Cable de 150 psi .....	39
Figura 11. Batería de Litio .....	40
Figura 12. Chasis Móvil.....	43
Figura 13. Chasis Costado Derecho e Izquierdo.....	44
Figura 14. Dimensiones de Sección Pectoral .....	45
Figura 15. Vista Superior de Sección Pectoral.....	45
Figura 16. Dimensiones de omoplatos .....	46
Figura 17. Estudio Mecánico de Antebrazo .....	48
Figura 18. Diseño del Brazo Derecho .....	48
Figura 19. Dimensiones del Brazo Derecho.....	49
Figura 20. Diseño de Antebrazo Derecho .....	50
Figura 21. Dimensiones de Antebrazo Derecho.....	50
Figura 22. Dimensiones de la Mano Derecha .....	51
Figura 23. Diseño General del Exoesqueleto .....	52
Figura 24. Prototipo de la Sección Dorsal y Pectoral .....	55
Figura 25. Prototipo de la Extremidad Superior .....	56
Figura 26. Prototipo de la Extremidad Superior .....	57
Figura 27. Costado Derecho e Izquierdo del Chasis .....	58
Figura 28. Sección Pectoral Fijada con Bisagras .....	59
Figura 29. Montaje Completo del Chasis.....	60

## Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Derecha

Figura 30. Modelo Preliminar .....	61
Figura 36. Levantamiento de Peso Según la Postura .....	63
Figura 31. Dimensiones del Antebrazo Mecánico Para Análisis Matemático .....	64
Figura 32. Dimensiones del brazo Mecánico Para Análisis Matemático.....	68
Figura 33. Esquemático del Regulador Variable LM317 .....	70
Figura 34. Esquemático de Divisor de Voltaje .....	71
Figura 35. Grafica de Grados Vs Bits .....	72
Figura 37. Esquemático de Divisor de Voltaje para Batería .....	73
Figura 38. Esquemático de Saturación del Transistor TIP41C .....	74
Figura 39. Perdida de Presión Intencional .....	76
Figura 43. Diseño Culata de Sistema Neumático.....	79
Figura 44. Vista posterior del conjunto de servovalvulas .....	79
Figura 45. Construcción Final de Servovalvulas .....	81
Figura 46. Montaje de Servovalvulas.....	81
Figura 47. Esquema neumático .....	83
Figura 48. Croquis de lámina para el hombro .....	85
Figura 49. Extremidad superior derecha del hombro .....	86
Figura 50. Manguito rotador sintético.....	88
Figura 51. Pieza 1 del antebrazo .....	89
Figura 52. Pieza 1 y 2 del antebrazo acopladas.....	89
Figura 53. Extremidad completa .....	90
Figura 54. Extremidad fijada al chasis .....	91
Figura 55. Cilindro neumático del codo 1 .....	94
Figura 56. Cilindro neumático del codo 2.....	94
Figura 57. Cilindro neumático del hombro .....	95
Figura 58. Fijación de cilindro del codo .....	96
Figura 59. Sistema neumático ensamblado .....	97
Figura 60. Arquitectura del circuito electrónico .....	99
Figura 61. Vista superior del circuito.....	100
Figura 62. Vista inferior del circuito.....	100
Figura 63. Esquemático del EXO-GEN 1 .....	102

## Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Derecha

Figura 64. Diseño del PCB en 3D.....	103
Figura 65. Programador USB ISP ASP de Atmel.....	105
Figura 66. Diagrama de Flujo .....	106
Figura 67. Construcción Final del Exoesqueleto .....	110
Figura 68. Vista Posterior del Exoesqueleto .....	110
Figura 69. Peso Registrado en la Bascula .....	112
Figura 70. Maleta Industrial Pesada en Bascula .....	112
Figura 71. Sujeto de Prueba N°1 .....	113
Figura 72. Sosteniendo la carga plena de 10.3kg.....	114
Figura 73. Maletín Industrial Alojado en una Altura Superior .....	114
Figura 74. Peso Registrado del Voluntario N°2.....	115
Figura 75. Maletin Industrial con 12.9 kg.....	116
Figura 76. Sujeto de Prueba N°2.....	116

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Datos de Prueba.....117

## Resumen

En este trabajo se mencionará inicialmente la exposición muscular y física de los operarios de la industria automotriz a nivel internacional. Se han encontrado un conjunto de anomalías cuyo origen tiene cabida en el sector productivo; debido a las actividades laborales que deben cumplir los operarios dentro de su jornada, creando algunas molestias musculares que posteriormente podrían empeorar con el tiempo. Para responder satisfactoriamente ante este síntoma, surgiría el desarrollo de una herramienta denominada EXOESQUELETO, cuyas propiedades lograrían simplificar al máximo el esfuerzo físico de un operario; uno de los modelos guía que impulsaría este desarrollo se basaría en el modelo de un exoesqueleto aplicado para la rehabilitación de personas en condición de discapacidad; actualmente existen diferentes modelos, sin embargo el adquirir esta herramienta resulta ser demasiado dispendioso por sus altos costos; en consecuencia, surge la necesidad de materializar un sistema exoesqueleto que pueda llegar a manos de toda la industria automotriz.

Para este modelo se ejecutarán previamente una serie de procesos para la obtención de las dimensiones promedio del cuerpo humano; un requisito indispensable que permitirá el desarrollo del chasis o partes fijas del exoesqueleto electromecánico; posteriormente se modelará gráficamente en un software de diseño denominado SOLIDWORKS Mediante esta herramienta de diseño se modelará también las piezas móviles y algunos de los mecanismos alternantes con el propósito de seccionar de forma proporcional el espacio disponible dentro del chasis para alojar de forma indicada el sistema eléctrico, mecánico y fuente de poder; en el diseño del sistema general se puede garantizar un modelo estructural que permitirá optimizar su desempeño al máximo.

Para materializar este conjunto se empleará inicialmente un material flexible que permita hacer el croquis en 2 dimensiones; este método permitirá reevaluar las secciones que requieran de pequeñas modificaciones antes de implementarlo en lámina.

Para cada una de las articulaciones de la extremidad superior derecha se implementarán brazos neumáticos de pequeña proporción que permitirán amplificar la fuerza del operario y su resistencia en un 200%; esta fuerza será proporcionada por la fuerte presión de aire generado por una pequeña unidad de 12 voltios que permitirá entregar un máximo de 300 PSI. La sección electrónica del sistema permitirá coordinar la apertura y cierre de las electroválvulas, cuyo mecanismo estará sensado por 8 contactores que estarán alojados estratégicamente sobre toda la extremidad superior derecha. Finalmente, para garantizar un excelente desempeño del sistema se realizarán las pruebas correspondientes para optimizar o corregir averías que puedan surgir en el funcionamiento.

### **Abstract**

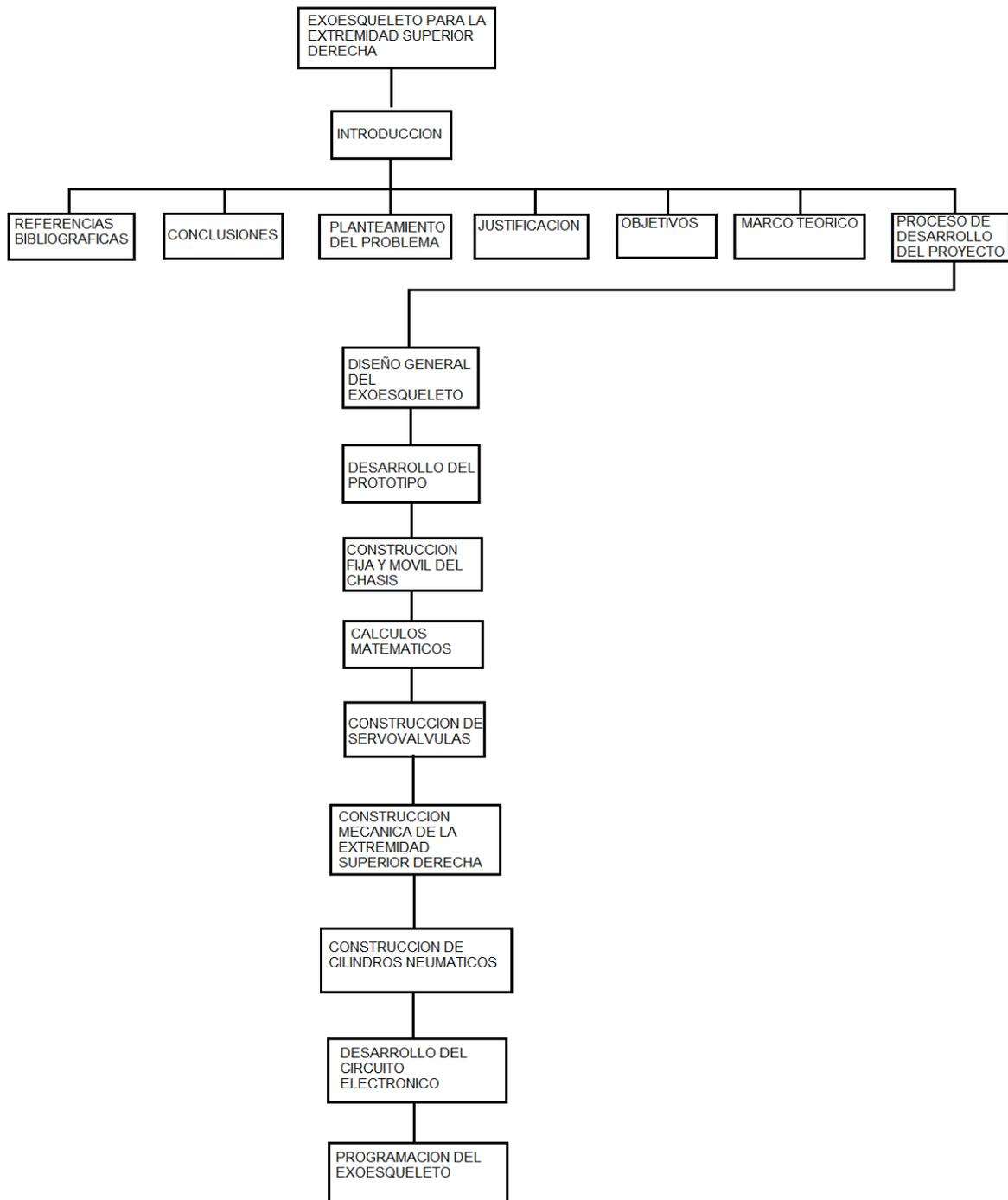
In this work, the muscular and physical exposure of the operators of the automotive industry at an international level will be mentioned initially. A set of anomalies have been found whose origin has a place in the productive sector; Due to the work activities that the operators must carry out within their day, creating some muscular discomfort that could later worsen over time. To respond satisfactorily to this symptom, the development of a tool called EXO-SKELETON would arise, whose properties would simplify the physical effort of an operator to the maximum; one of the guiding models that would promote this development would be based on the model of an exoskeleton applied to the rehabilitation of people with disabilities; Currently there are different models, however acquiring this tool turns out to be too expensive due to its high costs; Consequently, the need arises to materialize an exoskeleton system that can reach the hands of the entire automotive industry.

For this model, a series of processes will be previously executed to obtain the average dimensions of the human body; an indispensable requirement that will allow the development of the chassis or fixed parts of the electromechanical exoskeleton; Later, it will be graphically modeled in a design software called SOLIDWORKS Through this design tool, the moving parts and some of the alternating mechanisms will also be modeled with the purpose of proportionally sectioning the space available within the chassis to accommodate the electrical system in an appropriate way. , mechanical and power source; In the design of the general system, a structural model can be guaranteed that will optimize its performance to the maximum.

To materialize this set, initially a flexible material will be used that allows making the sketch in 2 dimensions; This method will allow to re-evaluate the sections that require minor modifications before implementing it in sheet.

Small proportion pneumatic arms will be implemented for each of the joints of the upper right limb that will allow the operator's force and resistance to be amplified by 200%; This force will be provided by the strong air pressure generated by a small 12 volt unit that will allow a maximum of 300 PSI to be delivered. The electronic section of the system will allow coordinating the opening and closing of the solenoid valves, whose mechanism will be sensed by 8 contactors that will be strategically housed over the entire upper right extremity. Finally, to guarantee an excellent performance of the system, the corresponding tests will be carried out to optimize or correct faults that may arise during operation.

*Figura 1. Diagrama de Bloques*



Fuente: Elaboración propia

## **Introducción**

La tecnología es una puerta hacia el futuro que ha permitido que el hombre pueda dimensionar y desarrollar un conjunto de herramientas que permiten facilitar cualquier actividad. Uno de los equipos que sin duda alguna han generado gran curiosidad del área tecnológica, son denominados EXOESQUELETOS, o también conocidos como servo armaduras, que con frecuencia hemos podido atestiguar en cronometrajes de ciencia ficción. Sin embargo, su desempeño tiene aplicaciones en diferentes áreas y que han generado muy buenos resultados.

En esta sección se pretende desarrollar un sistema electromecánico que se pueda ajustar cómodamente en la extremidad superior derecha de un operario y que permita amplificar la fuerza en un 200%, cuya potencia será adquirida por medio de energía neumática; potencia suficiente que permitirá al operario ejercer actividades laborales que requieren de mucho esfuerzo físico, y de esta manera reducir molestias musculares que puedan surgir a mediano y largo plazo.

## **1. Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Derecha Con Aplicación A la Industria Automotriz**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Actualmente las grandes empresas del sector Industrial se han visto inmersos en un complejo caso de productividad generado en las líneas de producción; debido a las lesiones musculares o fatiga que progresivamente han contraído algunos operarios en las líneas de ensamblaje; así como lo indicó Josep María Vall, actual presidente de la ensambladora de automóviles “CLÚSTER”, quienes son considerados líderes en diseño y ensamblaje de distinguidas marcas de automóviles como FORD y NISSAN. Este modelo crítico ha generado posibles opciones para delimitar los riesgos contraídos por los operarios, una de las opciones más favorables es la implementación de exoesqueletos, que permiten realizar tareas complejas y aumentar la resistencia del operario. (Cardona, 2019)

La empresa de innovación tecnológica Ekso Bionics; reconocida en el mercado internacional por ser fabricantes directos de exoesqueletos; sería una de las primeras compañías en poner a prueba estos mecanismos en la industria con el propósito de facilitar cualquier tipo de tarea que requiera de mucho esfuerzo, especialmente en las líneas de producción. La implementación de estos mecanismos ha sido satisfactoria en grandes compañías del primer mundo, sin embargo, la implementación de estos sistemas electromecánicos resulta ser demasiado costosa y fuera del alcance de algunos países en vías de desarrollo entre los cuales se encuentra Colombia, Brasil, Costa Rica, Perú, Uruguay y Venezuela; (Martinez, 2018) este impacto económico ha provocado

que las pequeñas industrias no tomen las medidas respectivas para evitar riesgos en la parte operativa de las líneas de producción.

Este sistema electromecánico ha sido considerado como una herramienta indispensable para cumplir diferentes tareas, no obstante, el acceso a esta herramienta resulta ser demasiado compleja. Una posible solución que podría suplir la necesidad de estas empresas; es desarrollando un sistema electromecánico cuyo presupuesto se ajuste perfectamente a los países vecinos. Una de las alternativas más favorables, es el desarrollar un exoesqueleto que pueda amplificar la fuerza en una extremidad superior, ya sea en la izquierda o la derecha, todo depende de cual extremidad sea la más utilizada por el operario.

Este nuevo modelo tecnológico, no solamente entraría a mejorar el desempeño laboral en la industria, sino que además reduciría en gran manera las lecciones musculares y articulares que se suelen presentar a mediano y largo plazo por tareas repetitivas y complejas. Esta situación no solo afectaría al operario, sino también el futuro y bienestar de la empresa, que se vería reflejado en el desembolso de grandes indemnizaciones por enfermedades musculares causadas dentro del área laboral.

## **1.2 Justificación**

La operación laboral en la industria automotriz ha generado con el tiempo una serie de trastornos musculares y esqueléticos perjudicando principalmente a los trabajadores en las líneas de ensamblaje por las múltiples tareas que deben ejecutar durante su jornada laboral, ya que deben adoptar posiciones incómodas para manipular herramientas y piezas pesadas las cuales han provocado paralelamente una serie de patologías como el síndrome del túnel del carpo, síndrome del maguito rotador, Epicondilitis, discopatía lumbar y lumbalgias entre otros.

Los factores de riesgo laborales en la industria automotriz son trastornos que surge progresivamente por los movimientos repetitivos, posturas inadecuadas, vibración, uso manual de herramientas, tareas físicas demandantes y el mal levantamiento de cargas; todas estas patologías son generadas por el ausentismo laboral el cual se ha propagado sin medida a nivel mundial, lo que ha provocado un aumento en el costo económico por incapacidades, ayudas diagnósticas y tratamientos. (Andres Camilo Gutierrez Cubillos, 2000-2016)

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Desarrollar un exoesqueleto para la extremidad superior derecha que permita duplicar la fuerza de un operario en la industria automotriz.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- ✓ Desarrollar la estructura interna y externa del exoesqueleto, con las dimensiones apropiadas para el uso de personas de contextura delgada y mediana.
- ✓ Desarrollar mecanismos de potencia a pequeña escala, que permitan duplicar la fuerza de un operario.
- ✓ Desarrollar un circuito electrónico de montura superficial para controlar el movimiento mecánico de la extremidad superior derecha.
- ✓ Elaborar un manual de instrucciones del funcionamiento general del exoesqueleto, que cuente con 2 idiomas.

## 2. Marco Referencial

### A Nivel Institucional

Adquisición De Señales Musculares Para El Control Prótesis De Mano 3d.

El sistema de adquisición de señales musculares para el control de una prótesis virtual, es un mecanismo desarrollado por el señor CARLOS ANDRES BERNAL, WILLIAN MACIAS JIMENEZ Y CRISTIAN RICARDO MARTINEZ, del programa Mecatrónica Industrial, proyecto que se llevó a cabo en el año 2013 de la INSTITUCION UNIVERSITARIA ANTONIO JOSE CAMACHO, de la sede norte de la ciudad de Cali, con la supervisión del docente RODRIGO GUTIERREZ MARIN (Ingeniero Mecatrónico).

El propósito de este desarrollo nace bajo la necesidad de auxiliar a personas que sufren de discapacidad en sus extremidades superiores, uno de los retos más complejos para llevar a cabo este desarrollo, sería el de interpretar y sensar las señales musculares por medio de electrodos, para operar el movimiento deseado por el usuario. (Carlos Andres Bernal, 2013)

La electromiografía sería una de las primeras técnicas llevadas a cabo para interpretar y descomponer las señales sensoriales EMG, teniendo en cuenta que las señales registradas para la lectura de cada movimiento rondaría cerca de los 0.1 y 0.5 mV de amplitud de onda con una frecuencia de 10kHz filtrada y amplificada por medio componentes analógicos para lograr accionar cada articulación y poder visualizarlo en un monitor mediante el software BLOQUE JOINT ACTUATOR, que permite configurar cada una de las secciones de la extremidad superior derecha para efectuar un movimiento mediante la relación del dispositivo de adquisición de datos "DAQ". A pesar de que este proyecto llega a la etapa de simulación nos proporciona significativamente

métodos paralelos que pueden complementar con el control articulable del EXOESQUELETO ELECTROMECHANICO.

#### Diseño De Una Ortesis Para La Mano Derecha.

El desarrollo de estos mecanismos ortopédicos, sería uno de los modelos básicos que impulsarían más adelante el desarrollo de lo que hoy conocemos como EXOESQUELETOS. Este desarrollo fue diseñado y materializado por el señor JOSE DAMIAN COLLAZOS Y MARVIN JORI SAA, del programa Mecatrónica Industrial, de la INSTITUCION UNIVERSITARIA ANTONIO JOSE CAMACHO, de la sede norte de la ciudad de Cali, con la supervisión del docente ALEXIS RAMIREZ, proyecto llevado a cabo en el año 2014. El desarrollo de este mecanismo acrecentó el desarrollo de los actualmente llamados EXOESQUELETOS para la rehabilitación de personas en proceso de recuperación muscular o articulable. Básicamente la ortesis dinámica son dispositivos que facilitan el movimiento de músculos debilitados, articulaciones y cartílagos, en donde cada músculo u órgano puede proporcionar variaciones eléctricas y estas variaciones pueden determinarse como una serie de pulsos o señales con una amplitud de onda, normalmente captados por electrodos y posteriormente amplificados por una configuración de amplificadores operacionales, para poder accionar los servomotores que permitirán articular la mano derecha. Para el procesamiento de cada una de las señales amplificadas se utilizaría una tarjeta de procesamiento FPGA, que mediante la lógica programada a través de bloques, sería posible accionar el movimiento deseado en la mano derecha mediante condicionales. (JOSE DAMIAN COLLAZOS, 2014)

Uno de los actuadores que proporcionaría la potencia necesaria para tensionar la guaya de tracción de la mano, es conocido como un servomotor digital Tower Pro MG995 de alta velocidad con un torque de 13Kg/cm y un peso de 55,2 gramos.

El desarrollo de este mecanismo cumpliría con unas dimensiones excesivas que facilitar su uso, sin embargo, para lograr suplir a este inconveniente se implementaría un morral que serviría como soporte de sistema general del proyecto.

## **A Nivel Regional**

Mecanismo Sensorial Para La Administración de Datos para un Exoesqueleto Electro Asistido.

Este sistema de adquisición de datos sensoriales por medio de un exoesqueleto en las extremidades superiores fue llevado a cabo por el señor RAUL ROJAS HERRERA, de la facultad de Ingeniería, en la modalidad de Ingeniería de Sistemas y Computación de la UNIVERSIDAD DEL VALLE. Tesis de grado supervisado por la directora BEATRIZ EUGENIA FLORIAN GAVIRIA cuyo proyecto fue llevado a cabo en junio del año 2017.

Este mecanismo consta de un exoesqueleto denominado RUVEM, que se puede ajustar en las extremidades inferiores del paciente, el cual se encuentra en proceso de rehabilitación o recuperación; permite extraer una serie de patrones de cada movimiento ejercido por el paciente, a través de 10 sensores que se encuentran alojados en diferentes puntos de las extremidades inferiores y 4 actuadores que se encuentran alojados en la rodillas y caderas permitiendo captar el lapso de tiempo y movilidad de cada extremidad, y esta manera poder simular por medio de un software las características disfuncionales para lograr intervenir en el proceso de recuperación terapéutica del paciente. (HERRERA, 2017)

Una vez más esta herramienta nos permite dimensionar su gran importancia dentro del área de la medicina permitiendo atender síntomas fisioterapéuticos y mejorar la movilidad de una persona.

## Control De Un Brazo Robótico Virtual Usando Un Exoesqueleto Robot De Miembro Superior.

El desarrollo de este proyecto de grado fue llevado a cabo por el estudiante JONATAN JAIC FRANCO MARTINEZ, de la facultad de ingeniería en MECANICA, de la universidad LIBRE de la ciudad de Cali; proyecto llevado a cabo en el segundo semestre del año 2018 bajo la supervisión del docente EDILBERTO CARLOS VIVAZ GONZALES (MARTINEZ, 2018).

Este diseño consiste en una interfaz de usuario para observar los parámetros de la cinemática directa e inversa de cada mecanismo que fueron sincronizados físicamente por medio de una prótesis robótica serial y posteriormente emulados en un exoesqueleto virtual. Para ello se realizó la simulación de la trayectoria dentro del software de realidad virtual, que comunica la prótesis real con el exoesqueleto virtual y este último con el robot serial. Este proyecto fue dimensionado en SOLIDWORD y posteriormente se imprimió cada una de las piezas en una impresora 3D. Para construir el sistema de adquisición y acondicionamiento de señales sería implementando en el microcontrolador Arduino Mega 2560 donde se ajustó un algoritmo para lograr enviar las señales de los sensores al software V-REP (VERSION ADUCACIONAL SIN LIMITES), exportado exoesqueleto digitalizado en este software de realidad virtual.

## **A Nivel Nacional**

Diseño Mecánico De Un Exoesqueleto Para La Rehabilitación Del Miembro Superior.

