



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS
MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO DE
EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE
CARGA**

AUTORES: ALEXIS GONZALO LAMINGO CAIZALUISA

LEOPOLDO JAVIER LOOR CEBALLOS

DIRECTOR: ING. ARTEAGA OSCAR

LATACUNGA

2018



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo titulado **“INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE CARGA.”** realizado por los señores **Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluisa** y **Leopoldo Javier Loor Ceballos**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluisa** y **Leopoldo Javier Loor Ceballos** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 19 de Febrero del 2018



Ing. Oscar Arteaga
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluiza**, con cédula de identidad N° 0503234999 y **Leopoldo Javier Loor Ceballos**, con cédula de identidad N° 0502920499, declaramos que este trabajo de titulación **“INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE CARGA”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría. En virtud de ello nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 19 de febrero del 2018

Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluiza

C.C.: 0503234999

Leopoldo Javier Loor Ceballos

C.C.: 0502920499



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluisa y Leopoldo Javier Loor Ceballos, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación **“INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOSQUELETO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE CARGA”**, cuyo contenido, ideas y criterios de diseño son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 19 de febrero del 2018

Alexis Gonzalo Lamingo Caizaluisa

C.C.: 0503234999

Leopoldo Javier Loor Ceballos

C.C.: 0502920499

DEDICATORIA

A mis padres, Blanca y Gonzalo por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, a mis hermanas por su cariño y amistad sincera y a toda mi familia, les dedico este trabajo ya que sin su apoyo, en los buenos y malos momentos la culminación de esta etapa no hubiera sido posible.

Alexis

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos que siempre me dieron su apoyo incondicional, confianza y motivación para seguir adelante y culminar con éxito mis estudios

Leopoldo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por ser mi ejemplo de constancia y esfuerzo y por su paciencia y palabras de aliento, a mis hermanas por siempre estar pendientes de mí, a mis amigos quienes fueron parte de este camino con quienes compartí momentos inolvidables.

También agradezco a nuestro docente tutor del proyecto y a toda la Universidad por brindarme una formación integral, en lo humano y profesional.

Alexis

Agradezco a mis padres, mis hermanos, a los compañeros y amigos, con quienes compartí todos estos años de carrera, en especial a Alexis mi compañero de proyecto y amigo con quien desarrolle esta investigación.

Agradezco a los profesores y autoridades por su dedicación y paciencia para compartir con nosotros sus conocimientos y formarnos como seres humanos.

Leopoldo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESÚMEN.....	xix
ABSTRACT	xx

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación	2
1.4 Importancia.....	2
1.5 Objetivos.....	2
1.5.1 Objetivo General	2
1.5.2 Objetivos Específicos.....	2

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	4
2.1 Estado del arte	4

2.1.1	Generalidades de los exoesqueletos	4
2.1.2	Clasificación de los exoesqueletos	5
2.1.3	Aplicación de los exoesqueletos	5
2.1.4	Exoesqueletos para aplicaciones industriales.....	6
a.	HAL de Cyberdine (2012)	6
b.	Titan Arm (2013).....	7
c.	H-Wex de Hyundai (2016).....	7
d.	Exoesqueletos de Panasonic (2016)	8
e.	Exoesqueleto EksoVest de Ford (2017)	9
f.	Robo-Mate (2017).....	9
g.	SARCOS (Entre 2019 y 2020)	10
2.2	Fundamentación teórica	11
2.2.1	Biomecánica.....	11
2.2.2	Biomecánica del hombro.....	11
2.2.3	Biomecánica del codo	13
2.3	Antropometría.....	14
2.3.1	Generalidades.....	14
2.3.2	Medidas antropométricas necesarias para el exoesqueleto.	14
a.	Altura Normal	14
b.	Longitud de la espalda	14
c.	Longitud hombro-codo	14
d.	Longitud codo a las puntas de los dedos	15
2.3.3	Datos antropométricos de la población ecuatoriana	15
2.4	Percentiles.....	16
2.5	Masa segmental con referencia a la masa total del cuerpo.....	16
2.6	Ergonomía	17
2.7	Manipulación manual de cargas	17