El desarrollo de este mecanismo híbrido constituye una estructura compacta de 4 grados de libertad para las extremidades superiores. Desarrollado por CHRISTOFER RENE TORRES SAN MIGUEL, GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA, JUAN FRANCISCO AYALA LOZANO, BEATRIZ ROMERO ANGELES, LUIS ANTONIO AGUILAR Y GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERON, pertenecientes al programa de Biotecnología de la universidad nacional de Colombia, proyecto llevado a cabo en el primer semestre del año 2015, la estructura permite ajustarse a la antropometría del usuario, teniendo en cuenta los siguientes atributos (condiciones geométricas de la espalda y al nivel superior del usuario, longitud del brazo y extensión del brazo). (JUAN FRANCISCO AYALA LOZANO, 2015) implementó el método BLITZ, que consiste en optimizar las condiciones de carga mientras se encuentra en servicio la unidad. También se empleó el método Finito (MEF) donde evaluaron 5 casos pertinentes como prueba de estudio cuasi-estáticos y así poder hacer las pruebas correspondientes en pacientes en condiciones de rehabilitación. Posteriormente se examinó las condiciones críticas de deformación o sobre esfuerzo del mecanismo, generando satisfacción en el resultado final al ayudar a pacientes con deficiencia motriz en sus extremidades superiores, permitiendo así articular las extremidades con 4 grados de libertad ( 3 grados en la sección del hombro y un grado en el codo); este mecanismo permite ayudar a pacientes en recuperación motriz que se encuentran en sección terapéutica para lograr optimizar la movilidad en sus extremidades, además de que su implementación resulta ser de bajo costo, conveniente para la mayor parte de la población.

Exoesqueleto Para La Extremidad Superior Para El Fortalecimiento Terapéutico A Personas Con Deficiencia Motriz En El Codo.

Este desarrollo sería llevado a cabo por el estudiante ya titulado HUGO JOSE CELEDON FLOREZ, del programa INGENIERIA MECANICA Y ELECTRONICA de la universidad SANTO TOMAS de la ciudad de Bogotá en el año 2016.

Este mecanismo está constituido por una servo armadura cuyo propósito facilita la movilidad del codo con respecto al plano sagital. Con el dispositivo diseñado se pretende replicar la movilidad biomecánica para mejorar los resultados en el proceso de rehabilitación, cuyos pacientes presenten deficiencia flexo-extensión del codo para de esta manera poder evaluar la eficiencia mediante este emulador de manera remota, la kinesioterapia del codo.

(FLOREZ, 2016)

Un proyecto donde indica unas muy buenas pautas para la mecanización de un exoesqueleto posee un alto contenido acerca de la construcción de las piezas que se necesitan como soporte del brazo y como con estas darle ciertos grados de libertad al brazo.

## **A Nivel Internacional**

### Desarrollo De Un Exoesqueleto Para La Rehabilitación Del Hombro.

El desarrollo de este mecanismo suple la necesidad de prevenir y a la vez mejorar traumas musculares y ligamentos de los hombros, mediante un exoesqueleto enfocado a la rehabilitación. Tesis de grado llevado a cabo por la ingeniera DEIRA SOSA MENDEZ, para optar al título de MAESTRIA EN ROBOTICA de la universidad TECNOLOGICA DE MIXTECA de la ciudad de México, proyecto desarrollado en el mes de marzo del año 2017 y supervisado por el docente MANUEL ARIAS MONTIE (MENDEZ, 2017).

Este proyecto consiste en un diseño mecatrónico, con una integración sinérgica de los sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y computarizados como un todo. En donde los diseñadores de cada área intervienen en todas las etapas del diseño. Esta sinergia es generada por la combinación correcta de los parámetros, de tal manera que el diseño final del producto es tan bueno como la suma de las partes que lo componen. Para el diseño de este mecanismo se utilizó el sistema CAD, el cual sería utilizado para el modelado gráfico y simulación del movimiento del robot en 3D. Una vez modelado se implementaría un sistema CAE (ingeniería asistida por computadora o por ordenador), que permite a la computadora ser herramienta fundamental para la solución de tareas como análisis, diseño, producción y control; el prototipo toma en cuenta un diseño modular para cada una de las tareas que debe realizar y consiste en una cadena mecánica de eslabones seriales, la cual posee 3GDL, actuados de forma directa por motores rotatorios, una columna telescópica que proporciona la variación de ajuste a la altura del hombro, de forma que el usuario puede estar sentado o de pie; y los eslabones articulados que permiten la adaptación al brazo del paciente, la unión de las piezas es mediante pernos, los eslabones mecánicos se

obtuvieron en un perfil rectangular de una barra de aluminio, la cual se une a la columna telescópica mediante un poste de acero, y finalmente las piezas que permiten la adaptación al brazo están fabricados de plástico en impresión 3D.

### Desarrollo De Un Exoesqueleto De Rehabilitación Para Miembro Superior Basado En SMA

La tesis doctoral que aquí se presenta, se ha logrado llevar a cabo en el grupo de investigación ROBOTICSLAB de la universidad CARLOS III DE MADRID, dentro del programa de doctorado en ingeniería ELECTRICA, ELECTRONICA Y AUTOMATICA; desarrollada en el primer semestre del año 2018 por el señor DAVID SERRANO DEL CERRO, DORIN SABIN COPACI, LUIS MORENO Y MARIA DOLORES BLANCO. La propuesta de investigación que se plantea se centra en el desarrollo de exoesqueletos que funcionan con fibras de (SMA) también conocido como “SISTEMA DE ACTUACION MUSCULAR”; como se mencionó anteriormente está compuesto por fibras, las cuales actúan como líneas musculares y permiten generar un movimiento angular o lineal por medio de un pequeño flujo de corriente que origina una contracción en las fibras; una de las ventajas que ofrece este mecanismo SMA, es que ocupan muy poco espacio comparado con los actuadores convencionales (motores eléctricos, sistemas hidráulico o neumático). Este mecanismo de rehabilitación se diseñó principalmente responder a la movilidad del miembro superior, concretamente para la articulación de la muñeca y la mano; en trabajos previos del equipo de investigación se ha demostrado la viabilidad del uso de este tipo de actuadores en robótica de rehabilitación. Esta tesis doctoral pretende dar un paso más, desarrollando dispositivos con mayor funcionalidad, que incorporen un sistema sensorial adecuado

para servir a los terapeutas como herramienta de diagnóstico y seguimiento de la evolución del paciente. (DAVID SERRANO DEL CERRO, 2018)

Para el desarrollo de este modelo se plantea el diseño de actuadores de SMA, mas compactos, es decir, reducir su longitud ya que actualmente se requieren hilos SMA de excesiva longitud para la movilización de ciertas articulaciones. El diseño de estos nuevos actuadores se basará en un sistema de transmisión basado en poleas para provocar la multiplicación del desplazamiento producido por el actuador. De esta forma con un actuador de forma reducida se produce un desplazamiento a la salida, multiplicado por un número de veces que va a depender del número de poleas que se coloquen en el dispositivo multiplicador. Con respecto a los actuadores también se continuará con la línea de investigación ya iniciada, basada en la mejora de la fase de enfriamiento de los hilos SMA, se realizará un nuevo montaje para hacer circular aire por los cables Bowden y de esta forma provocar el enfriamiento del SMA, también se implementará el control de la microválvula que se emplea para permitir la circulación de aire en los actuadores.

La incorporación de los sensores superficiales de electromiografía (EMG) y sensores de fuerza es muy útil puesto que en ciertas fases de la terapia de rehabilitación es necesario detectar la intención del movimiento del paciente para que el dispositivo pueda compensar el resto de fuerza necesaria para lograr el movimiento total de la articulación.

## 2.1 Marco teórico

### Condiciones Particulares De Un Exoesqueleto

La automatización es uno de los procesos que ha cobrado fuerza poco a poco en el sector industrial, donde actualmente robots de grandes proporciones ejecutan tareas de mucha complejidad, así como podemos evidenciar en las grandes fábricas de automóviles realizando un trabajo impecable y en tiempo récord. Sin embargo, lo que se pretende es integrar el operario con un exotraje, cuyos resultados ya se han venido desarrollando desde hace un tiempo y ha dado satisfacción en sus resultados, ya que existen tareas industriales relativas que solo el hombre puede acceder con facilidad. Este mecanismo de aspecto futurista se alinea y se acopla fácilmente a las extremidades de un operario duplicando su fuerza y su resistencia y lo más importante el cuerpo no sufre desgaste físico.

Para muchas personas suele ser muy confuso el termino exoesqueleto, incluso algunos afirman que solo se trata de ciencia ficción, pero lo cierto es que gracias a los avances tecnológicos, ya se han venido implementando prototipos que permiten integrar el hombre con la máquina para mejorar sus habilidades físicas, especialmente para mejorar tácticas de combate en el ejercito; este tipo de desarrollos fue tomando fuerza cerca del año 1960, y ahora se han venido implementando en la medicina.

Un exoesqueleto consta por lo general, de una armadura mecánica o electromecánica que se adhiere al contorno físico de una persona, permitiéndole duplicar su fuerza y aumentar su

resistencia y poder así cumplir con tareas de mucha complejidad. Esta sería la nueva tendencia en el sector industrial (Industrial, 2018).

Por lo general cada pieza de los exotrajés suelen ser de materiales ligeros como el titanio o fibra de carbono para optimizar por completo su peso y aumentar su resistencia, como se puede apreciar en la figura N°2. Estos trajes suelen ser muy cómodos y no generan altas temperaturas que fatiguen al operario, su fuerza motriz puede ser activada por medio de motores o sistemas hidráulicos que constituye la mayor parte de la energía que permite al operario realizar cualquier actividad que comprometa mucho esfuerzo.

*Figura 2. Prototipo Exoesqueleto Para La Extremidad Superior*



Fuente: (Fernandez, 2017) *Xalaca Nuevo*. Obtenido de <https://www.xataka.com/makers/asi-es-el-exo-brazo-de-codigo-abierto-que-dos-jovenes-ingenieros-estan-creando-por-apenas-100-dolares>

Actualmente la industria automotriz cuenta con una flotilla de robots en sus líneas de ensamblaje, una de las industrias automotrices más destacadas en la FORD, que incluso cuentan con un mecanismo llamado Robutts, el cual examina la calidad de los asientos, pero gracias a EKsoVest la compañía automotriz podría explorar un nuevo dispositivo.

EKsoVest, es una compañía que ha desplegado un nuevo dispositivo denominado exoesqueleto auxiliar, que recubre la parte superior del operario para ejecutar tareas que requieran mucho esfuerzo físico, así como se puede apreciar en la figura N°3. Este proyecto nació de una sociedad entre EKso Bionics y FORD, ya reconocida por trabajar con industrias como BMW, y su tarea principal es optimizar procesos industriales que ponen en riesgo la salud de los operarios.

Desarrollado principalmente para atender a tareas de propósito general, este mecanismo está constituido por un material ligero y compacto que puede suspender los brazos del operario sin generar fatiga o cansancio, esta nueva herramienta de trabajo puede ser utilizada por personas que se encuentran en un rango de 1.52 a 1.95 metros de altura, sin duda alguna este mecanismo simplificaría por completo la etapa de productividad en la industria automotriz FORD (Matus, 2017).

*Figura 3. Exoesqueleto Desarrollado Por Eksovest Para La Industria Ford*



Fuente: (Unocero, 2017) *UNOCERO*. Obtenido de <https://www.unocero.com/autos/eksovest-el-exoesqueleto-que-ocupa-ford-para-ayudar-a-sus-trabajadores/>

La compañía EKsoVest se ha convertido actualmente en el control automático de dos grandes plantas de FORD en Estados Unidos, sin embargo, esta compañía pretende extender su producto en Europa y Sudamérica, ya que EKsoVest no sería la única compañía que opera con esta nueva tecnología. En el año 2016, El parque automotor Hyundai sorprendió por su gran avance tecnológico en sus líneas de ensamblaje, gracias a la participación de Roam Robotics, el cual desarrollo un exoesqueleto fabricado con materiales ligeros y económicos que facilitaron las tareas complejas de los operarios.

Así como hemos logrado apreciar por testimonios de la industria automotriz, el exoesqueleto entraría a jugar un papel muy importante para optimizar los procesos que limitan el esfuerzo físico de una persona; y su tendencia sería el de ser considerada la herramienta del futuro.

El exoesqueleto, normalmente está constituido por 3 etapas principales, entre ellas hablamos de la parte electrónica o hardware, la sección programable o software y finalmente la estructura neumática.

Para el desarrollo del prototipo exoesqueleto para la extremidad superior derecha se pretende implementar un sistema con respuesta neumática que será la encargada de proporcionar la presión suficiente para accionar cada uno de los brazos neumáticos, permitiendo duplicar la fuerza del operario. Pero es importante tener en cuenta que detrás de la fuerza neumática se encuentra una estructura importante que permite operar algorítmicamente cada articulación. Entre ellas se encuentran las membranas sensoriales de presión MF01, indicadas en la figura N°4, que podrían hacer parte del conjunto electrónico y estarán alojadas en distintos puntos del exoesqueleto, por lo general se considera necesario implementar 6 sensores de presión que permitirán entregar lecturas analógicas al microcontrolador.

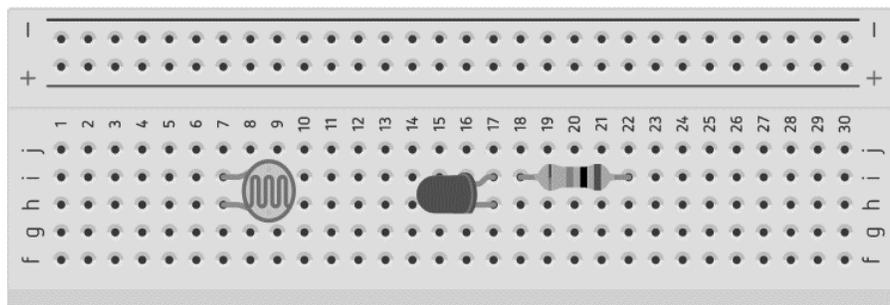
*Figura 4. Sensor De Presión Mf01*



Fuente: (Galgas, 2016) *T-Bem*. Obtenido de <https://teslabem.com/arduino/sensor-fsr/>

Sin embargo, la adquisición de estos sensores de presión suele ser complejo, debido a su elevado costo y poco manejo comercial en la localidad. Para responder satisfactoriamente a esta necesidad fue necesario diseñar un sensor de presión o de fuerza, utilizando estrategias experimentales con componentes de bajo presupuesto que denominamos ATOMS-S01. Finalmente, después de someterlo a varias pruebas, se obtuvieron los resultados esperados. En la figura N°5, se puede apreciar un esquemático del funcionamiento básico del sensor el cual consta de una foto resistencia, un diodo led pequeño difuminoso y una resistencia de 330ohmios, su funcionamiento consiste en la variación luminosa que se genera con la presencia de presión en la base de material blando, que para este caso se utilizaría fomi de color negro, el cual será obstáculo para impedir los rayos de luz hacia la fotoresistencia.

*Figura 5. Esquema del sensor ATOMS-S01*

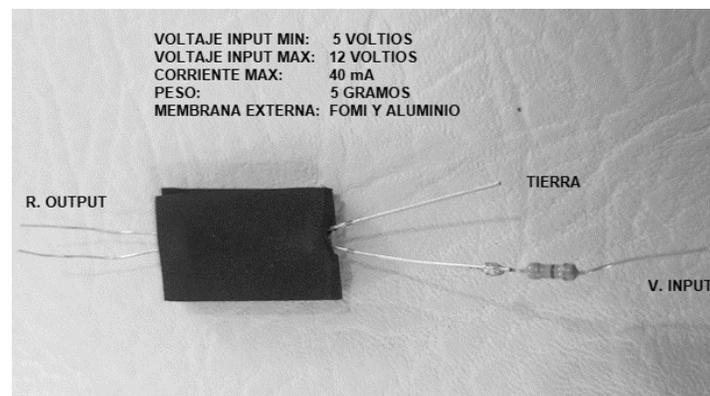


Fuente: Elaboración propia

La fotoresistencia responde de forma variable ante la presencia de luz y genera una variación resistiva por uno de sus extremos, la cual estará en un mínimo de 500 ohmios y un máximo de 20K ohmios; con esta variación podemos obtener fácilmente una relación lineal con respecto a la fuerza ejercida sobre el nuevo sensor y así poder generar una comunicación analógica por medio de un microcontrolador.

En la figura N°6 podemos observar el montaje final del sensor ATOMS-S01, con sus respectivas características y condiciones de operación.

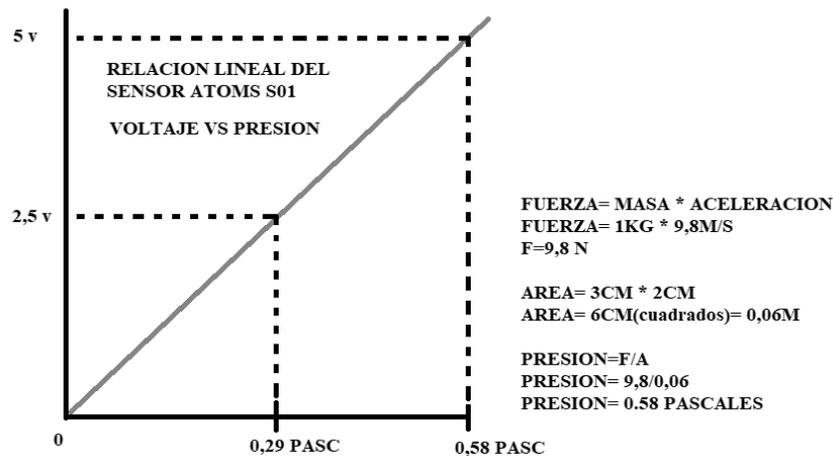
*Figura 6. Sensor ATOMS-S01*



Fuente: Elaboración propia

Una de las ventajas que nos proporciona el sensor ATOMS-S01, además de su bajo presupuesto, es su sencilla implementación en cualquier tarjeta de desarrollo o microcontrolador por medio de las entradas ADC. Así como se pudo observar en la figura N°6, este sensor consta de 3 pines, de los cuales uno de ellos proporciona la variación de cero a cinco voltios dependiendo de la presión ejercida sobre el sensor; otro de los puertos corresponde a la alimentación de 12 voltios y el otro puerto corresponde a la tierra; en la figura N°7 se puede apreciar la relación lineal del sensor de presión, el cual es estimulado mediante la presencia de una presión superior a 0,08 pascales.

Figura 7. Relación Lineal de Voltaje vs Presión



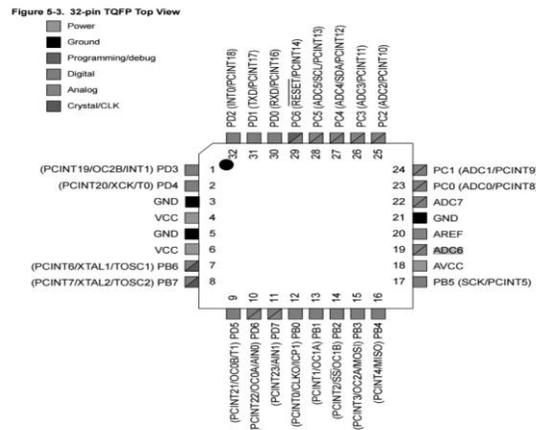
Fuente: Elaboración propia

El sensor de presión ATOMS S01 es una de las versiones más resistentes en la industria electrónica que surgió mediante el campo experimental y hoy en día podría tener variedad de aplicaciones como por ejemplo en básculas, botoneras, airbag, e incluso proyectos de electrónica.

Para la lectura analógica de cada uno de los sensores de presión ATOMS-S01 se contará con el uso del microcontrolador ATMEGA 328P de superficie, como se indica en la figura N°8. Este Circuito integrado de alto rendimiento está basado en un microcontrolador RISC, combinando 32 KB (ISP) flash una memoria con la capacidad de leer-mientras-escribe, 1 KB de memoria EEPROM, 2 KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general, 32 registros de proceso general, tres temporizadores flexibles y contadores con modo de comparación, interrupciones internas y externas, programador de modo USART, una interfaz serial orientada a byte de 2 cables, SPI puerto serial, 6-canales 10-bit Conversor A/D (canales

en TQFP y QFN/MLF ), temporizador "watchdog" programable con oscilador interno, y cinco modos de ahorro de energía seleccionables por software. Este dispositivo opera entre 1.8 y 5.5 voltios. Por medio de la ejecución de poderosas instrucciones en un solo ciclo de reloj, el dispositivo alcanza una respuesta de 1 MIPS, balanceando consumo de energía y velocidad de proceso. (Perez, 2018)

Figura 8. Microcontrolador Atmega 328p Smd



Fuente: (Anonimo, 2015) *Todo Sobre AVR.* Obtenido de <http://todosobreavr.blogspot.com/2015/10/caracteristicas-tecnicas-del-atmega-328.html>

El microcontrolador ATMEGA 328P cuenta con las características ideales para su fácil uso, ya que las funciones algorítmicas de su sistema son compatibles con el código ARDUINO a través de bootloader para su respectiva compilación del código; mediante una conexión serial que se emplea con un Arduino a través de los puertos RX y TX, y se puede compilar de forma instantánea

haciendo un reseteo en el microcontrolador cuando el sistema se encuentra compilando el código y de esta manera es posible transferir todos los datos al microcontrolador SMD.

Una vez el microcontrolador realice la correspondiente lectura de cada uno de los sensores de presión, el microcontrolador generará como respuesta un tren de pulsos en una de las salidas digitales PWM, para controlar la rotación de los servomotores, que más adelante en el desarrollo de las servovalvulas se podrá apreciar con más claridad; estos servomotores se encargarán de hacer la apertura de la presión neumática mediante una llave neumática, por lo general estos servomotores operan con un voltaje mínimo de 4.8 voltios y un máximo de 7.2 voltios, en la figura N°9 podemos apreciar el servomotor con sus respectivas características.

*Figura 9. Servomotor MG996R*



Fuente: (Ferretronica, 2020) *Ferretronica Tienda Electronica*. Obtenido de [https://ferretronica.com/products/servomotor-mg996r?variant=12205033717853&currency=COP&utm\\_medium=product\\_sync&utm\\_source=google&utm\\_content=sag\\_organic&utm\\_campaign=sag\\_organic&utm\\_campaign=gs-2020-01-11&utm\\_source=google&utm\\_medium=smart\\_campaign&gclid](https://ferretronica.com/products/servomotor-mg996r?variant=12205033717853&currency=COP&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_campaign=gs-2020-01-11&utm_source=google&utm_medium=smart_campaign&gclid)

**Características del Servo MG996R:**

- ✓ Voltaje de operación: 4.8 V a 7.2 V.
- ✓ Velocidad de operación: 0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)
- ✓ Torque detenido: 9.4 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
- ✓ Con doble cojinete.
- ✓ Capacidad de rotación: 120° aprox.
- ✓ Banda muerta: 5 μs.
- ✓ Peso: 55 g.

Una de las opciones más favorables para el control de la presión neumática es fabricar una válvula de gobierno que pueda controlar el avance y retroceso de 3 cilindros neumáticos de forma independiente, cuyo funcionamiento será comandado por los servomotores, mas no por solenoides; debido a que los solenoides no se pueden controlar mediante la variación de la corriente y esto provocaría movimientos bruscos en el avance y retroceso de los cilindros neumáticos, por eso la mejor opción es implementar los servomotores, ya que pueden generar una apertura gradual y así controlar el flujo de presión en el sistema.

#### Compresor Porter Cable de 150 psi

Para la operación neumática del sistema es necesario contar con un suministro externo que pueda generar un caudal superior a 0,005 pies<sup>3</sup>/min; una de las opciones más favorables sería el de utilizar un compresor fijo de 120 voltios cuya presión es de 150 psi, con una potencia de 0,8 HP y cuenta con una válvula de regulación que permite controlar la presión que recibe el exoesqueleto para evitar movimientos bruscos. Inicialmente se pretendía instalar un compresor portátil de 12 voltios cuya presión sería de 300 psi, con el propósito de que el exoesqueleto fuera completamente portable, sin embargo después de realizar una serie de pruebas se comprobó que el compresor no generaba suficiente caudal, provocando así que los cilindros neumáticos no respondieran al 100%; por otra parte el compresor no contaba con un depósito de aire comprimido por lo que sería una desventaja mecánica que impediría operar el exoesqueleto por largos periodos, en la figura N°10 se puede apreciar la fuente neumática que se encargara de alimentar todo el sistema.

*Figura 10. Compresor Porter Cable de 150 psi*



Fuente: (Anonimo, Maquitodo, 2019) *Maquitodo*. Obtenido de <https://maquitodo.com.co/compresores-de-aire/9486-compresor-08hp-6-gal-150psi-portercable.html>

## **Especificaciones**

- ✓ Suministro De Aire 40 Psi Iso1217 3.5 Scfm
- ✓ Amperios 10 Amps
- ✓ Cut-Out Max 150 Psi
- ✓ Indicadores 2
- ✓ Lubricación De La Bomba Diseño De La Bomba Sin Aceite
- ✓ Peso De Envío 34 Lbs
- ✓ Tamaño Del Tanque 6 Gal
- ✓ Suministro De Aire A 90 Psi Iso1217 2.6 Scfm
- ✓ Cut-In Restart 120 Psi
- ✓ Decibel Iso3744 82 Db
- ✓ Acopladores De Conexión Rápida 2

## Baterías De Litio

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo así como lo indica la figura N°11.

*Figura 11. Batería de Litio*



Fuente: (Titanio, 2019) *Baterías de Litio*. Obtenido de <https://www.bateriasdelitio.net/?p=6>

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga permite generar suficiente capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración. Estos acumuladores por lo general suelen ser muy ligeros, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Se estima que esta nueva tecnología de baterías entraría a modernizar la industria electrónica a principios del

año 1990, su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles y lectores de música. (Martil, 2019)

Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, requieren en su configuración como producto de consumo, dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones.

### **3.Método**

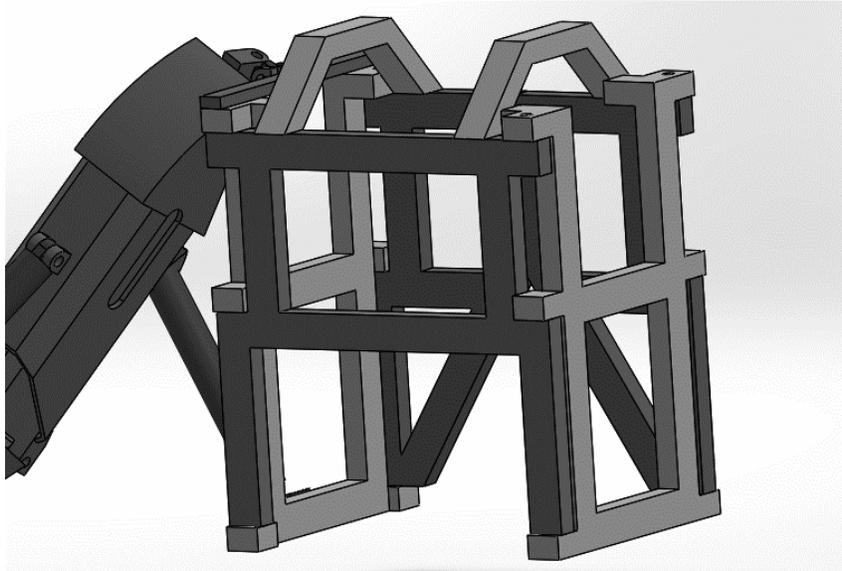
#### **3.1 Diseño General del Prototipo Exoesqueleto**

##### Chasis Móvil De La Sección Pectoral Y Dorsal

En esta etapa de diseño se puede apreciar la estructura interna del chasis, desarrollado mediante la herramienta de diseño SOLIDWORKS.

Este conjunto rígido permitirá fortalecer la sección pectoral y dorsal al momento en que el sistema general sea sometido a elevadas torsiones por la fuerza neumática.

Uno de los materiales más apropiados para el desarrollo de esta estructura sería el aluminio, cuya presentación geométrica es de forma rectangular de 20X30 mm como se puede observar en la figura N°12. Esta estructura esquelética cuenta con 4 pliegues móviles que pueden oscilar por medio de bisagras con un Angulo de apertura y cierre de 90 grados y pueden ser posicionados de forma automática a través de servomotores con el propósito de facilitar el uso de esta herramienta.

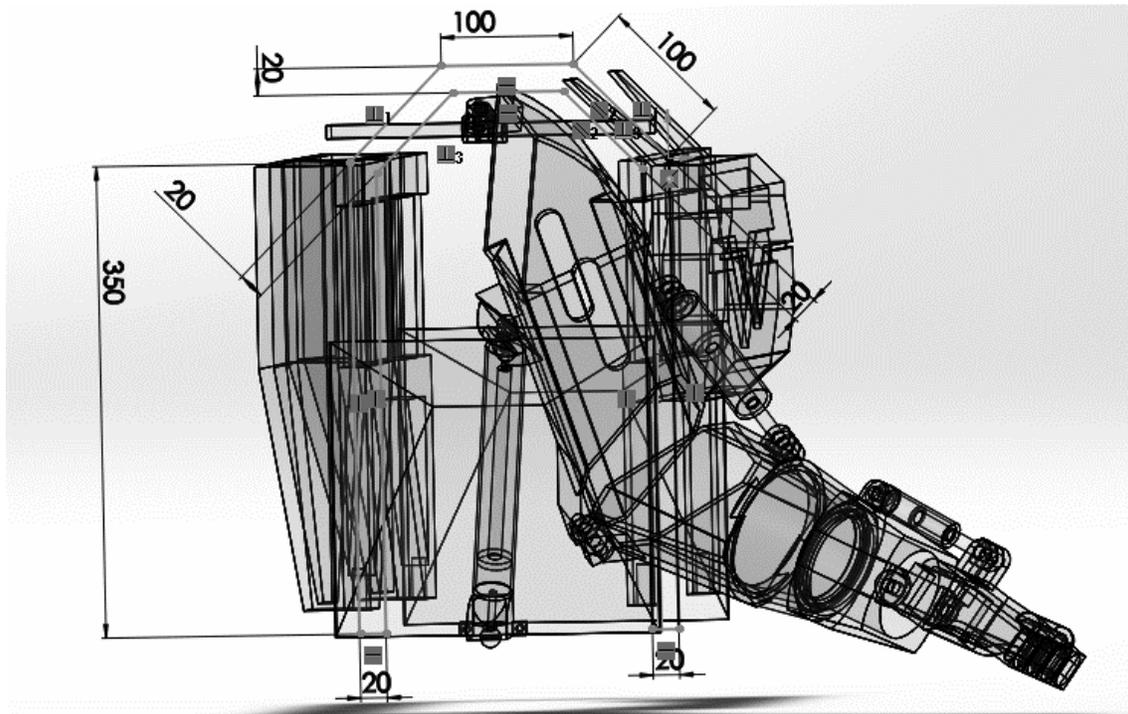
*Figura 12. Chasis Móvil*

Fuente: Elaboración Propia

#### Dimensiones Del Chasis Del Costado Derecho E Izquierdo

Las dimensiones de la estructura interna del exoesqueleto están diseñadas para proporcionar un acople estandarizado para el uso del operador de acuerdo con el diseño de la estructura, este podrá ser manipulado por personas con tallas que oscilan desde la S hasta la talla L, así como se puede observar en la figura N°13.

*Figura 13. Chasis Costado Derecho e Izquierdo*

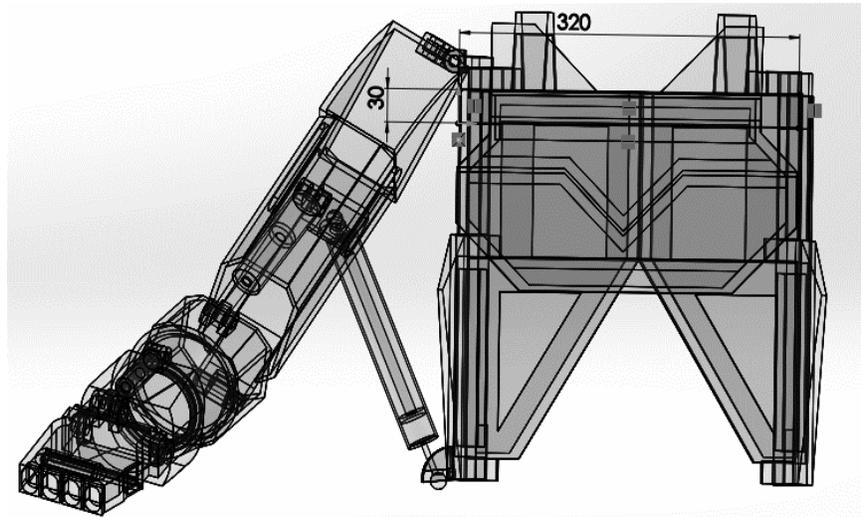


Fuente: Elaboración Propia

### Dimensiones De La Armadura Pectoral

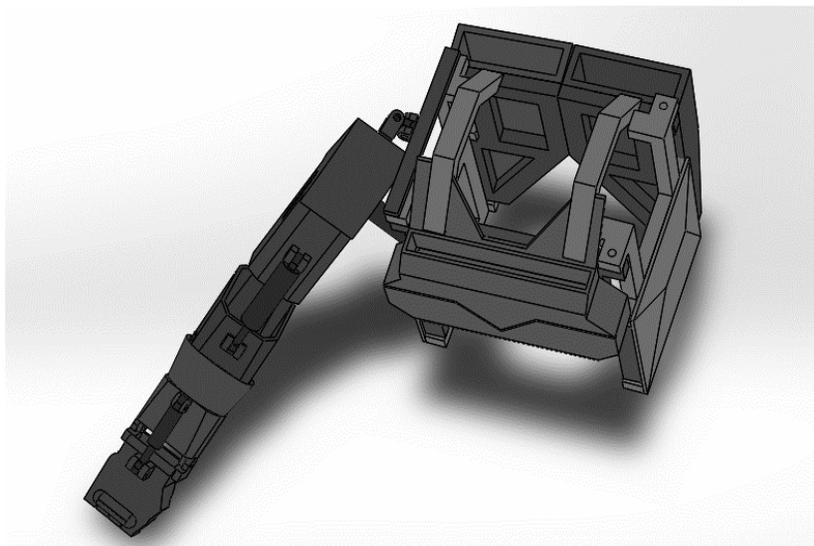
En esta sección se muestra la implementación del diseño de la armadura pectoral, la cual estará fijada por encima de la estructura de aluminio cuyo material adquisitivo para este modelo sería de lamina galvanizada de calibre 22 el cual se puede moldear fácilmente sin requerir de recursos adicionales; su propósito dentro de la servoarmadura es proteger la tarjeta electrónica EXOGEN1 incluyendo los módulos y la batería de litio, ya que la exposición al polvo y la humedad podría averiar gravemente el sistema general; además su confortable diseño le brinda un toque de elegancia así como se puede observar en el diseño registrado en la figura N°14 y 15.

*Figura 14. Dimensiones de Sección Pectoral*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 15. Vista Superior de Sección Pectoral*



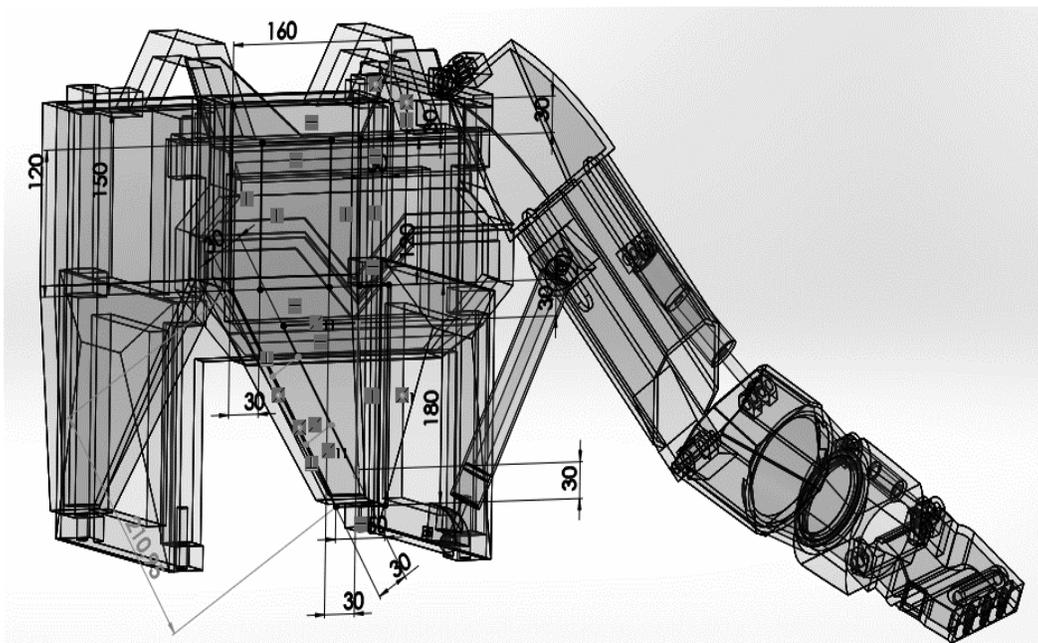
Fuente: Elaboración Propia

### Dimensiones Del Chasis Omoplato Derecho e Izquierdo

Esta sección es considerada como uno de los últimos pliegues, ubicados en la parte posterior, que giran por medio de bisagras, accionados por medio de un cilindro neumático con doble vástago.

Como se puede observar en la figura N°16, el omoplato derecho e izquierdo del exoesqueleto contarán con un giro gradual de 90 grados de apertura o cierre por medio del cilindro neumático.

*Figura 16. Dimensiones de omoplatos*



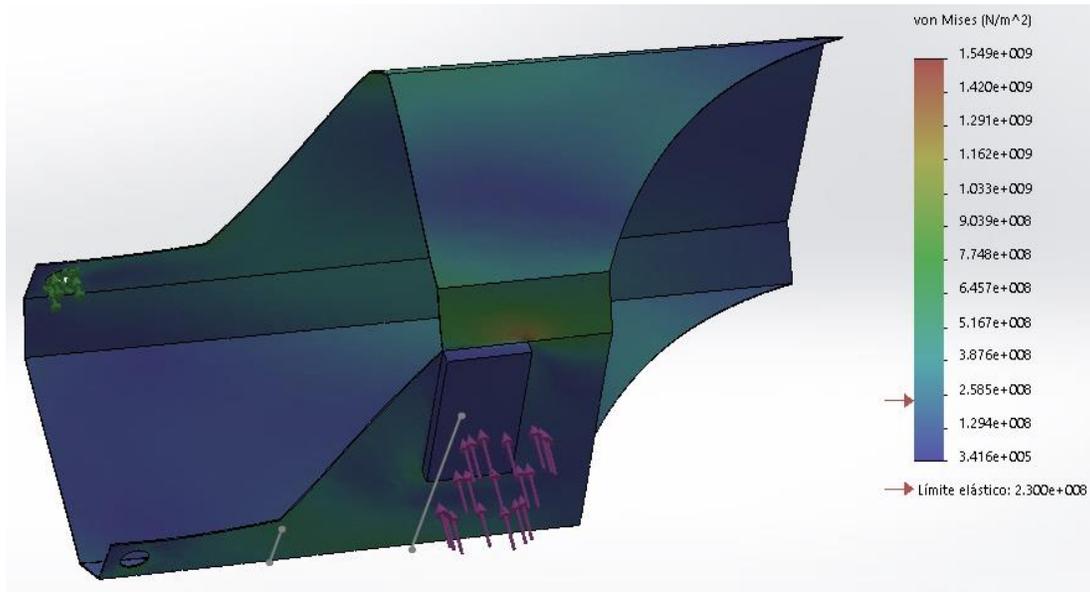
Fuente: Elaboración Propia

## Dimensiones Del Brazo Derecho

El diseño del brazo derecho contará con las dimensiones apropiadas, como se aprecia en la figura N°18 y 19. Internamente es necesario contar con una separación de 10 mm para lograr posicionar los sensores analógicos.

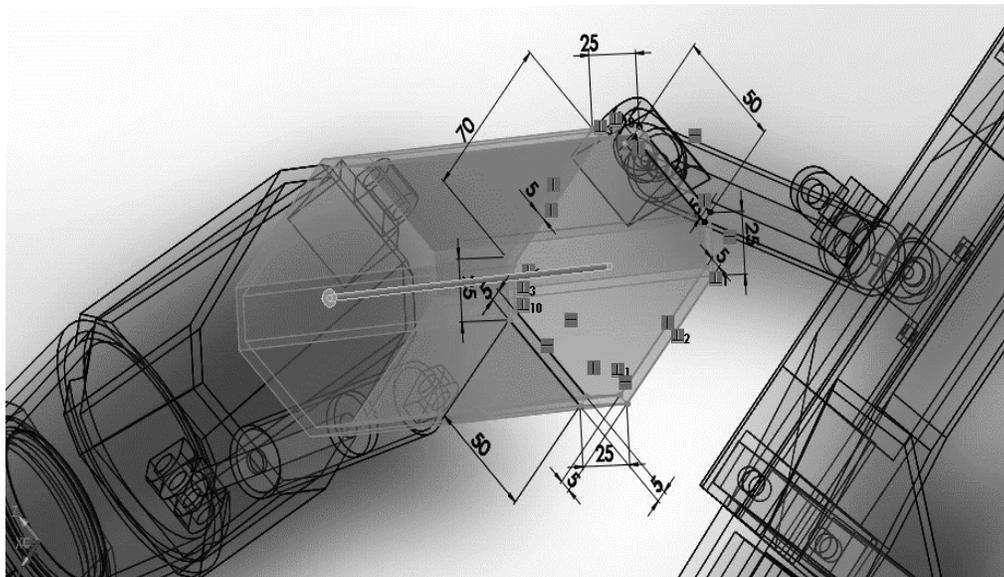
En esta etapa de diseño, fue necesario omitir el desarrollo estructural de aluminio para el brazo derecho, ya que geométricamente este conjunto ocuparía mucho espacio y limitaría algunos movimientos. Para ello uno de los materiales más apropiados para este desarrollo es de implementar lámina galvanizada calibre 22 cuyas propiedades evitara la deformación de la pieza al estar expuesta a cargas superiores a 30kg; en la figura N°17 se puede apreciar un estudio de esfuerzo de la pieza simulado desde SOLIDWORKS para la cual se aplicó una fuerza de 200 N sobre la superficie la cual están indicando las flechas y para dicho efecto la pieza logra conservar su forma geométrica sin deformar la superficie sobre la cual el vástago del cilindro neumático aplicara toda la fuerza, la cual puede tolerar una presión máxima de  $2300 \text{ NM}^2$  como indica los resultados de la simulación.

*Figura 17. Estudio Mecánico de Antebrazo*



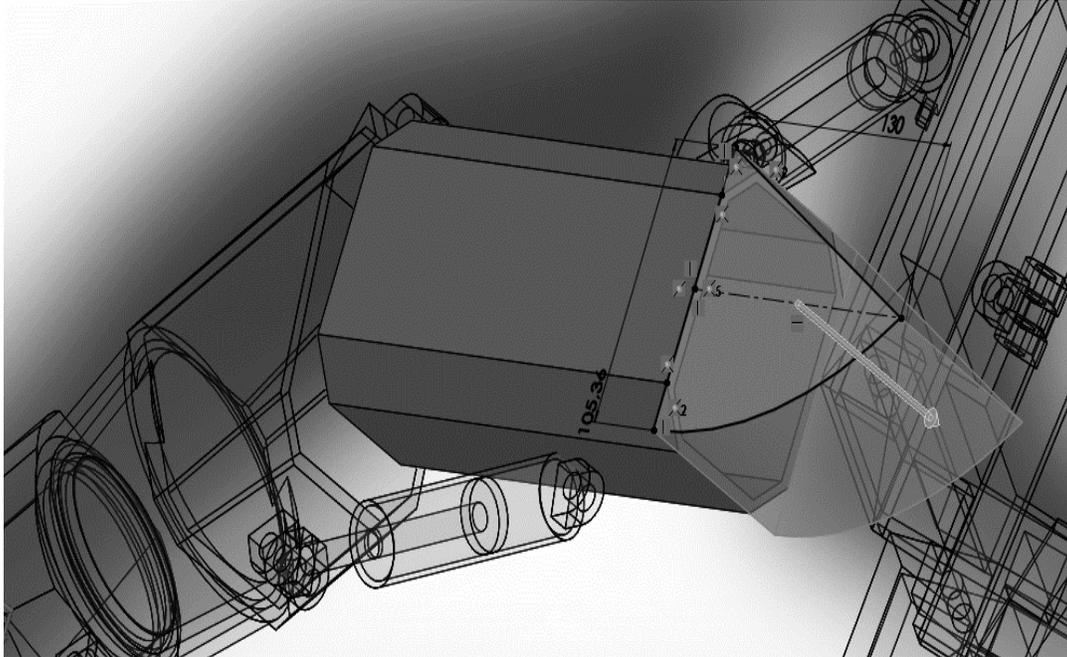
Fuente: Elaboración Propia

*Figura 18. Diseño del Brazo Derecho*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 19. Dimensiones del Brazo Derecho*

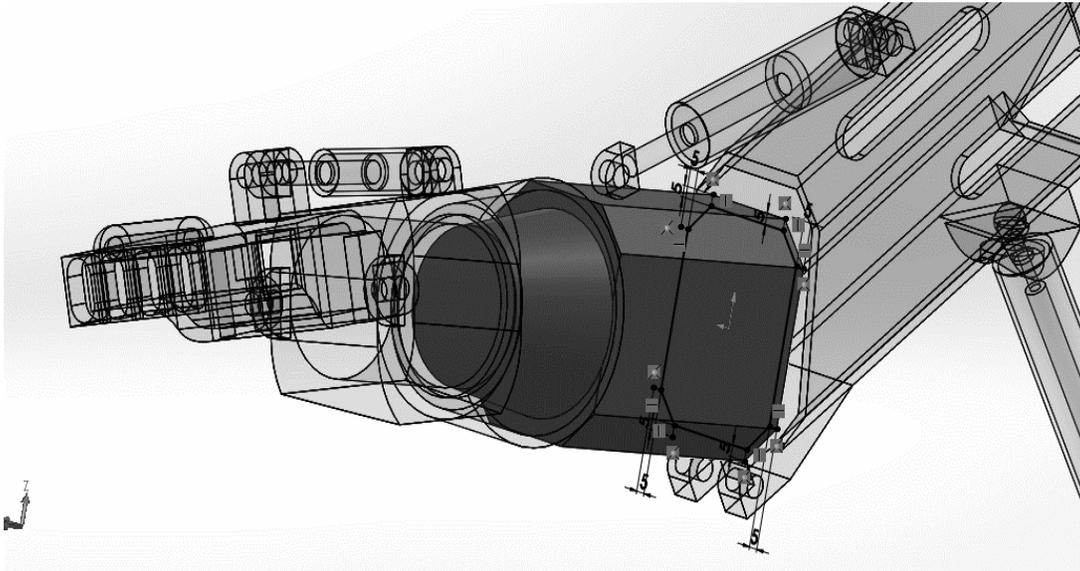


Fuente: Elaboración Propia

### Dimensiones Del Antebrazo Derecho

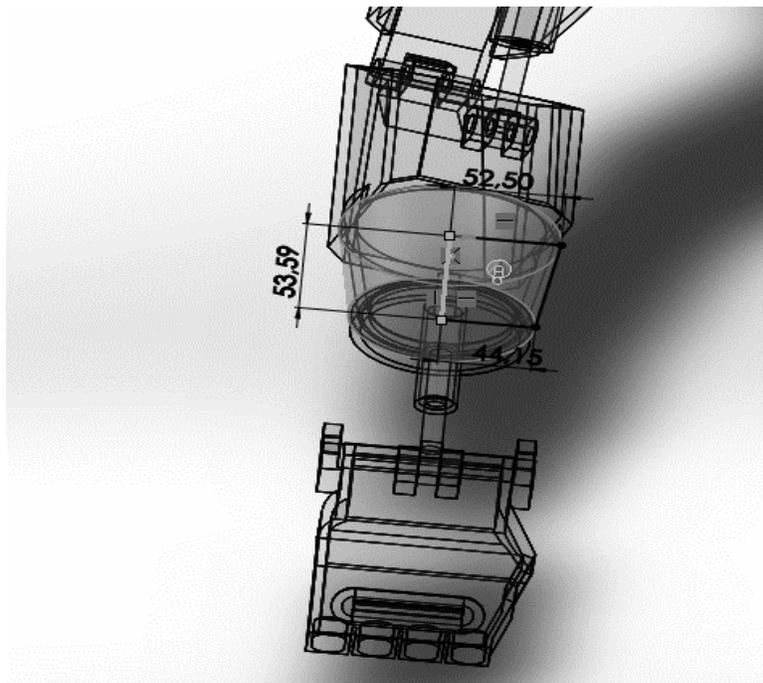
Para el antebrazo, se tendría en cuenta las mismas propiedades que se implementaron en la sección del brazo, con la diferencia que en este diseño existe un grado de libertad de 45 grados muy cercano a la muñeca, que permitirá que el operador a cargo pueda articular esta sección con más comodidad, así como se puede apreciar en la figura N°20 y 21.

*Figura 20. Diseño de Antebrazo Derecho*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 21. Dimensiones de Antebrazo Derecho*

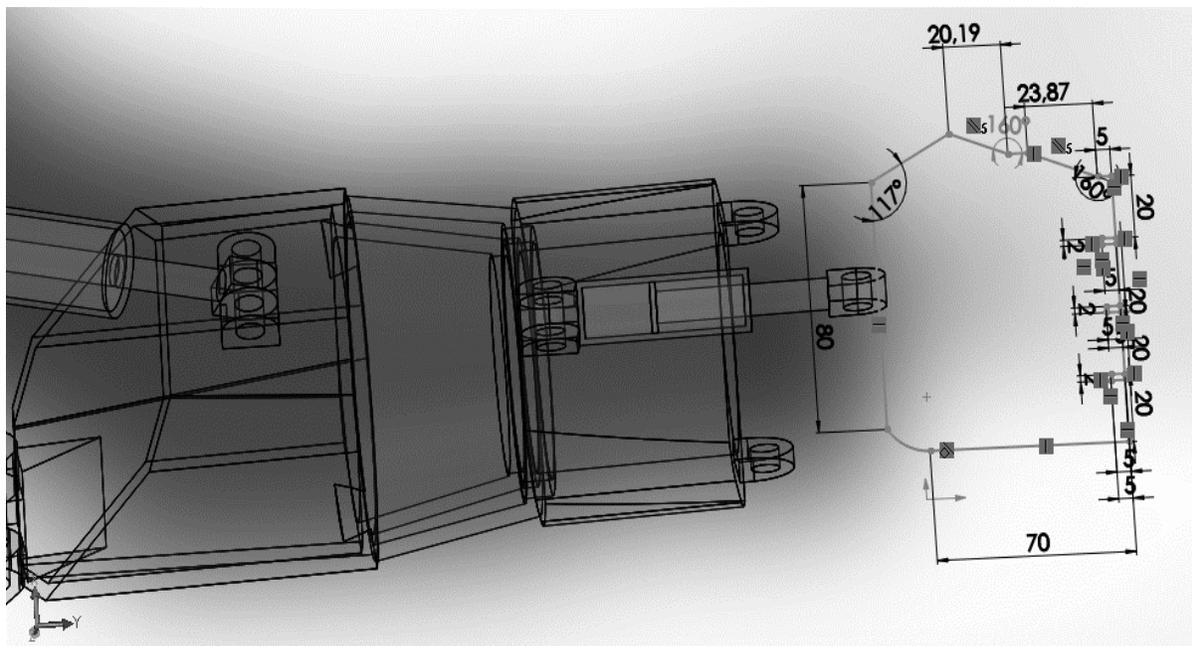


Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones De La Mano Derecha

La estructura general de la mano derecha cuenta con una estructura geométrica que permite al operador ingresar su mano completamente hasta los nudillos, con las dimensiones mostradas en la figura N°22, de tal manera que esta sección se ajuste proporcionalmente a la medida de cualquier operador. Así como el diseño anteriormente indicado en la estructura del brazo, el material más indicado para su fabricación es el utilizar lámina galvanizada de un calibre considerable que resista la torsión de la fuerza neumática.

*Figura 22. Dimensiones de la Mano Derecha*

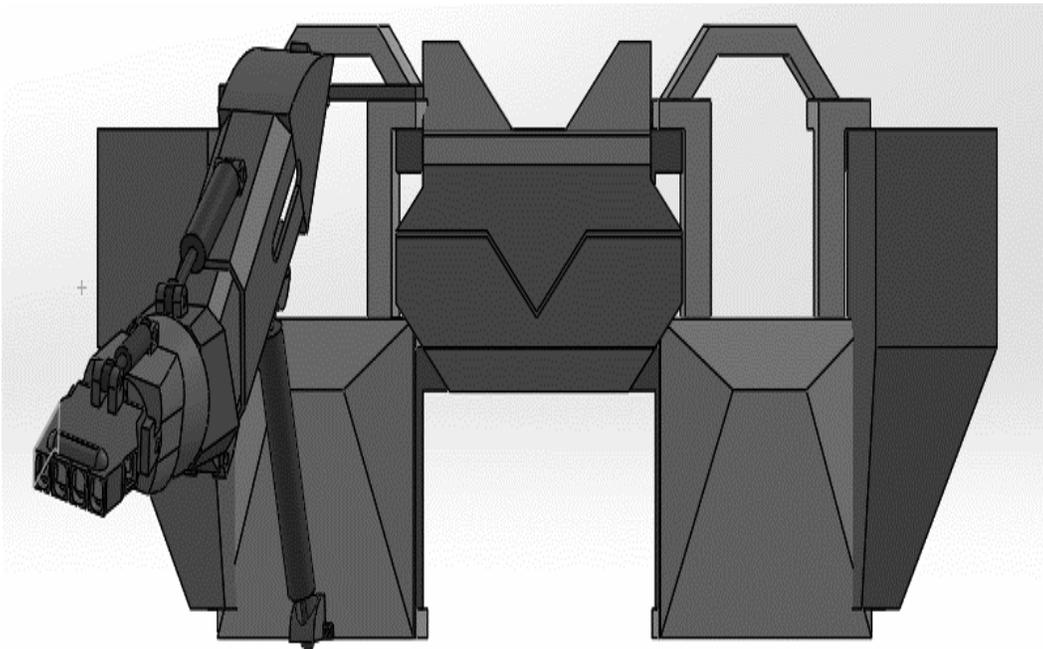


Fuente: Elaboración Propia

### Diseño General Del Exoesqueleto En Apertura Para Ingreso

En esta etapa podemos apreciar el diseño general del prototipo exoesqueleto, como lo indica la figura N°23, la cual se encuentra en posición de apertura para facilitar el ingreso al operario.

*Figura 23. Diseño General del Exoesqueleto*



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2 Desarrollo De Prototipo Para La Optimización De Dimensiones Irregulares

En esta etapa se modelará las dimensiones de la estructura fija y móvil del exotraje, empezando por la estructura que recubre el torso, en el cual se suspenderá la mayor parte del peso del sistema general. Para este desarrollo se emplearán materiales muy ligeros y de bajo costo con el propósito de obtener como resultado varias plantillas que servirán como bosquejo al momento de trabajar con el material idóneo y así prevenir pérdida de material cuando se requiera corregir cualquier irregularidad que pueda sobre costear el desarrollo del exoesqueleto.

A continuación, se identificarán los materiales y herramientas que se emplearán para el desarrollo del prototipo:

#### Materiales:

- ✓ 4 pliegos de cartón paja
- ✓ 6 barras de silicona
- ✓ 2 tornillos de 1/8 y media pulgada con sus respectivos tornillos y arandelas
- ✓ 1 cinta transparente
- ✓ 4 metros de madera de valso

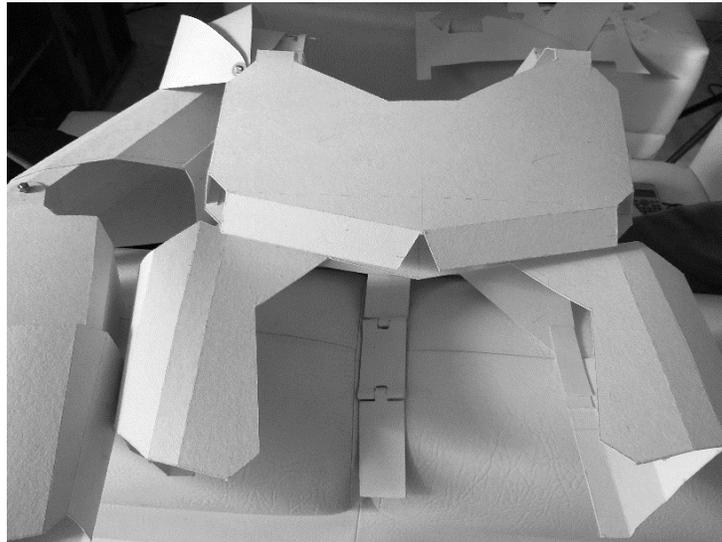
### Herramientas:

- ✓ Pistola de silicona
- ✓ Tijeras
- ✓ Regla
- ✓ Marcador
- ✓ Lápiz
- ✓ Borrador
- ✓ Bisturí

### Estructura fija y móvil del exoesqueleto

Como se puede observar en la figura N°24, encontramos la cubierta fija del torso fabricada en cartón paja, cuyas características de diseño permite ocultar todos los componentes mecánicos y electrónicos en 4 aberturas que se encuentran distribuidas en la parte dorsal y pectoral logrando equilibrar proporcionalmente el peso sobre el centro de nuestro cuerpo.

*Figura 24. Prototipo de la Sección Dorsal y Pectoral*



Fuente: Elaboración Propia

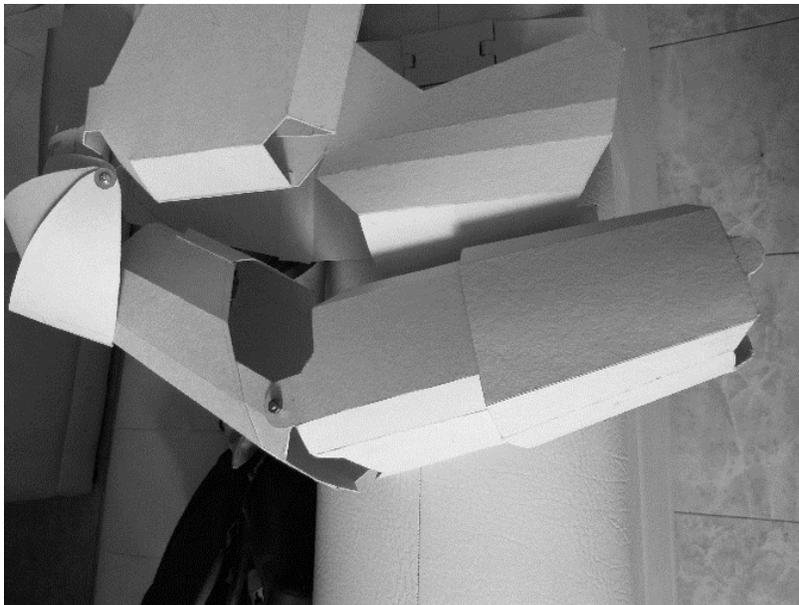
Es importante tener en cuenta que en este prototipo no se han contemplado los detalles electrónicos o mecánicos, debido a que sus dimensiones pueden variar conforme el peso del material y la modificación de las válvulas neumáticas por ser una de las secciones más complejas del exotraje.

#### Prototipo de la Extremidad Superior Derecha

En esta sección se modelará la extremidad superior derecha, cuyo material ligero y económico permite modificar con facilidad el área de contacto con respecto al brazo real de una persona; es importante tener en cuenta que el diseño final de la extremidad superior derecha debe ser cómoda y liviana, ya que su periodo de trabajo en la industria automotriz sería de 8 horas consecutivas.

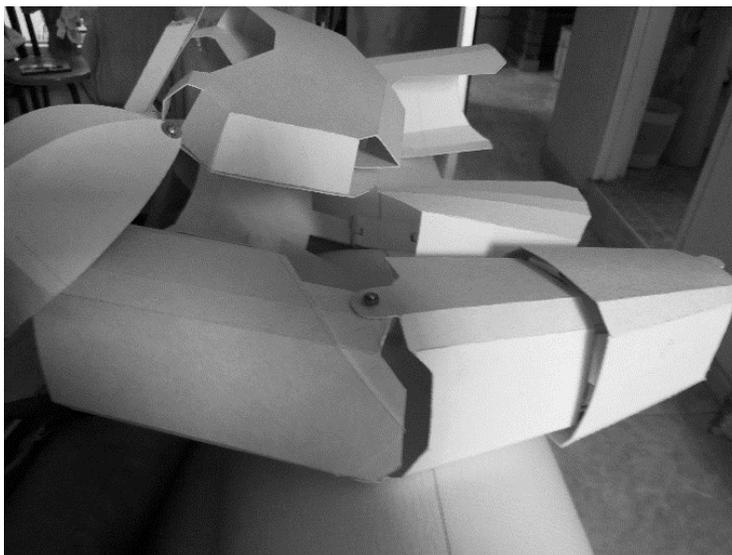
En la figura N°25 y 26 se puede apreciar la extremidad superior derecha la cual cuenta con un eje de apertura y cierre desde el centro del codo, con un Angulo de libertad menor a 70 grados. Teniendo en cuenta el espacio relativo que debe considerarse para la ubicación de los cilindros neumáticos que estarán fijados en el codo, en el hombro y muñeca. Sin embargo, así como se puede apreciar en la figura no se ha tenido en cuenta los cilindros neumáticos, ya que el diámetro del embolo puede variar, conforme al peso del material que se empleara en el montaje original.

*Figura 25. Prototipo de la Extremidad Superior*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 26. Prototipo de la Extremidad Superior*



Fuente: Elaboración Propia

### **3.3 Construcción Fija y Móvil del Exoesqueleto**

#### Herramientas Empleadas en la Construcción

- ✓ Pulidora
- ✓ Taladro
- ✓ Segueta
- ✓ Caladora
- ✓ Destornillador de punta plana y de estrella
- ✓ Alicata
- ✓ Remachadora
- ✓ Metro
- ✓ Regla
- ✓ Marcador

### Materiales Empleados en la Construcción

- ✓ 8 metros de tubo rectangular de aluminio 20x40 mm
- ✓ 5 docenas de remaches de media pulgada
- ✓ 2 bisagras grandes
- ✓ 6 tornillos de 5/32 pulgadas, longitud 3 pulgadas con tuercas y arandelas
- ✓ 2 servomotores SG5010 de 12kg/cm

En esta etapa se construirá del chasis, cuyo soporte estructural estará suspendido en el torso del operario a cargo. Sin embargo, es importante considerar que el peso de la estructura fija debe ser de un material resistente y liviano, para ello el material ideal es emplear un tubo rectangular de aluminio, cuyas dimensiones son de 20x40 mm, con un espesor de 1mm. En la figura N°27 se puede apreciar el costado derecho e izquierdo del chasis, el cual cuenta con refuerzos horizontales, tal como se había planteado en SOLIDWORKS, para darle más firmeza al conjunto estructural.

*Figura 27. Costado Derecho e Izquierdo del Chasis*

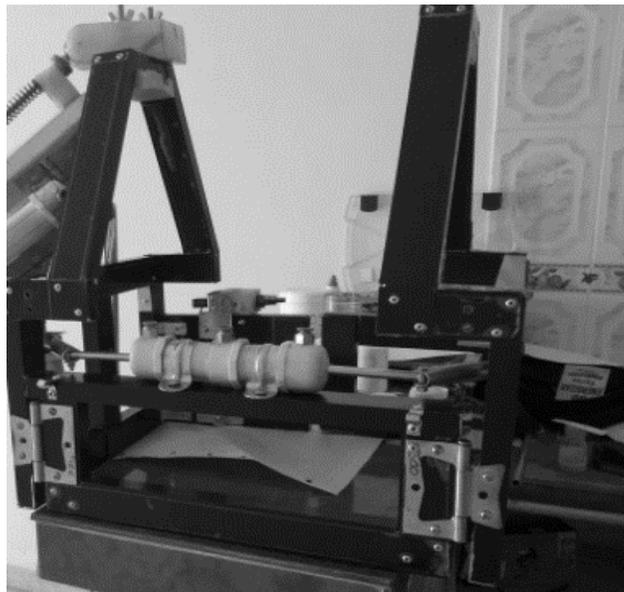


Fuente: Elaboración Propia

Para fijar sólidamente cada una de las secciones, se utilizarían remaches junto con pequeños refuerzos angulares para darle más robusto al chasis, El aluminio es un metal blando con un grado de oxidación inferior al hierro, además de lo liviano, lo cual lo hace perfecto en este montaje.

En la siguiente etapa del proceso podemos apreciar en la figura N°28, la cubierta pectoral del chasis la cual se encuentra sujeta con el costado derecho e izquierdo como se puede apreciar anteriormente en la figura N°28, cuyas uniones se han fijado con una bisagra en cada uno de los lados, permitiendo un ángulo de libertad de 45 grados, con el propósito de tener un acceso cómodo y seguro al exotraje.

*Figura 28. Sección Pectoral Fijada con Bisagras*



Fuente: Elaboración Propia

En la parte superior de cada una de las bisagras se fijará 2 pequeños brazos de aluminio cuyo diámetro es de 11 mm, los cuales estarán fijados en los vástagos del cilindro neumático doble efecto para controlar la apertura y el cierre del exotraje, así como se puede observar en la figura N°28

Finalmente se fijó en la sección dorsal, 2 alas fijas en cada uno de los costados, que permitirán que el exotraje este mejor sujeto al operario a cargo. También es importante indicar que las 2 a las traseras cuentan con un grado de libertad de 45 grados cuyos límites de apertura y cierre están controlados por la longitud del vástago del cilindro neumático, de esta manera se garantizara que la estructura de aluminio no esté sometida a fuertes torsiones que superen los 45 grados. En la figura N°29 se puede observar la construcción total del chasis en el cual se puede apreciar claramente el Angulo de apertura para ingresar de forma cómoda y segura al exotraje.

En la figura N°30 podemos apreciar en el campo de prueba, el montaje del chasis suspendido sobre el torso real de un sujeto de prueba, el cual se ajusta perfectamente y permite maniobrar cualquier articulación sin ninguna restricción.

*Figura 29. Montaje Completo del Chasis*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 30. Modelo Preliminar*



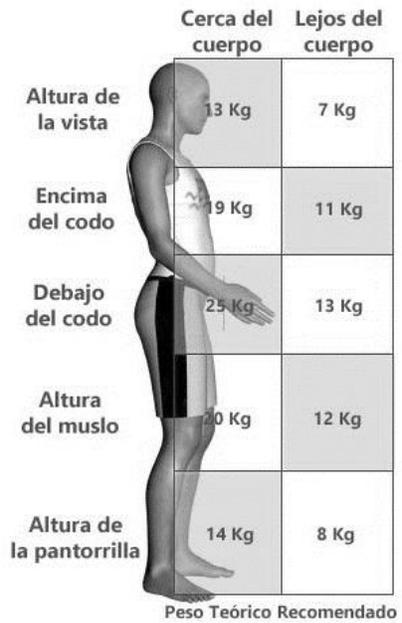
Fuente: Elaboración Propia

### **3.4 Cálculos Matemáticos de la Presión Neumática**

#### **Peso Total Del Brazo Con Carga Máxima**

Según estudios que se han experimentado en el sector de riesgos laborales, indican que una persona de género masculino mayor a 18 años, tiene la capacidad de levantar cargas de 20 kg desde el suelo con la espalda recta y con los brazos recogidos; sin embargo, cuando se realiza la misma operación con los brazos completamente extendidos el sujeto tiene la capacidad de sostener una carga inferior a 7 kilogramos si el objeto es levantado a la altura de los hombros; el exotraje permitirá duplicar la fuerza de la extremidad superior derecha de tal forma que el objetivo del exotraje es poder levantar una carga de 10 a 12 kg a la altura de los hombros, en la figura N°36 se puede apreciar el peso que una persona de género masculino puede levantar dependiendo la postura de sus brazos y piernas (Diego mas, 2015).

Figura 31. Levantamiento de Peso Según la Postura



Duplicando fuerza de un brazo con el brazo estirado = 12 Kg

$$F = m * a$$

$$F = 12 \text{ Kg} * 9,8$$

$$F = 117.60 \text{ N} = \text{Fuerza requerida}$$

$$\text{Momento de fuerza} = 117.60 \text{ N} * 0,65 \text{ M}$$

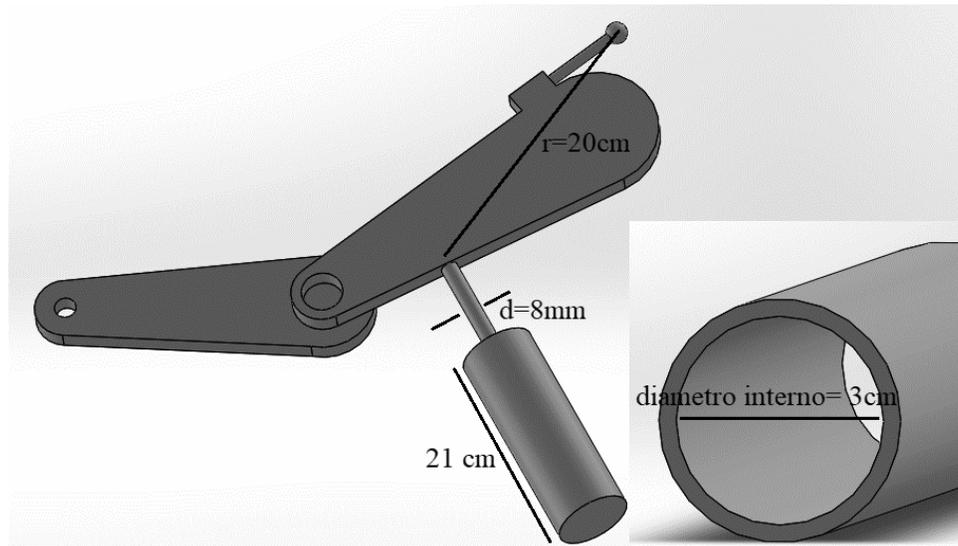
$$T = 76.44 \text{ NM}$$

Fuente: (Diego mas, 2015) *Ergonautas*. Obtenido de

<https://www.ergonautas.upv.es/metodos/ginsht/ginsht-ayuda.php>

**Cilindro Neumático Antebrazo**

*Figura 32. Dimensiones del Antebrazo Mecánico Para Análisis Matemático*



Fuente: Elaboración Propia

Área del cilindro =  $\pi r^2$

Radio cilindro = 1,5cm       $\pi * (1.5)^2 = 7,068 \text{ cm}^2$

Presión de trabajo = 150 psi

Conversión psi → pasc       $150 \text{ psi} \times \frac{100.000 \text{ pas}}{14,7 \text{ PSI}}$

1020408,163 pas

$1020408,163 \text{ N/m}^2$

Conversión  $cm^2 \rightarrow m^2$

$$7,068 \text{ cm}^2 \times \left(\frac{1m}{100 \text{ cm}}\right)^2 = 7,068 \text{ cm}^2 \times \frac{1m^2}{100 \text{ cm}^2}$$

$$= \boxed{0,000706 \text{ m}^2}$$

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza de Avance}}{\text{Area}} ;$$

Fuerza de avance = presión x área

$$\text{Fuerza de avance } 1020408,163 \frac{N}{\text{m}^2} \times 0,000706 \text{ m}^2$$

$$\text{Fuerza de avance} = 721,224 \text{ N}$$

$$\text{Fuerza requerida Avance} = 20 \text{ Kg} \times 9,8 \frac{m}{\text{seg}^2}$$

$$\text{Fuerza requerida Avance} = \boxed{196 \text{ N}}$$

### Momento de Fuerza del Antebrazo Mecánico

$$F = 721,224 \text{ N}$$

$$20 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$$

$$0,20 \text{ m}$$

$$\text{Momento de Fuerza (T)} = 721,224 \times 0,20 \text{ m}$$

$$T = 144,24 \text{ Nm}$$

### Fuerza de Retroceso

$$\text{Área de vástago} = \pi r^2 \quad r = 4 \text{ mm}$$

$$\text{Área de vástago} = \pi(4)^2$$

$$\text{Área de vástago} = 50,26 \text{ mm}^2$$

### Conversión en metros

$$= 50,26 \text{ mm}^2 \times \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right)^2$$

$$= 50,26 \text{ mm}^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{1000000 \text{ mm}^2}$$

$$= 0,000050260 \text{ m}^2$$

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área Cilindro} - \text{Área de Vástago}}$$

Fuerza = Presión (Area cilindro – Area de Vástago)

Fuerza = 1020408,163 (0,000706 m<sup>2</sup> - 0,00005026m<sup>2</sup>)

Fuerza = 669,122 N

Momento de fuerza en retroceso

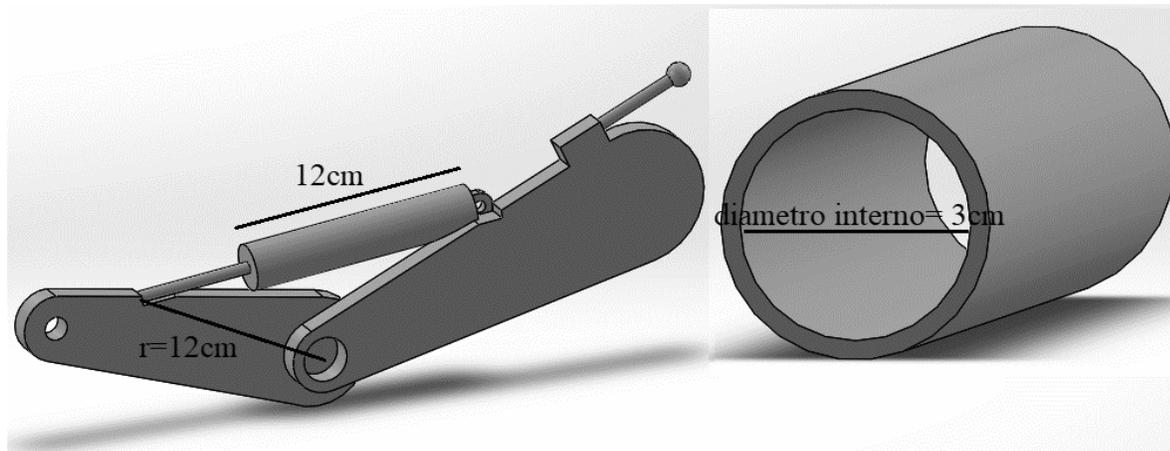
$T = F \times r$

$T = 669,122 \times 0,20\text{m}$

$T = 133,82 \text{ NM}$
-------------------------

### Cilindro Neumático De Brazo

Figura 33. Dimensiones del brazo Mecánico Para Análisis Matemático



Fuente: Elaboración Propia

Área de cilindro = 0,000706 m<sup>2</sup>

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza de Avance}}{\text{Area}}$$

Fuerza avance = presión x área

$$\text{Fuerza avance} = 1020408,163 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0,000706 \text{ m}^2$$

Fuerza avance = 720,40 N

$$\text{Fuerza requerida de avance} = 40 \text{ Kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$$

Fuerza requerida de avance = 392 N

### Momento de Fuerza de Brazo Mecánico

$$F = 720,40\text{N}$$

$$T = F \times r$$

$$r = 12 \text{ cm}$$

$$T = 720,40 \times 0,12 \text{ m}$$

$$T = 86,44 \text{ Nm}$$

$$12 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$$

$$0,12 \text{ m}$$

Fuerza de retroceso

$$\text{Área de vástago} = 0,000050260 \text{ m}^2$$

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área Cilindro} - \text{Área de Vástago}}$$

$$\text{Fuerza} = 1020408,163 (0,000706 \text{ m}^2 - 0,00005026 \text{ m}^2)$$

669,122 N
-----------

### Momento de Fuerza Retroceso

$$T = F \times r$$

$$T = 669,122 \text{ N} \times 0,12 \text{ m}$$

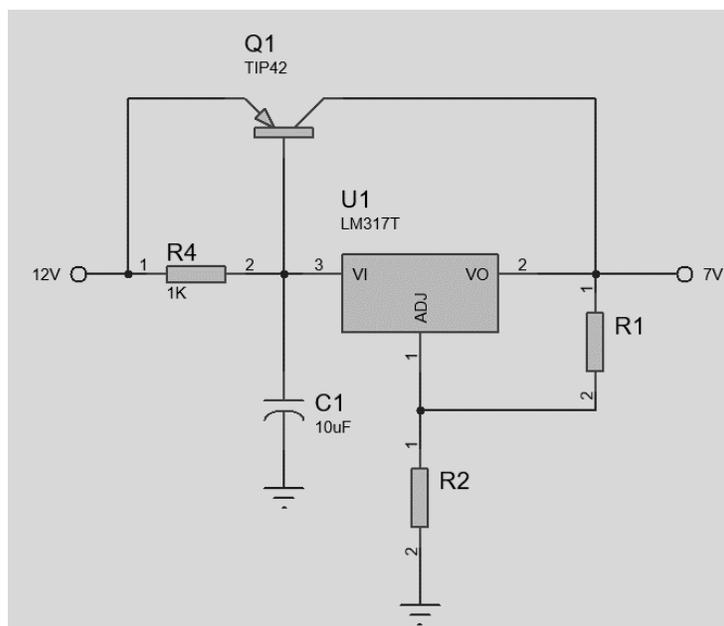
$$T = 80,29 \text{ Nm}$$

El objetivo del exoesqueleto es duplicar la fuerza, sin embargo, después de los resultados matemáticos de presión se puede garantizar que la fuerza suministrada está por encima de la fuerza deseada.

### Cálculos Matemáticos De Circuito Electrónico

Cálculos de regulador variable LM 317 para suministrar 7V y 3A y alimentar los servomotores.

*Figura 34. Esquemático del Regulador Variable LM317*



Fuente: Elaboración Propia

$$V_{out} = 1,25 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

$$7 = 1,25 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

$$7 = 1,25 + \frac{1,25 R2}{1K}$$

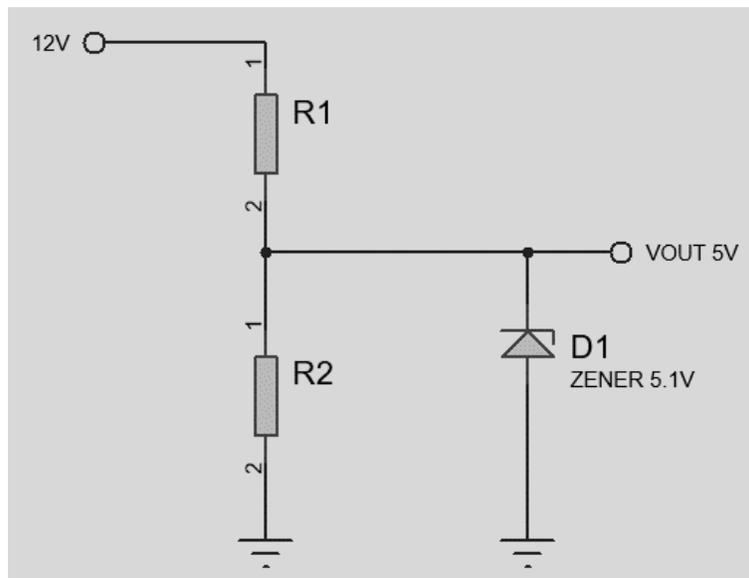
$$(7 - 1,25) 1k = 1,25 R2$$

$$\frac{5750}{1,25} = R2$$

$$R2 = 1,5 K\Omega$$

### Divisor de Voltaje de Sensor ATOMS – S01 Con Protección De Zener

Figura 35. Esquemático de Divisor de Voltaje



Fuente: Elaboración Propia

$$V_{out} = \frac{R_2 \cdot V_{in}}{R_2 + R_1}$$

$$5 = \frac{20K \times 12V}{20K + R_1}$$

$$100000 + 5 R_1 = 240000$$

$$5 R_1 = 240000 - 100000$$

$$R_1 = \frac{240000 - 100000}{5}$$

$$R_1 = 28000 \Omega$$

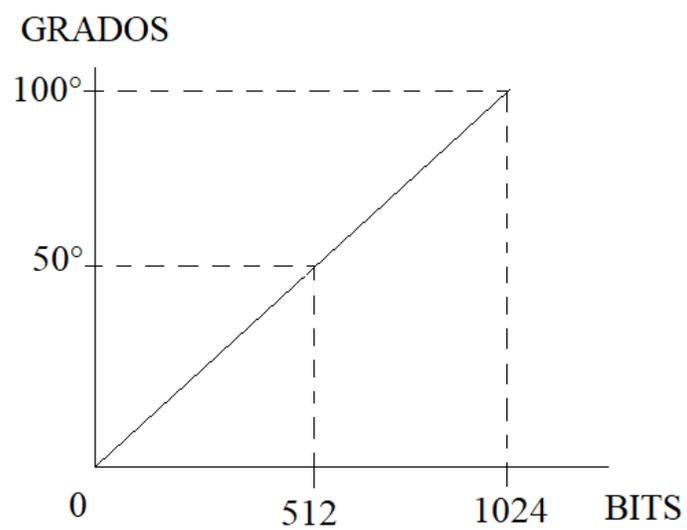
$$\text{Comercial} = 30K \Omega$$

$$V_{out} = 4,8V$$

Voltaje máximo es de 5.5 v que tolera el microcontrolador

### Relación Lineal Grados Vs Bits Para Controlar los Servomotores

*Figura 36. Grafica de Grados Vs Bits*



Fuente: Elaboración Propia

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} \quad m = \frac{100^\circ - 50^\circ}{1024 - 512} \quad m = 0,097 \quad \text{La pendiente de la recta}$$

*Formula General de la Ecuacion Lineal*

$$Y - Y1 = m(X - X1); \quad Y - 50 = 0,097(X - 512)$$

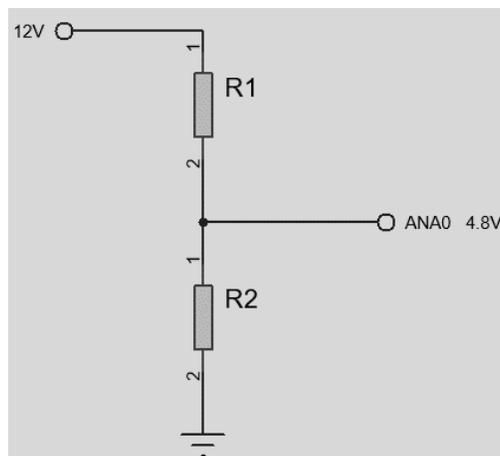
$$Y - 50 = 0,097X - 50;$$

$$Y = 0,097X$$

*Con esta funcion podemos controlar gradualmente los servomotores de acuerdo a la presion ejercida sobre los sensores*

**Divisor de Voltaje Para Monitorear Potencial Eléctrico de la Batería por Medio de un Puerto Analógico del Microcontrolador**

Figura 37. Esquemático de Divisor de Voltaje para Batería



Fuente: Elaboración Propia

$$V_{out} = R2 * \frac{V_{in}}{R2 + R1}$$

$$5V = \frac{10000 * 12}{10000 + R1}$$

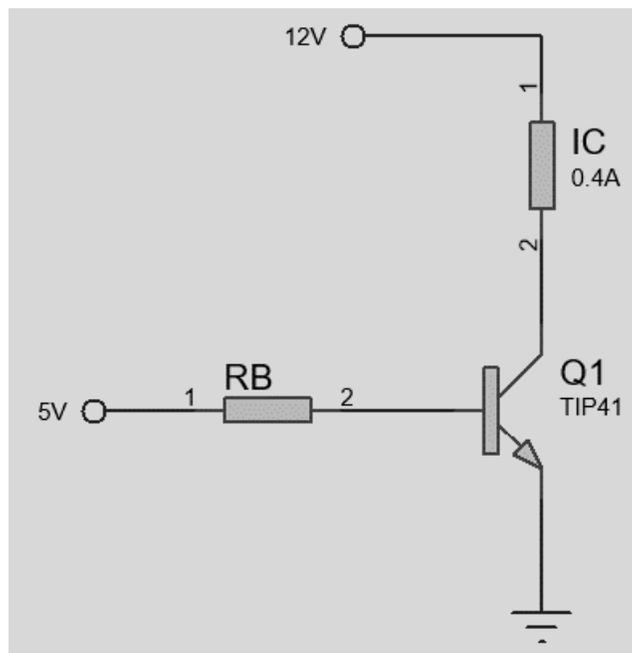
$$5V(10000 + R1) = 120000 ; \quad 50000 + 5R1 = 120000$$

$$R1 = 14000\Omega$$

Valor Comercial= 15K $\Omega$

**Saturación del Transistor TIP 41C Para Controlar Ventilador de Refrigeración del Circuito**

*Figura 38. Esquemático de Saturación del Transistor TIP41C*



Fuente Elaboración Propia

Malla del Colector

$$- 12 + 0,4RC + V_{CE} = 0$$

$$B_{cc} \text{ o Ganancia medida del transistor} = 526$$

$$RC = \frac{12}{0,40} \quad RC = 30 \ \Omega$$

$$B_{cc} = \frac{IC}{IB} \quad 526 = \frac{0,40}{IB} \quad IB = \frac{0,40}{526} \quad IB = 0,000760 \text{ A}$$

Malla de Base

$$- 5 + 0,000760 RB = 0$$

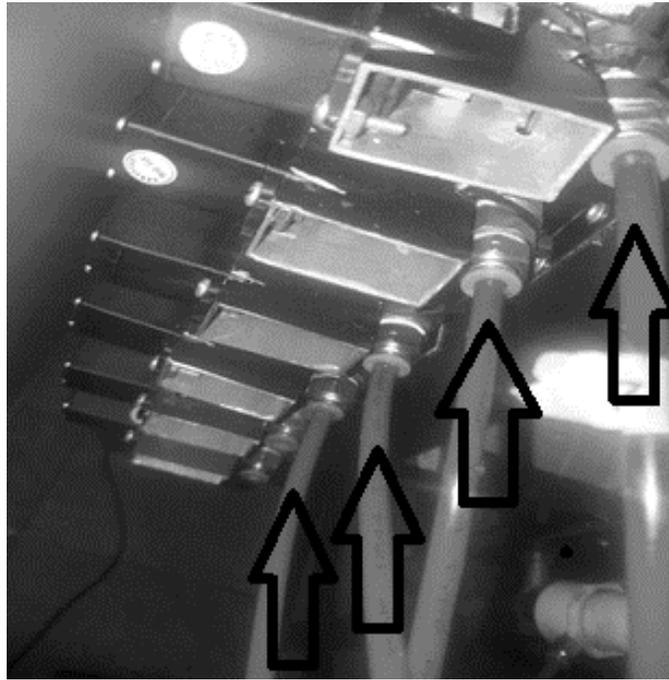
$$RB = \frac{5}{0,000760} \quad RB = 6578,94 \ \Omega$$

Valor Comercial = 5K  $\Omega$

### **Rendimiento General del Sistema Neumático**

En la figura N°39 se puede apreciar la conexión de la red neumática hacia la galería de las servovalvulas y muy cerca del borde de la conexión se ha perforado intencionalmente el tubin como lo indican las flechas con un diámetro de 0,001 metros,, tamaño suficiente para bajar la presión del sistema y poder controlar el avance y retroceso de los cilindros neumáticos, ya que la galería de servovalvulas no fue diseñada para controlar avance y descompresión al tiempo que se mueven gradualmente los servomotores.

*Figura 39. Perdida de Presión Intencional*



Fuente: Elaboración Propia

Datos Anteriormente Calculados

Fuerza de Avance de Brazo y Antebrazo Mecánico= 721,22N

Dada la Formula Despejamos la Masa

$$F = m * a$$

$$721,24N = m * 9,8 \text{ m}/\text{seg}^2$$

$$\frac{721,22N}{9,8} = m$$

*Capacidad de carga sin perdidas de presion*

$$m = 73,59Kg$$

La pérdida de presión en el sistema según el diseño se estima que oscile más o menos en un 10%, perdida depreciable que no afectaría con el desempeño del sistema neumático.

$$\frac{73,59Kg * 10\%}{100\%} = 7,35Kg; \quad 73,59Kg - 7,35Kg = 66,24Kg$$

*Capacidad de carga con perdidas de presion = 66,24Kg*

*Hallamos la fuerza y posteriormente la presion con los datos obtenidos en perdidas*

$$F = 66,24Kg * 9,8 \text{ m/seg}^2$$

$$F = 649,15N$$

$$P = \frac{649,15N}{0,000706m^2}; \quad P = 919478,75 \text{ pasc}$$

*Convertimos unidades a PSI*

$$919478,75 \text{ pasc} * \frac{14,7PSI}{100000 \text{ pasc}} = 135,16 \text{ PSI}$$

*Presion neumatica sin perdidas = 150 PSI*

*Finalmente calculamos el rendimiento neumatico de todo el sistema*

$$\text{rendimiento neumatico} = \frac{135,16PSI}{150PSI} * 100\% \quad \text{rendimiento neumatico} = 90,10\%$$

### 3.5 Construcción de Servovalvulas

#### Herramientas Empleadas:

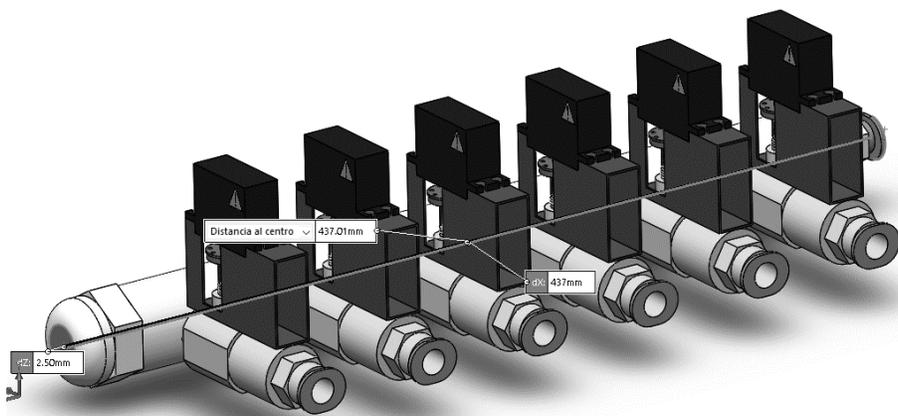
- ✓ Taladro de media pulgada
- ✓ Pulidora
- ✓ Machuelo con rosca 1/8 NPT
- ✓ Caladora
- ✓ Hombro solo
- ✓ Destornilladores
- ✓ Martillo
- ✓ Alicata
- ✓ Bisturí

#### Materiales Empleados:

- ✓ 6 uniones de media pulgada en PVC
- ✓ 2 tapones de media pulgada
- ✓ 6 servomotores de 11 kg/cm
- ✓ 6 llaves de paso tipo bola de bronce de 1/4
- ✓ 1 acople rápido de 1/4
- ✓ 0.5 metros de tubo de aluminio de 2 x 3 cm

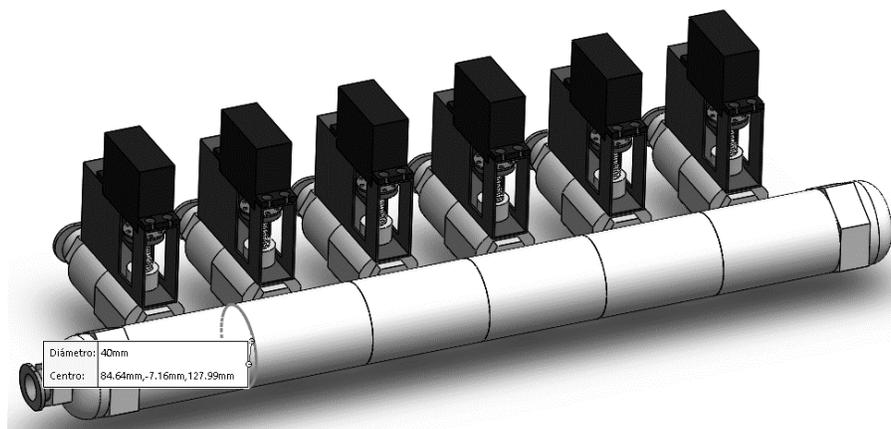
La culata del sistema de distribución será la encargada de direccionar la presión neumática mediante llaves de paso ubicados perpendicularmente a la culata de distribución mostrados en la figura N°43 y 44. Debido a su longitud y volumen, es más apropiado ubicar el conjunto de servovalvulas en la parte posterior del chasis.

*Figura 40. Diseño Culata de Sistema Neumático*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 41. Vista posterior del conjunto de servovalvulas*



Fuente: Elaboración Propia

El sistema de servovalvulas o también conocida como galería de distribución neumática, consta de un cuerpo flexible de PVC conformado por uniones de media pulgada el cual facilita posicionar cada una de llaves de paso y así lograr optimizar espacio en el sistema. En uno de los costados del conjunto de uniones se puede apreciar un acople rápido de  $\frac{1}{4}$  por el cual se conectará la fuente de compresión neumática mediante tubo flexible (tubin); antes de alimentar con aire las servovalvulas se recomienda controlar la presión mediante la llave de paso a un 50% de su capacidad para evitar rupturas del sistema que puedan generar fugas a mediano plazo.

En la figura N°45 y 46 se logra apreciar la construcción final del conjunto de servovalvulas ya montado en la parte posterior del exotraje con sus respectivas conexiones neumáticas hacia los cilindros neumáticos; este modelo garantiza complemente el control de la presión sin presentar la más mínima fuga de aire y de esta manera poder suministrar toda la presión requerida al embolo transformándola en energía mecánica y finalmente superar la fuerza requerida.

*Figura 42. Construcción Final de Servovalvulas*



Fuente: Elaboración Propia

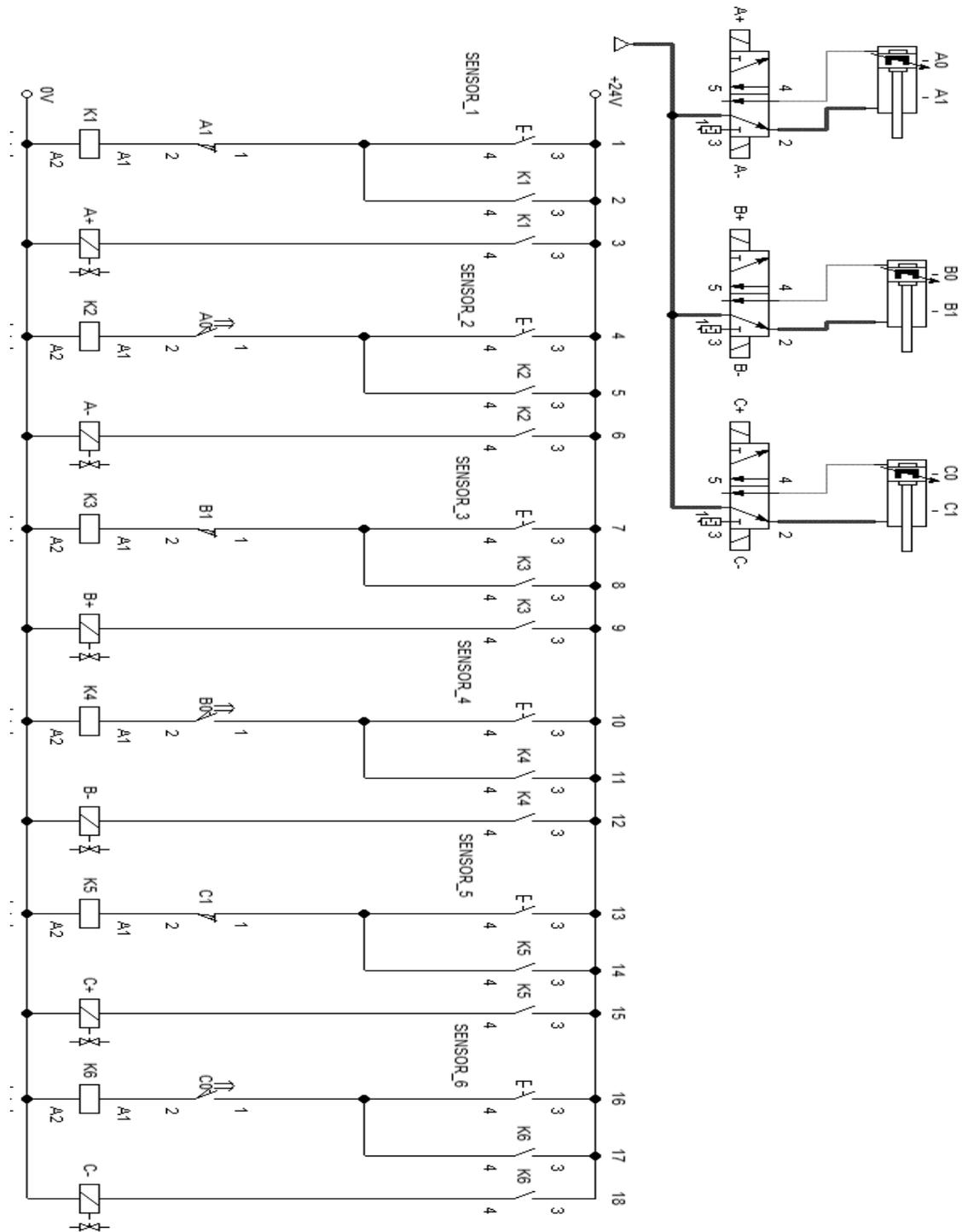
*Figura 43. Montaje de Servovalvulas*



Fuente: Elaboración Propia

En la figura N°47, podemos observar el diseño esquemático de toda la red neumática del exoesqueleto que se ha diseñado en el software FLUIDSIM, gracias a esta herramienta podemos visualizar con más comodidad la estructura; sin embargo, es importante aclarar que las válvulas de gobierno y los cilindros neumáticos del simulador son diferentes a las que se emplearán en el sistema real, por lo tanto esta red neumática tan solo nos proporcionara un bosquejo parcial de lo que se pretende en el sistema real.

Figura 44. Esquema neumático



Fuente: Elaboración Propia

### **3.6 Construcción Mecánica de la Extremidad Superior Derecha**

Antes de construir los cilindros neumáticos es necesario contar con la base donde estos se fijarán, ya que el punto de apoyo donde descansara el vástago es crucial para aprovechar al máximo su potencia; como ya se había mencionado anteriormente el material más apropiado para la construcción de la extremidad superior derecha sería de lámina galvanizada de calibre 22, debido a su bajo costo y su fácil manipulación. A continuación, se relacionarán los materiales empleados y las herramientas de trabajo.

#### **Herramientas Empleadas**

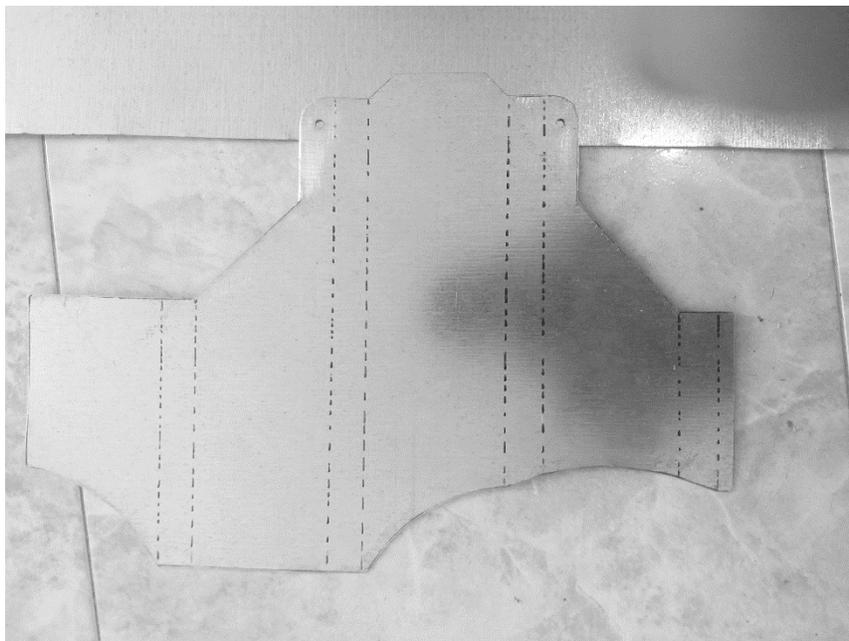
- ✓ Martillo
- ✓ Pulidora
- ✓ Tijera para lamina
- ✓ Marcador
- ✓ Lija #80
- ✓ Taladro
- ✓ Remachadora
- ✓ Mototool
- ✓ Hombre solo
- ✓ Alicata

### **Materiales Empleados**

- ✓ 1 pliego de lámina galvanizada calibre 22
- ✓ 3 docenas de remaches de 4mm de diámetro

En esta etapa de construcción es importante contar con la plantilla que ya se había trabajado anteriormente en el modelamiento del prototipo, teniendo en cuenta que inicialmente se empleara la plantilla de la sección correspondiente al hombro, para luego ser croquizado sobre la lámina con un marcador de punta fina para evitar medidas indeseables, así como se puede apreciar en la figura N°48.

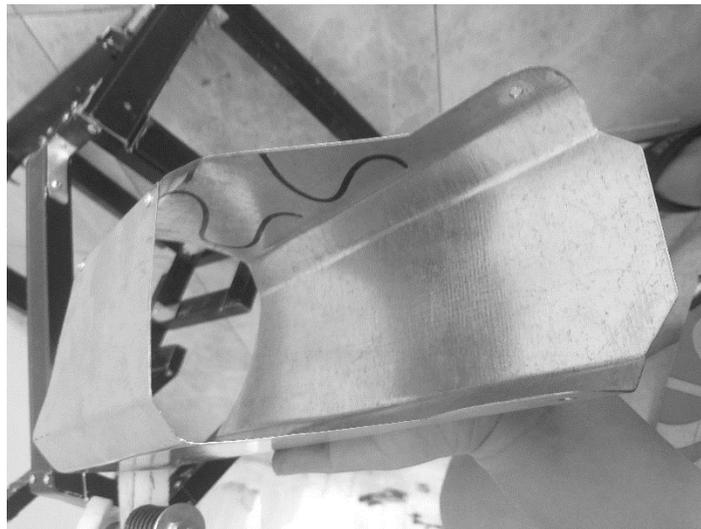
*Figura 45. Croquis de lámina para el hombro*



Fuente: Elaboración Propia

Una vez se halla croquizado correctamente sobre lamina es posible efectuar el corte teniendo mucho cuidado de las esquinas que pueden fácilmente ocasionar graves lesiones; una vez obtenida la pieza deseada nos aseguramos de pulir con una lija #80 o con una pulidora pequeña para eliminar pequeñas impurezas; después con el taladro se realizan las perforaciones necesarias que tengan relación con el ángulo de giro para fijar la sección del codo utilizando una broca de 1/8, una vez obtenidos los agujeros en la sección deseada procederemos a doblar con cuidado cada uno de los pliegues que se encuentran punteados con marcador hasta lograr unir ambos extremos de la pieza así como se puede observar en la figura N°49.

*Figura 46. Extremidad superior derecha del hombro*



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, para lograr fijar la pieza desde sus extremos, se utilizan remaches de 4 mm de diámetro garantizando así una sólida y compacta estructura la cual estará sometida a grandes cargas.

Una de las etapas más complejas en la sección del hombro, es el poder lograr ubicar un punto de rotación que no limite el movimiento del hombro, respetando los 4 grados de libertad requeridos para esta articulación; una de las alternativas más favorables fue el de construir una rotula sintética compuesta por empac y resina de poliéster que ira fijada a la estructura de aluminio a la altura del hombro, garantizando una sólida resistencia y una libertad rotacional de 4 grados así como se puede apreciar en la figura N°50.

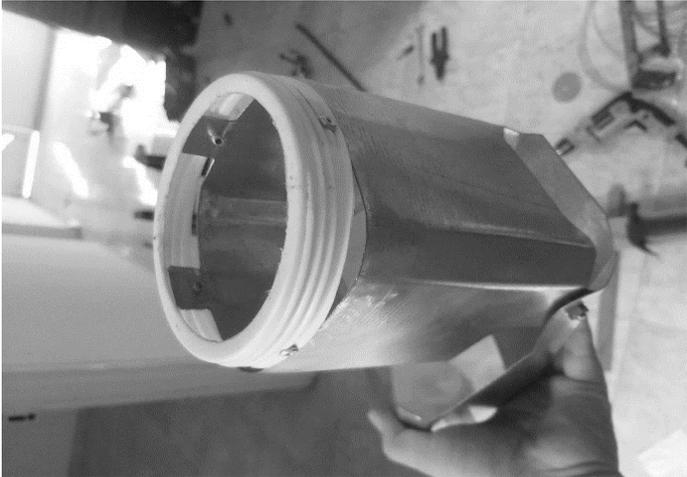
*Figura 47. Manguito rotador sintético*



Fuente: Elaboración Propia

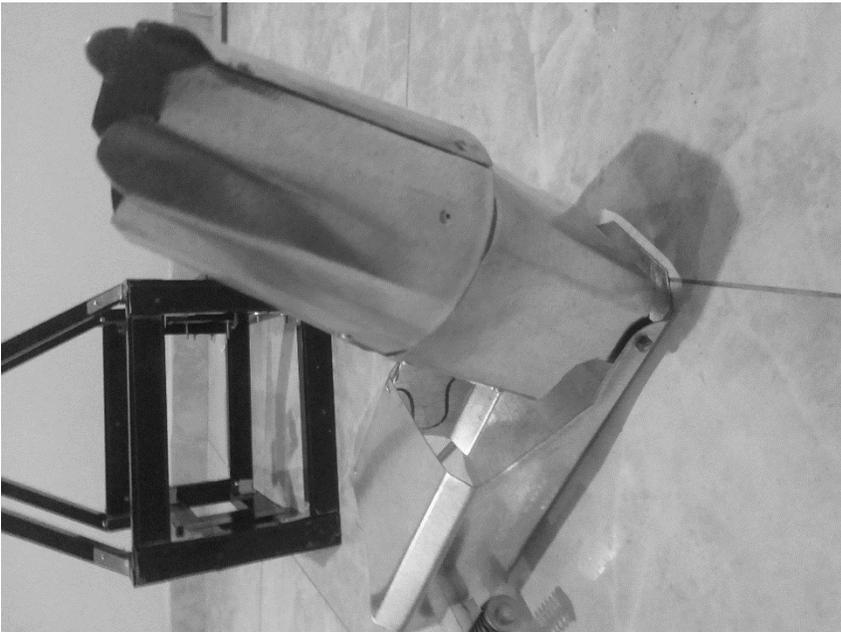
De la misma forma como se había empleado inicialmente la plantillas, repetimos el proceso para obtener las piezas correspondientes al antebrazo y la mano, con la única diferencia que la sección del antebrazo está compuesta por 2 piezas, para lograr un movimiento rotacional de 90 grados sobre su mismo eje, debido a que el antebrazo de una persona puede rotar cerca de 90 grados gracias a la interacción de 2 huesos denominados cubito y radio. En la figura N°51 y 52 podemos apreciar claramente las 2 piezas que forman parte del antebrazo, las cuales están unidas por medio de una rosca plástica de 80 mm de diámetro, el cual nos garantiza la rotación deseada.

*Figura 48. Pieza 1 del antebrazo*



Fuente: Elaboración Propia

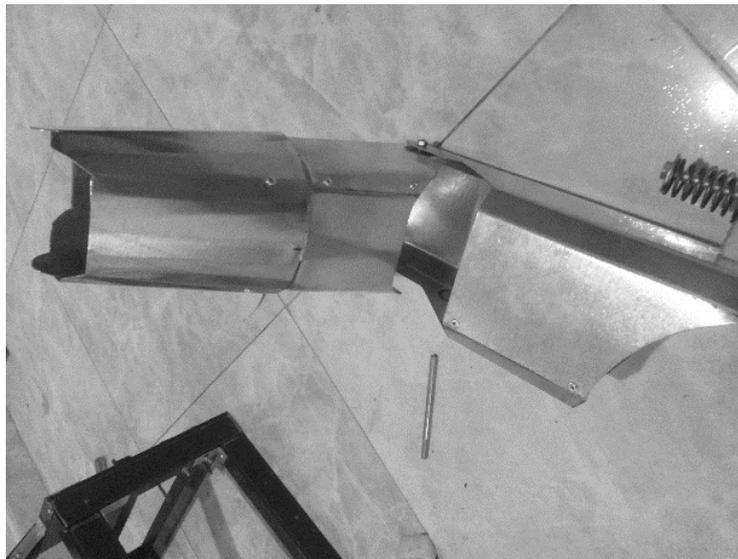
*Figura 49. Pieza 1 y 2 del antebrazo acopladas*



Fuente: Elaboración Propia

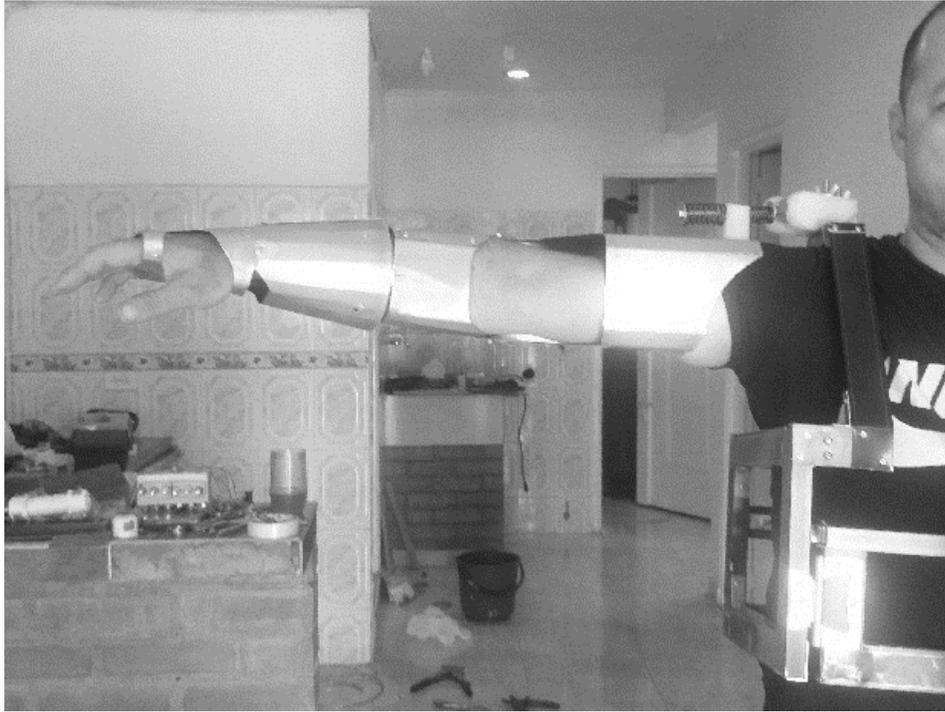
En la figura N°53 se puede apreciar el ensamblaje de la extremidad superior derecha la cual está compuesta por el brazo, antebrazo y la mano, los cuales tienen una relación de posición entre si de forma concéntrica y ajustados por medio de tornillos con rosca ordinaria y tuerca de seguridad, una vez culminada esta etapa es posible fijar toda la extremidad a la estructura de aluminio desde la rótula sintética como se puede ver en la figura N°54.

Figura 50. Extremidad completa



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 51. Extremidad fijada al chasis*



Fuente: Elaboración Propia

### **3.7 Construcción de Cilindros Neumáticos**

Para la construcción de los cilindros neumáticos es importante poner a prueba la extremidad superior derecha extruida en lamina para conocer las limitaciones de cada punto de giro, de esta manera se puede garantizar que las dimensiones de cada uno de los cilindros se ajusten apropiadamente a la articulación del hombro y antebrazo. A continuación, se relacionarán las herramientas requeridas y los materiales necesarios.

**Herramientas Empleadas**

- ✓ Cegueta
- ✓ Martillo
- ✓ Taladro
- ✓ Pulidora
- ✓ Hombro solo
- ✓ Alicata
- ✓ Metro

**Materiales Empleados**

- ✓ 1.5 metros de tubo PVC de presión de 1 pulgada
- ✓ 4 tapones de 1 pulgada
- ✓ 1/8 de caucho de 5 mm de espesor
- ✓ 4 arandelas de 1/4 grandes
- ✓ 4 tuercas
- ✓ 2 tornillos de cuerpo liso de un 1/4 de pulgada con una longitud de 5 y 8"
- ✓ 1 frasco pequeño de pegante para tubo
- ✓ 2 rotulas pequeñas de automóvil
- ✓ 4 racores de acople rápido

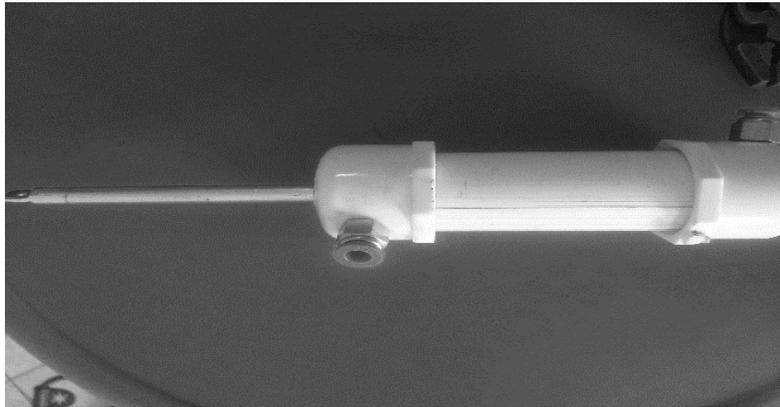
Uno de los materiales más apropiados y ligeros para la construcción de los cilindros neumáticos es el PVC, debido a que es liviano, de bajo costo y soporta presiones de hasta 130 psi. Una vez localizado el espacio que este mecanismo ocupara en la articulación del hombro y el codo, se procede a cortar 2 pedazos de 220 y 130 mm de longitud, asegurándonos que el corte sea rectilíneo para evitar imperfecciones que puedan ocasionar pequeñas fugas de aire.

Los tornillos de cuerpo liso serán utilizados como vástagos de cada uno de los cilindros, debido a que estos al tener una pequeña longitud de rosca en sus extremos, servirán para ajustar una pequeña lona de caucho redonda la cual estará prensada por 2 arandelas y asegurada por 2 tuercas y así finalmente obtener como resultado el embolo y el vástago en una sola pieza.

Es importante tener en cuenta que los cilindros neumáticos para este mecanismo serán de doble efecto y por eso es muy importante conservar internamente una pequeña tolerancia para que el embolo no toque por completo los tapones, ya que en cada uno de los extremos estarán fijados los racores de acople rápido para controlar la salida y entrada.

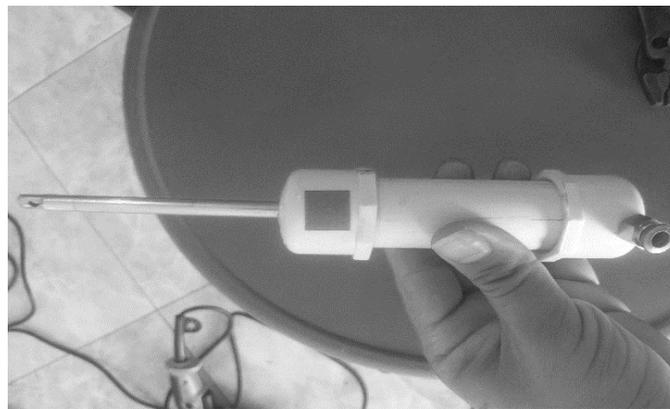
En la figura N°55 Y 56 se puede apreciar el cilindro neumático de la articulación del codo completamente terminado y puesto a prueba para asegurarnos de que no existan fugas; finalmente para fijarlo a la extremidad superior derecha se utiliza una bisagra y 2 pequeños ángulos los cuales estarán remachados fijamente a la lámina del brazo y antebrazo.

*Figura 52. Cilindro neumático del codo 1*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 53. Cilindro neumático del codo 2*



Fuente: Elaboración Propia

Para el cilindro neumático del hombro se utilizará la pieza de PVC de 220 mm de longitud y el tornillo de 8 pulgadas de largo que servirá como vástago en el sistema ya que este tendrá un recorrido superior al que se ubicará en la articulación del codo. Una vez terminada completamente la pieza, la sometemos a prueba de la misma manera como se había examinado el cilindro de la articulación del codo.

Una vez ya inspeccionado el cilindro neumático se fijarán 2 rotulas, una de ellas sobre la parte inferior del cilindro y la otra en la parte superior del vástago las cuales servirán como soporte y permitirán generar los 4 grados de libertad requeridos en esta sección, así como se puede observar en la figura N°57.

*Figura 54. Cilindro neumático del hombro*

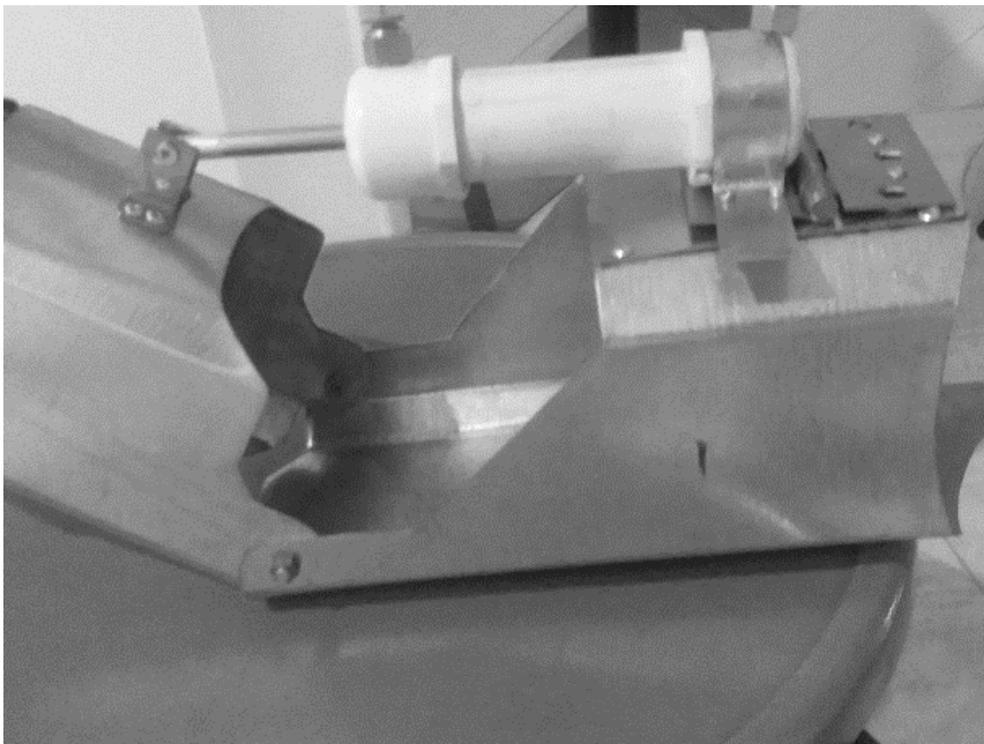


Fuente: Elaboración Propia

El cilindro neumático del hombro estará asegurado desde la rótula inferior hacia la estructura de aluminio a la altura de la cintura y por debajo del brazo, para obtener un mayor rendimiento. Debido a que la estructura de aluminio estará expuesta a grandes cargas en su costado derecho es necesario fijar una platina que se encargará de recibir la mayor parte de la carga y a la vez servirá como punto de apoyo.

En la figura N°58 y 59 se puede observar cada uno de los cilindros neumáticos ya asegurados a la parte superior e inferior del brazo metálico para garantizar un óptimo desempeño al momento de ser sometidos a presión; es preciso indicar que distribución de los cilindros en el exotraje son semejantes a los utilizados en las retroexcavadoras, ya que su punto de apoyo permite liberar mayor energía con poca presión.

*Figura 55. Fijación de cilindro del codo*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 56. Sistema neumático ensamblado*



Fuente: Elaboración Propia

### **3.8 Diseño y Fabricación del Circuito Electrónico**

El circuito electrónico EXO-GEN 1, permitirá controlar automáticamente las acciones necesarias para poder ejecutar una tarea, en este caso su principal objetivo es el de controlar la apertura de las servovalvulas; sin embargo, para esta operación es importante contar con los sensores de presión, los cuales permiten controlar gradualmente cada uno de los servomotores ubicados en la galería de distribución neumática.

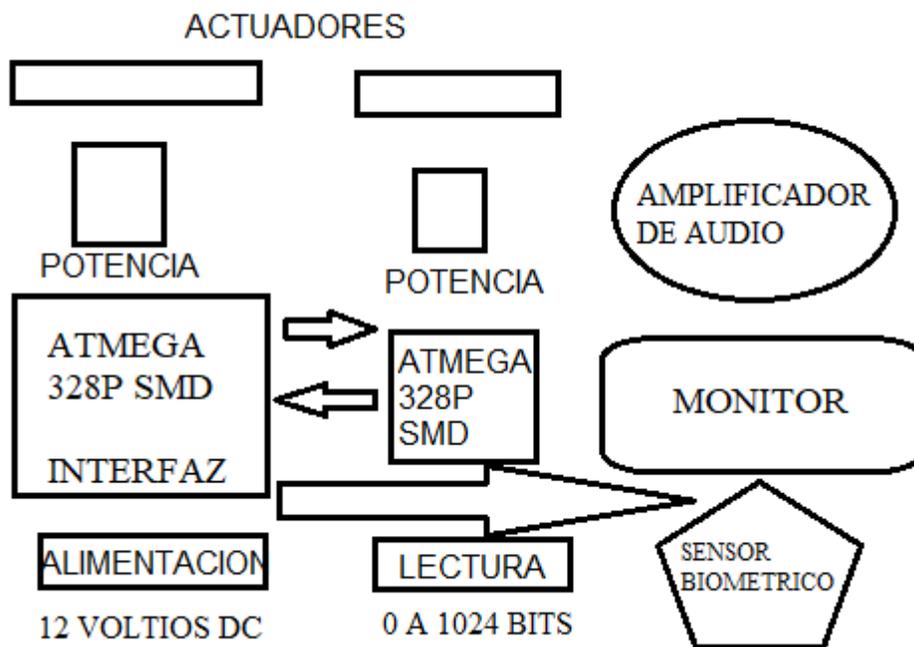
Así como se ilustra inicialmente en la figura N°6, el sensor de presión ATOMS-S01 representa a un conjunto analógico que funciona de forma opto ajustable y mediante la presencia de peso o presión este puede variar en un rango de 0 a 5 voltios; este sensor puede ser alimentado fácilmente con 12 voltios DC y generar un máximo consumo de 50 mA.

Para la lectura de las señales analógicas generadas por el sensor ATOMS-S01 se implementó el microcontrolador ATMEGA 328p smd, el cual se encargara de sensar la señales analógicas traducidas de 0 a 1024 bits por el microcontrolador y posteriormente controlar las servovalvulas; por otra parte el circuito electrónico contara con otro microcontrolador de la misma referencia el cual se encargara de controlar la interfaz de usuario audible, el sensor biométrico para identificar el usuario y el sensor de luz en caso de emergencia.

La arquitectura electrónica del circuito fue desarrollada con el fin de controlar de forma independiente el control de los servomotores y la interfaz audible, ya que es indispensable que el microcontrolador logre procesar de forma instantánea cada movimiento, de lo contrario es probable que el sistema no responda oportunamente o incluso que el programa presente varias fallas por agotamiento de la memoria dinámica y la EEPROM debido a que el sensor biométrico agota al máximo los recursos que el microcontrolador puede proporcionar. Por otra parte, el sistema cuenta con una pantalla LCD 16x2 por el cual se podrá visualizar la bienvenida y posteriormente monitorear el estado de la batería en caso de requerir carga inmediata.

En la figura N°60 se puede apreciar la estructura básica del circuito electrónico conformada por los 2 microcontroladores de superficie los cuales estarán comunicados entre sí por medio de pulsos digitales y así coordinar cada una de las instrucciones en el momento de inicio y cierre del sistema.

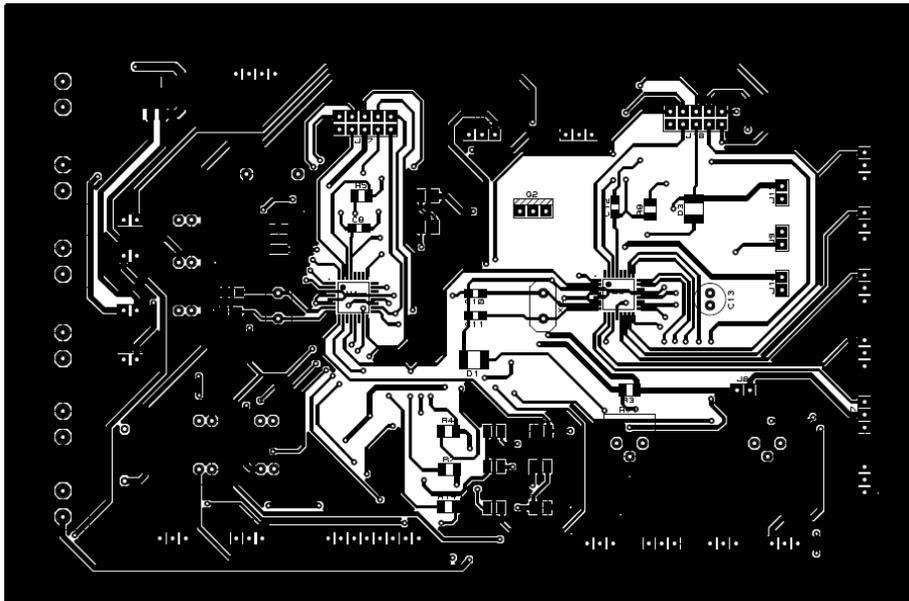
Figura 57. Arquitectura del circuito electrónico



Fuente: Elaboración Propia

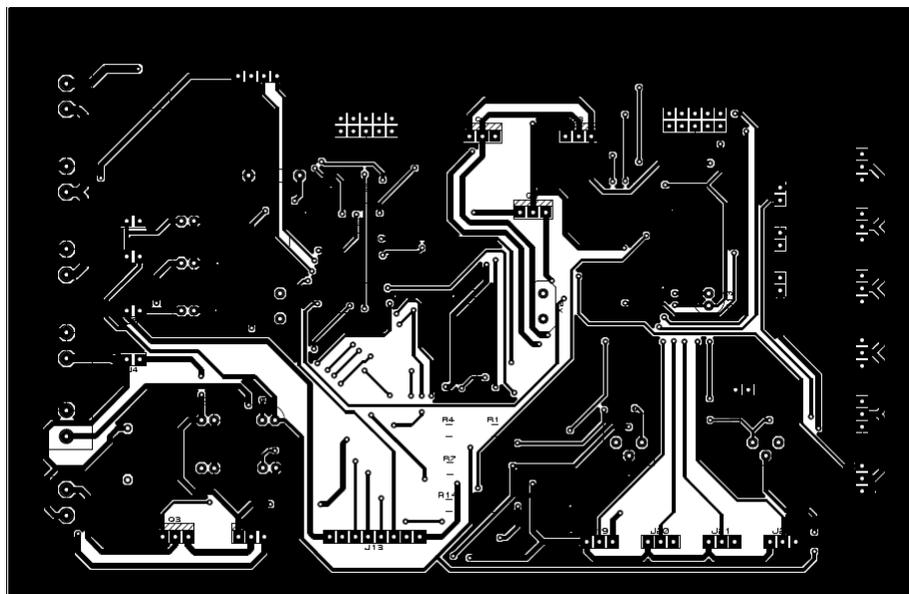
En la figura N°61 y 62 se puede apreciar el diseño completo del circuito cuyas dimensiones están comprendidas entre 180x120 mm, en esta pequeña área de trabajo se logró distribuir apropiadamente todos los componentes electrónicos correspondientes a la sección analógica y digital mediante la herramienta de diseño PROTEUS 8.0.

*Figura 58. Vista superior del circuito*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 59. Vista inferior del circuito*

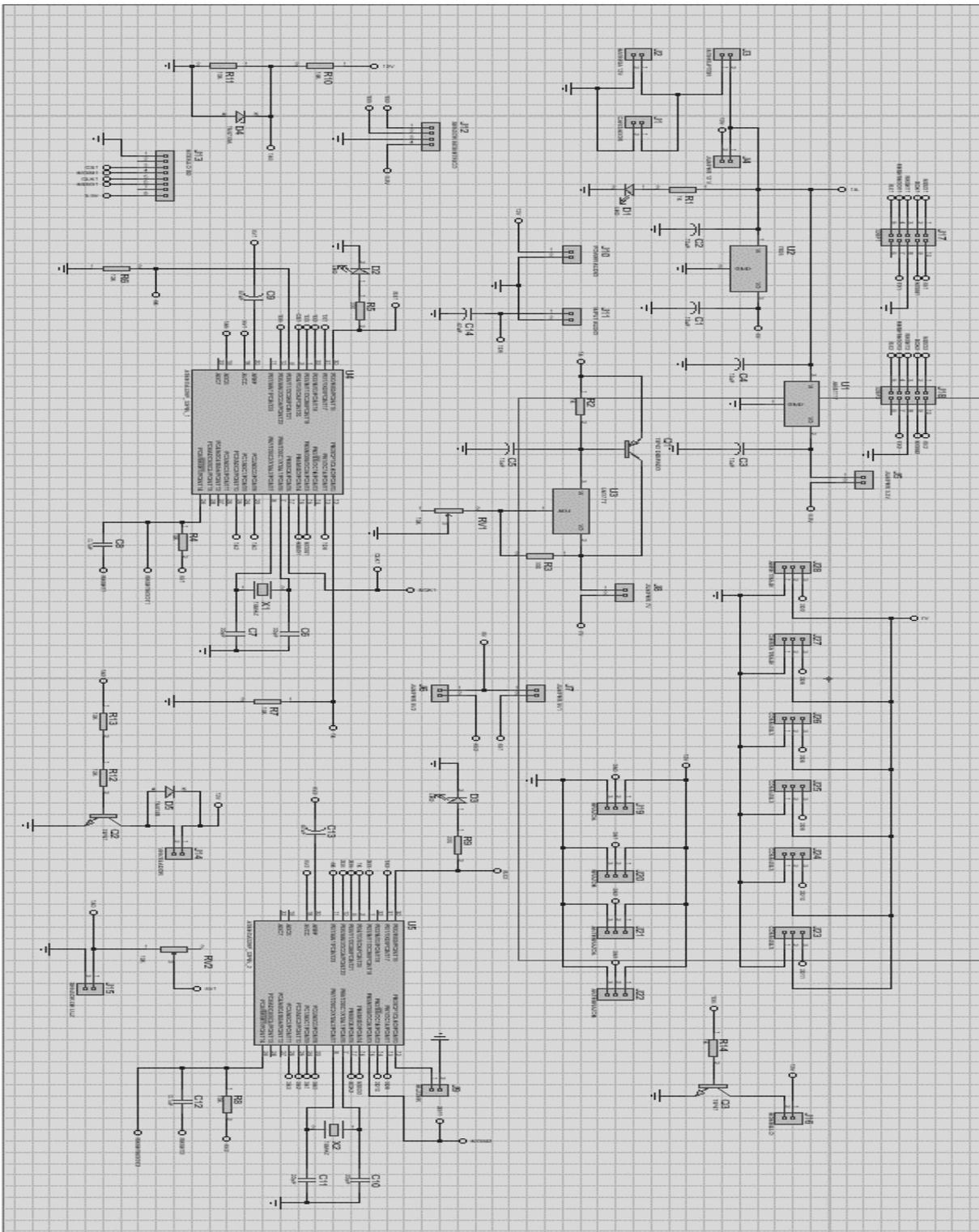


Fuente: Elaboración Propia

El circuito electrónico EXO-GEN 1 está constituido generalmente por componentes electrónicos de montura superficial con el propósito de ganar espacio y reducir notablemente el consumo de corriente.

En la figura N°63 se puede observar con más claridad el esquemático del circuito electrónico el cual fue reducido en su mínima expresión para lograr divisarlo en un solo pliego; como se indicó anteriormente el circuito electrónico EXO-GEN 1 corresponde a un diseño propio que tomo un tiempo aproximado de 1 mes, contemplando todos los detalles y reglas de diseño, los cuales fueron calculados mediante el software SATURN PCB. Esta herramienta permite calcular la densidad, las dimensiones, temperatura y la impedancia que requiere el circuito electrónico para evitar fugas de corrientes, voltajes o en el peor de los casos rupturas de pistas por altas corrientes.

Figura 60. Esquemático del EXO-GEN 1

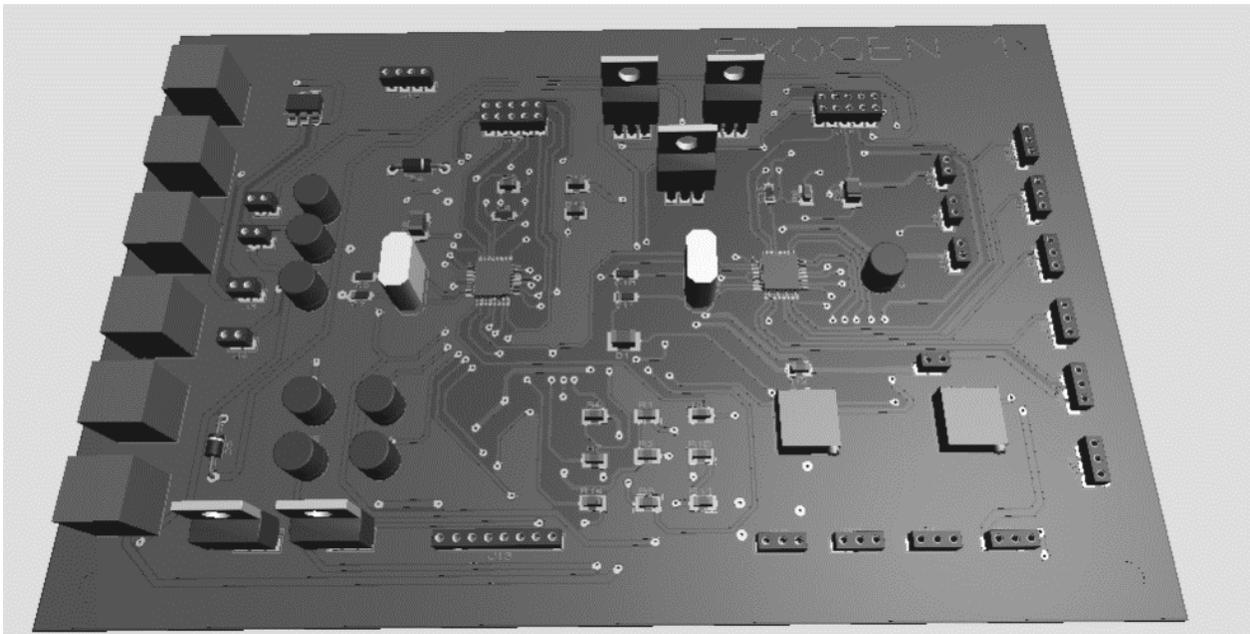


Fuente: Elaboración Propia

Para la fabricación del PCB utilizamos el servicio de la empresa JLCPCB, la cual nos ofrece un acabado profesional sobre la capa superior e inferior, además por tratarse de un circuito constituido por componentes de superficie, no es recomendable emplear el método tradicional de planchado ya que algunas pistas podrían quedar imperfectas y en algunos casos abiertas.

En la figura N°64 se puede apreciar el resultado final del circuito en tercera dimensión, dándonos una vista preliminar de lo que se pretende obtener al final. Para fijar correctamente cada uno de los componentes al PCB es recomendable utilizar estaño en pasta, el cual entra en estado de solidificación después de ser expuesto a altas temperaturas, este método es muy práctico cuando se trabaja con elementos de superficie, ya que al utilizar un cautín es muy probable que este dilate en exceso las pistas y no logre distribuir apropiadamente la soldadura.

*Figura 61. Diseño del PCB en 3D*



Fuente: Elaboración Propia

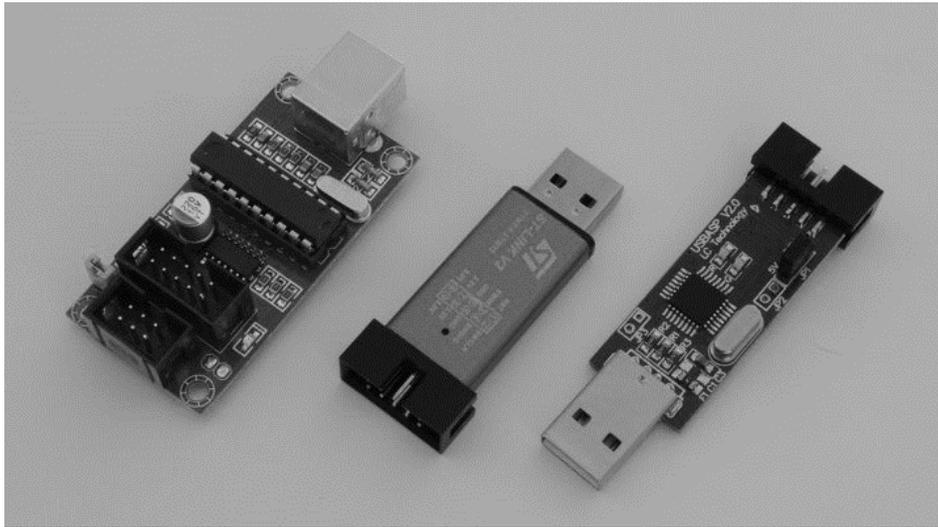
### 3.9 Estructura Algorítmica de los microcontroladores

El lenguaje más frecuente y utilizado en los microcontroladores de la familia ATMEGA es el lenguaje C++, el cual puede ser codificado mediante el ensamblador ATMEL STUDIO, la cual proporciona toda la estructura necesaria para quemar en la FLASH EPPROM de los micros la programación deseada. Sin embargo, estas herramientas de programación decodifican el algoritmo y lo traducen en lenguaje hexadecimal, el cual es un lenguaje universal que es también utilizado en los microcontroladores de MICROCHIP.

Sin embargo, existen otras herramientas de programación que suelen ser más sencillas de utilizar cuando se trata de los microcontroladores ATMEGA, el cual es conocido por famoso nombre IDE DE ARDUINO. Esta herramienta de programación es muy empleada en proyectos académicos e industriales debido a su bajo costo y fácil comprensión; también cuenta con una galería de ejemplos que permiten ayudar a comprender estructuras cada vez más complejas.

El circuito electrónico EXO-GEN 1 está programado mediante la interfaz del Sketch de Arduino, debido a su fácil manejo y bajo costo. Es preciso indicar que los microcontroladores ATMEGA no cuentan por lo general con el programa de inicio cuando se adquieren en las tiendas electrónicas, y este programa hace posible que el microcontrolador reconozca el lenguaje IDE sin inconvenientes. Para instalar el programa de inicio en los microcontroladores es necesario contar con un módulo de programación llamado ISP ASP USB de la familia ATMEL el cual se puede apreciar en la figura N°65, esta herramienta es de muy bajo costo y no requiere de un driver para ser reconocido por el ordenador.

*Figura 62. Programador USB ISP ASP de Atmel*



Fuente: (Ventura, 2015) *Polaridades.es*. Obtenido de <http://polaridad.es/programacion-arduino-isp-sistema/>

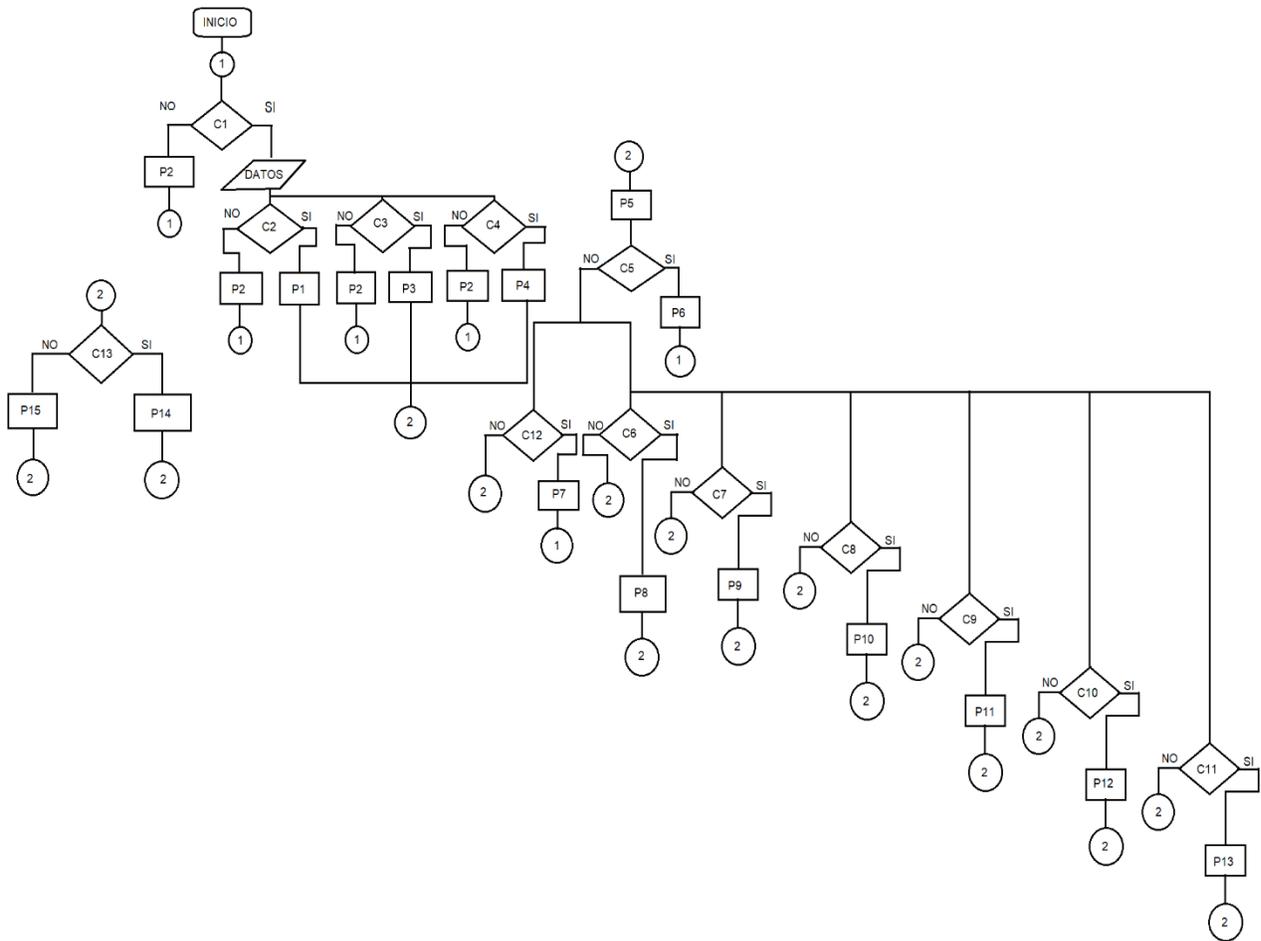
El módulo ISP ASP es muy sencillo de usar cuando se requiere programar un microcontrolador de la familia ATMEL, este módulo consta de un cable de tipo ribbon el cual trae 6 contactos tipo hembra para ser conectado directamente en el microcontrolador de interés; cada uno de estos contactos cuentan con la siguiente descripción:

- ✓ MISO
- ✓ MOSI
- ✓ SCK
- ✓ RESET
- ✓ GND
- ✓ VCC

Mediante el datasheet o un manual de semiconductores se podrá identificar el patillaje del microcontrolador y así poder identificar cada uno de los contactos antes descritos y posteriormente realizar la respectiva conexión para programarlo.

En la figura N°66 se puede apreciar el diagrama de flujos del algoritmo empleado en el microcontrolador ATMEGA 328p smd, mediante la interfaz del SKETCH DE ARDUINO.

Figura 63. Diagrama de Flujo



Fuente: Elaboración Propia

## Detalles del Diagrama de Flujo

### Condicionales

- ✓ C1= Si lee huella
- ✓ C2= Si la huella corresponde a Jose Luis
- ✓ C3= Si la huella corresponde a Ricardo Arboleda
- ✓ C4= Si la huella corresponde a Nicolas Roman
- ✓ C5= Apagar sistema
- ✓ C6= Sensor 1
- ✓ C7= Sensor 2
- ✓ C8= Sensor 3
- ✓ C9= Sensor 4
- ✓ C10= Sensor 5
- ✓ C11= Sensor 6
- ✓ C12= Bateria baja
- ✓ C13= Sensor de luz

**Procesos**

- ✓ P1= Acceso correcto jose luis robayo paz
- ✓ P2= Acceso incorrecto
- ✓ P3= Acceso correcto Ricardo Arboleda
- ✓ P5= Acceso correcto Nicolas Roman
- ✓ P6= Apaga sistema general
- ✓ P7= Apagado de emergencia
- ✓ P8= Levanta brazo
- ✓ P9= Baja brazo
- ✓ P10= Levanta antebrazo
- ✓ P11= Baja antebrazo
- ✓ P12= Abre traje
- ✓ P13= Cierra traje
- ✓ P14= Prende luz
- ✓ P15= Apaga luz

### **3.9.1 Ensamblaje Completo del Exoesqueleto**

En la figura N°67 y 68 se puede apreciar la presentación final del exotraje con un peso total de 5.5 kg, el cual consta de una base móvil que permite suspender el exotraje a una altura considerable, facilitando el acceso al sistema sin requerir la ayuda de un auxiliar; sin embargo es recomendable contar con apoyo extra al momento de usar el exoesqueleto, ya que en algunos casos es posible que el usuario no pueda acceder oportunamente por sobredimensiones de la palma de la mano, que por lo general tiende a bloquearse en el brazo metálico.

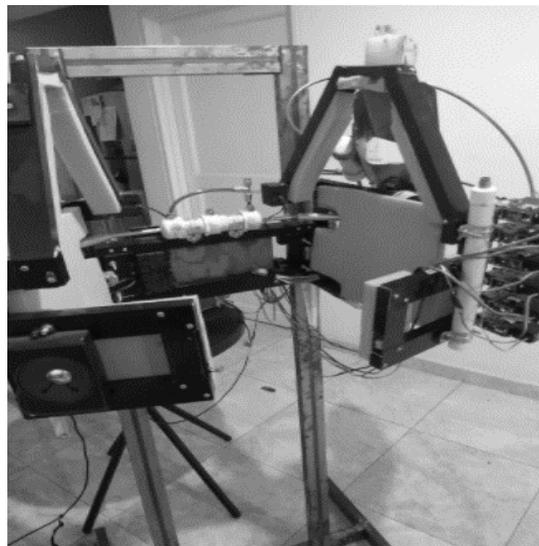
El suministro de energía eléctrica del exotraje se encuentra ubicado en la parte superior derecha, el cual puede entregar 12 voltios y 8 amperios; sin embargo, es recomendable suministrar una carga por un periodo de 3 a 4 horas, utilizando un adaptador de 12 voltios y 3 amperios, debido a que el consumo del sistema puede llegar a superar los 36 vatios.

*Figura 64. Construcción Final del Exoesqueleto*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 65. Vista Posterior del Exoesqueleto*



Fuente: Elaboración Propia

#### **4.Resultados**

Una de las tareas más complejas que se pueden presentar en el campo de prueba, es la presencia de fugas neumáticas o fluctuaciones de señales parasitas que pueden alterar el correcto funcionamiento de la estructura electrónica, sin embargo, se logró corregir a tiempo pequeños síntomas electromecánicos que amenazaban con el balance neumático. Unos de los objetivos principales que se describió inicialmente para la entrega final es el de lograr duplicar la fuerza promedio de una persona cercana a los 5 kg; así de esta manera colocando a prueba el exoesqueleto con una carga plena de 10kg con el brazo completamente extendido, es decir duplicando la fuerza promedio que una persona puede tolerar en condiciones normales dada por un máximo de 5 kg, una de las alternativas más favorables para esta prueba sería el de utilizar un maletín industrial con un peso promedio de 10.3kg que se logró aproximar gracias al contenido de este, para comprobar su peso en tiempo real se empleó una báscula digital cuya capacidad es de 120kg, así como se puede apreciar en la figura N°69 y 70 la maleta es pesada en la báscula, registrando una carga plena de 10.3 kg.

*Figura 66. Peso Registrado en la Bascula*



Fuente: Elaboración Propia

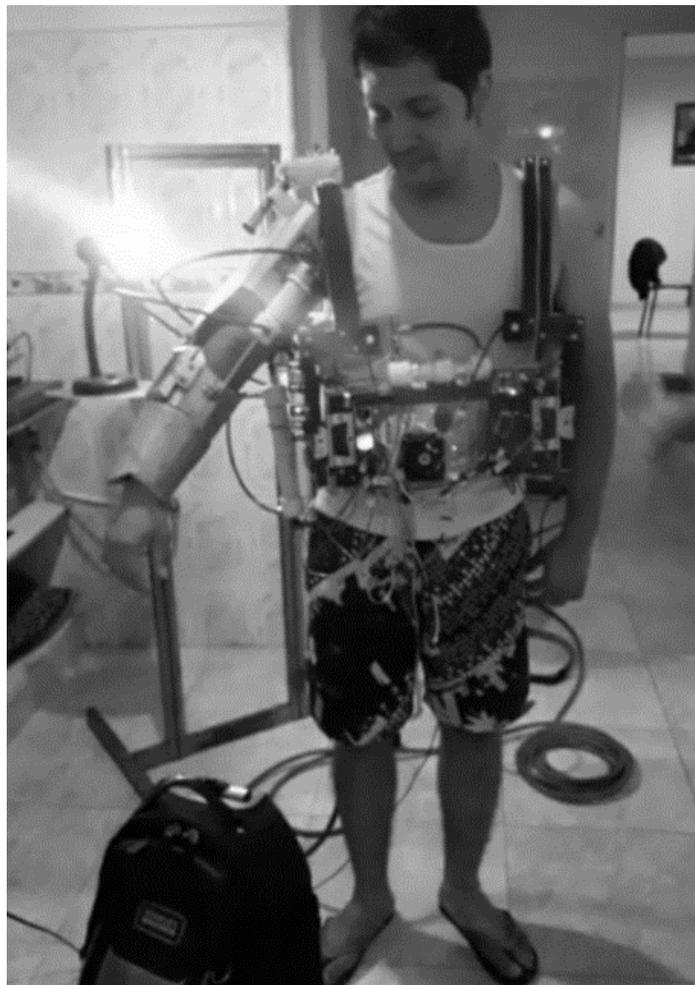
*Figura 67. Maleta Industrial Pesada en Bascula*



Fuente: Elaboración Propia

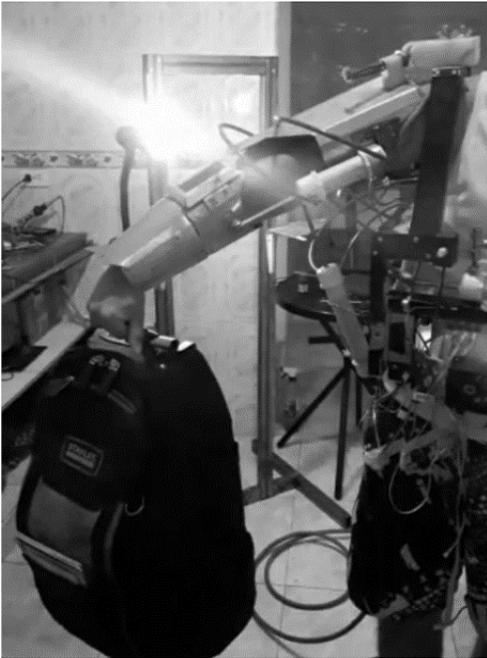
El exoesqueleto está diseñado para personas de contextura delgada y mediana para garantizar un acceso cómodo al exotraje; para esta ocasión contamos con la ayuda del voluntario N°1 así como se puede observar en la figura N°71 cuyo objetivo sería el de levantar el maletín industrial utilizando el exotraje y sostenerlo por el tiempo que el sistema se encuentre en funcionamiento y finalmente alojarlo en una superficie de mayor altura así como se puede evidenciar en la figura N°72 y 73; satisfactoriamente nuestro voluntario logra vencer la fuerza promedio de una persona a tan solo un 50% de la capacidad neumática que nos proporciona el depósito de aire.

*Figura 68. Sujeto de Prueba N°1*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 69. Sosteniendo la carga plena de 10.3kg*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Figura 70. Maletín Industrial Alojado en una Altura Superior*



*Fuente: Elaboración Propia*

Para la segunda prueba del exoesqueleto se contó con la ayuda de un nuevo voluntario de contextura delgada para el cual se programó una carga superior de 12.9 kg así como se puede observar en la figura N°74 y 75 para la cual se empleó el mismo maletín industrial con un poco más de contenido en su interior para aproximarlos a 13 kg; satisfactoriamente nuestro voluntario N°2 logra vencer la fuerza promedio y levantar el maletín por un periodo considerable así como se puede apreciar en la figura N°76; en la tabla N°1 se relaciona con detalles los resultados obtenidos en la prueba de fuerza del voluntario 1 y 2.

*Figura 71. Peso Registrado del Voluntario N°2*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 72. Maletin Industrial con 12.9 kg*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 73. Sujeto de Prueba N°2*



Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 1. Datos de Prueba*

<b>ANALISIS DE PRUEBA DEL EXOTRAJE</b>		
		<b>SUMINISTRO DE PRESION</b>
<b>VOLUNTARIO 1</b>	CONTEXTURA MEDIANA	
<b>CARGA MAXIMA EN CONDICIONES NORMALES</b>	6 KG CON EL BRAZO EXTENDIDO	150 PSI
<b>EDAD</b>	30 AÑOS	
<b>PESO MAXIMO USANDO EL EXOTRAJE</b>	10.3 KG CON EL BRAZO EXTENDIDO	
<b>TIEMPO TOTAL DE LA PRUEBA</b>	60 SEGUNDOS	
<b>TIEMPO MAXIMO DE USO</b>	ILIMITADO, SEGÚN SUMINISTRO	
<b>VOLUNTARIO 2</b>	CONTEXTURA DELGADA	<b>RENDIMIENTO NEUMATICO</b>
<b>CARGA MAXIMA EN CONDICIONES NORMALES</b>	6 KG CON EL BRAZO EXTENDIDO	<b>90,10%</b>
<b>EDAD</b>	28 AÑOS	
<b>PESO MAXIMO USANDO EL EXOTRAJE</b>	12.9 KG CON EL BRAZO EXTENDIDO	
<b>TIEMPO TOTAL DE LA PRUEBA</b>	45 SEGUNDOS	
<b>TIEMPO MAXIMO DE USO</b>	ILIMITADO, SEGÚN SUMINISTRO	

Fuente: Elaboración Propia

## 5.Conclusiones

El exoesqueleto cumple con cabalidad el objetivo propuesto para levantar al menos el doble de peso que levantaría una persona de talla mediana en condiciones normales, limitado solamente al suministro de aire comprimido que alimenta el sistema.

El manual de usuario garantiza un adecuado uso del exotraje, considerando técnicamente cada uno de los pasos a seguir los cuales se encuentran debidamente ilustrados en la sección inicial del manual, de igual forma contempla cada una de las precauciones y advertencias que se deben considerar antes de usar el exotraje de forma segura.

Los cálculos matemáticos empleados para el desarrollo del exoesqueleto garantizan un correcto desempeño en la sección neumática para responder satisfactoriamente a la fuerza requerida y así cumplir con el objetivo principal, de igual forma estos cálculos fueron indispensables para el diseño del circuito electrónico EXOGEN1 al igual que la programación empleada en el sistema.

Mediante la etapa de diseño; fue necesario modificar la sección de la parte dorsal y pectoral, ya que, por ser un material tan rígido, generaba dificultad para acceder al traje cómodamente, creando la necesidad de contar con ayuda extra para poder utilizar el sistema electromecánico. Una de las alternativas más favorables para atender a este problema, sería el de implementar varios pliegues en la parte dorsal y pectoral, los cuales serían posicionados automáticamente por medio de servomotores; los cuales operarían de forma sincronizada al momento de acceder o retirarse la armadura.

Otro factor importante que surgió mediante la etapa de diseño; influye en el desarrollo de los cálculos matemáticos, con el fin de obtener una aproximación considerable en el desempeño ejercido por la presión neumática. Ya que en un comienzo el prototipo exoesqueleto trabajaría con 9 brazos neumáticos con diferentes dimensiones, las cuales estarían ubicadas en cada sección articular de la extremidad superior derecha; sin embargo, después de obtener los datos numéricos de la presión neumática; el desempeño del exoesqueleto se reduciría en un 50%, lo cual provocaría limitaciones en todas las articulaciones, sin proporcionar la fuerza suficiente para duplicar la fuerza del operario; para atender correctamente a esta novedad, se simplificarían 6 brazos neumáticos, dejando en operación solo 3 de ellos, ubicados en sitios estratégicos para cumplir el objetivo principal.

Para la alimentación neumática de todo el sistema se había planeado adaptar un pequeño compresor de 12 voltios en la parte posterior del exotraje, sin embargo, se dio por descartada esta opción debido a que el compresor no generaba suficiente caudal y posteriormente no respondía a la demanda que exigía el sistema; una de las alternativas más favorables para responder a este problema sería el de utilizar una fuente de compresión externa de 120 voltios que tenga la capacidad de proporcionar el caudal requerido.

Una de las primeras versiones pensadas en el sistema electrónico del exotraje terminó por averiarse gravemente cuando este fue puesto a prueba, motivo por el cual comenzó a elevarse la temperatura en los microcontroladores y posteriormente dañándolos en su totalidad; una de las posibles causas conducen a una sobreelevada tensión en uno de los puertos analógicos del microcontrolador superior a los 5 voltios y de igual forma un error de diseño que se había ejecutado

para alimentar una memoria micro SD con un voltaje superior de 3.3 voltios la cual terminó por averiarse al instante; para responder oportunamente a este incidente se había planeado sustituir el esquema electrónico por un Arduino mega, pero al contar con un tiempo extra para la entrega final se optó por rediseñar nuevamente el circuito electrónico basado en microcontroladores Atmega 328p el cual respondió satisfactoriamente en el sistema general.

En la etapa de diseño se pretendía inicialmente construir la palma de la mano o puño de lámina galvanizada la cual sería accionada por un cilindro neumático pequeño; pero después de hacer varias pruebas de levantamiento de carga sin contar con el circuito electrónico, se comprobó que esta pequeña extremidad interrumpía un cómodo ingreso al exotraje, de igual forma este provocaba molestias mientras se realizaba las pruebas de levantamiento de carga, por lo que fue descartada complementemente la opción de incluir dentro del sistema esta articulación y finalmente se optó por dejar 2 cilindros neumáticos en puntos de mayor requerimiento.

Para el control de la red neumática fue necesario diseñar y construir una galería de distribución neumática el cual se encargaría de dar paso a la presión neumática por medio de miniservos alimentados a 7 voltios desde la tarjeta madre del sistema; desafortunadamente después de iniciar con las primeras pruebas del sistema se presentó una gran pérdida de presión debido a las fugas que la galería de distribución generaba, ya que el material que se empleó inicialmente contaba con una superficie imperfecta; para responder satisfactoriamente a este inconveniente fue necesario rediseñar un sistema de distribución utilizando tubos de PVC y llaves de paso de  $\frac{1}{4}$  de alta presión las cuales girarían gradualmente mediante servomotores de mayor potencia; una vez poniendo a prueba el sistema neumático, respondió satisfactoriamente sin presentar ninguna fuga.

## 6. Referencias Bibliográficas

- Andres Camilo Gutierrez Cubillos, C. A. (2000-2016). *TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS EN TRABAJADORES DE LA INDUSTRIA*. Obtenido de <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/12744/Articulo%20TME.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Anonimo. (13 de Octubre de 2015). *Todo Sobre AVR*. Obtenido de <http://todosobreavr.blogspot.com/2015/10/caracteristicas-tecnicas-del-atmega-328.html>
- Anonimo. (18 de Octubre de 2019). *Maquitodo*. Obtenido de <https://maquitodo.com.co/compresores-de-aire/9486-compresor-08hp-6-gal-150psi-portercable.html>
- Cardona, L. (18 de Febrero de 2019). *Canales Sectoriales Interempresas Automocion*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/233902-uso-exoesqueletos-procesos-productivos-industriales-automocion-puede-reducir-hasta-60-por.html>
- Carlos Andres Bernal, W. M. (2013). *ADQUISICION DE SEÑALES MUSCULARES PARA EL CONTROL PROTESIS DE MANO 3D*. Cali: INSTITUCION UNIVERSITARIA ANTONIO JOSE CAMACHO.
- DAVID SERRANO DEL CERRO, D. S. (2018). *Desarrollo De Un Exoesqueleto De Rehabilitacion Para Miembro Superior Basado En SMA*. MADRID (ESPAÑA): UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID .
- Diego mas, J. A. (2015). *Ergonautas*. Obtenido de <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/ginsht/ginsht-ayuda.php>
- Fernandez, Y. (30 de Junio de 2017). *Xataka*. Obtenido de <https://www.xataka.com/makers/asi-es-el-exo-brazo-de-codigo-abierto-que-dos-jovenes-ingenieros-estan-creando-por-apenas-100-dolares>
- Ferretronica. (2 de Junio de 2020). *Ferretronica Tienda Electronica*. Obtenido de [https://ferretronica.com/products/servomotor-mg996r?variant=12205033717853&currency=COP&utm\\_medium=product\\_sync&utm\\_source=google&utm\\_content=sag\\_organic&utm\\_campaign=sag\\_organic&utm\\_campaign=gs-2020-01-11&utm\\_source=google&utm\\_medium=smart\\_campaign&gclid](https://ferretronica.com/products/servomotor-mg996r?variant=12205033717853&currency=COP&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_campaign=gs-2020-01-11&utm_source=google&utm_medium=smart_campaign&gclid)

- FLOREZ, H. J. (2016). *Diseño Mecatronico De Un Robot Exoesqueleto De Extremidad Superior Para Rehabilitacion De Personas Con Discapacidad Parcial En El Codo*. BOGOTA: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
- FM, Y. (1 de Julio de 2017). *Xalaca Nuevo*. Obtenido de <https://www.xataka.com/makers/asi-es-el-exo-brazo-de-codigo-abierto-que-dos-jovenes-ingenieros-estan-creando-por-apenas-100-dolares>
- Galgas, S. F. (24 de Abril de 2016). *T-Bem*. Obtenido de <https://teslabem.com/arduino/sensor-fsr/>
- HERRERA, R. R. (2017). *Sistema De Informacion Para La Administracion Y Analisis De Datos Adquiridos De Un Exoesqueleto De Marcha Asistida* . CALI (VALLE DEL CAUCA): UNIVERSIDAD DEL VALLE.
- Ibañez, A. (26 de Mayo de 2017). *El Pais Tecnologia*. Obtenido de [https://elpais.com/tecnologia/2017/05/24/actualidad/1495640589\\_615268.html](https://elpais.com/tecnologia/2017/05/24/actualidad/1495640589_615268.html)
- Industrial, C. O. (28 de Abril de 2018). *El Futuro Del EPI De Los Trabajos Industriales*. Obtenido de <https://www.costaoesteindustrial.com/2018/04/28/exoesqueleto-el-futuro-del-epi-en-los-trabajos-industriales/>
- JOSE DAMIAN COLLAZOS, M. J. (2014). *Diseño De Una Ortesis Para La Mano Derecha* . CALI: INSTITUCION UNIVERSITARIA ANTONIO JOSE CAMACHO.
- JUAN FRANCISCO AYALA LOZANO, G. U. (2015). *Diseño Mecanico De Un Exoesqueleto Para La Reahabilitacion Del Miembro Superior*. BOGOTA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- MARTINEZ, J. J. (2018). *Control De Un Brazo Robotico Virtual Usando Un Exoesqueleto Robot De Miembro Superior*. CALI (VALLE DEL CAUCA): UNIVERSIDAD LIBRE.
- Martinez, M. (20 de Octubre de 2018). *El Economista*. Obtenido de <https://www.economista.com.mx/empresas/Exoesqueletos-tecnologia-para-la-productividad-automotriz-20181020-0006.html>
- Matus, D. (10 de Noviembre de 2017). *Digital Trends*. Obtenido de <https://es.digitaltrends.com/autos/exoesqueleto-eksovest-ford-robot/>
- MENDEZ, D. S. (2017). *Desarrollo De Un Exoesqueleto Para La Rehabilitacion Del Hombro* . MEXICO: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE MIXTECA.

- Panasonic. (23 de Marzo de 2017). *Los Tiempos*. Obtenido de <https://www.lostiempos.com/tendencias/tecnologia/20160323/exoesqueletos-pensados-ayudar-trabajo>
- Peña, J. C. (31 de Agosto de 2018). *TechBit*. Obtenido de <https://www.eluniversal.com.mx/techbit/exoesqueletos-los-uniformes-del-futuro>
- Perez, A. (3 de Julio de 2018). *NCB*. Obtenido de <https://www.incb.com.mx/index.php/articulos/78-microcontroladores-y-dsps/2546-conociendo-el-microcontrolador-nucleo-core-atmega328p-de-arduino-uno-mic019s>
- Porriño, O. (7 de Septiembre de 2017). *Aimen Centro Tecnológico*. Obtenido de <https://www.aimen.es/sala-de-prensa/noticias/aimen-muestra-las-ventajas-que-ofrecen-los-exoesqueletos-a-la-industria-40>
- Puerto, K. (5 de Agosto de 2014). *Xalaca Nuevo*. Obtenido de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/un-exoesqueleto-con-el-que-cargar-100-kilos-esta-en-desarrollo-en-astilleros-coreanos>
- Titanio, L. B. (21 de Agosto de 2019). *Baterías de Litio*. Obtenido de <https://www.bateriasdelitio.net/?p=6>
- Unocero. (10 de Noviembre de 2017). *UNOCERO*. Obtenido de <https://www.unocero.com/autos/eksovest-el-exoesqueleto-que-ocupa-ford-para-ayudar-a-sus-trabajadores/>
- Ventura, V. (3 de Enero de 2015). *Polaridades.es*. Obtenido de <http://polaridad.es/programacion-arduino-isp-sistema/>
- Woollacott, E. (5 de Diciembre de 2017). *News Mundo*. Obtenido de <https://www.aimen.es/sala-de-prensa/noticias/aimen-muestra-las-ventajas-que-ofrecen-los-exoesqueletos-a-la-industria-40>