2.7.1	Efectos de la manipulación manual de cargas	17
2.7.2	Aspectos para agravar una lesión de espalda	18
2.7.3	Medidas Preventivas	18
2.7.4	Cargas máximas permisibles para Ecuador.....	18
2.7.5	Normativas técnicas para la antropometría y manejo de cargas...	19
2.8	Teoría de von Mises	20
2.9	Deformaciones	21
2.10	Factor de seguridad.....	21
2.11	Mecanismos	22
2.11.1	Mecanismos de transmisión de movimiento.....	22
2.11.2	Mecanismo reductor.....	23
2.12	Actuadores	24
2.12.1	Actuadores eléctricos.....	25
a.	Motor de corriente continua	25
b.	Comparación entre actuadores eléctricos.....	26
2.13	Cinemática de manipuladores robóticos.....	27
2.13.1	Cinemática Directa.....	27
2.13.2	Cinemática Inversa	29
2.14	Sistemas de control	29
2.14.1	Unidad de control para exoesqueletos.....	29
2.14.2	Sensores.....	30
a.	Sensor de posición digital	30
b.	Sensores de velocidad.....	30
c.	Sensor acelerómetro.....	30
d.	Sensores de efecto hall	31
2.14.3	Servocontroladora de potencia	31
2.14.4	Microcontrolador	32

2.14.5	Baterías.....	33
--------	---------------	----

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL EXOESQUELETO 34

3.1	Parámetros de diseño.....	34
3.2	Diseño geométrico del exoesqueleto.....	34
3.3	Cinemática del exoesqueleto.....	36
3.3.1	Cálculo de la cinemática directa del exoesqueleto.....	36
3.4	Análisis de carga	40
3.4.1	Cálculo de torque en el codo.....	41
3.4.2	Cálculo de torque en el hombro	41
3.4.3	Cálculo de torque en el espaldar.....	42
3.5	Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores	43
3.5.1	Eslabón codo-mano	43
3.5.2	Eslabón hombro-mano.....	44
3.5.3	Eslabón espaldar-mano	45
3.6	Selección de motoreductores	46
3.6.1	Selección motoreductor del codo	46
3.6.2	Selección motoreductor del hombro.....	48
3.7	Selección de material	50
3.8	Análisis de esfuerzos, factor de seguridad y deformación.....	51
3.8.1	Análisis antebrazo.....	51
3.8.2	Análisis brazo.....	56
3.8.3	Análisis hombro.....	58
3.8.4	Análisis Espaldar.....	60
3.9	Diseño del sistema de control.....	61
3.9.1	Selección de dispositivos electrónicos	61
a.	Sensor: Acelerómetro MMA7361	61

b.	Servocontroladora de potencia	62
c.	Microprocesadores.....	62
d.	Baterías.....	62
3.9.2	Unidad de control	63
a.	Fase de percepción del entorno del exoesqueleto.....	64
b.	Procesado e interpretación de los datos.	64
c.	Ejecución de la acción: Etapa de potencia.....	65
3.10	Exoesqueleto final	66

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN	69	
4.1	Manufactura y ensamblaje.....	69
4.1.1	Secuencia para obtener el exoesqueleto final.	69
a.	Operaciones de procesamiento	70
b.	Operaciones de ensamble	75
4.2	Desarrollo del sistema de control	78
4.2.1	Percepción del entorno	78
a.	Adquisición de las señales de mando.	78
b.	Adquisición de señal del acelerómetro.....	79
4.2.2	Procesado e interpretación de los datos	81
4.2.3	Ejecución de la acción: Etapa de potencia.....	82
a.	Configuración de la servocontroladora ESCON 50/5.....	82
b.	Conexión de la etapa de potencia	87
c.	Sintonización automática del motor maxon EC60 Flat brushless ...	87
d.	Funcionamiento de la servocontroladora ESCON 50/5.	89
4.3	Exoesqueleto final	92

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	93
5.1 Pruebas a realizar	93
5.1.1 Tiempo de cada ciclo	93
5.1.2 Rango de movimiento	95
5.1.3 Prueba de precisión	97
5.1.4 Prueba de carga	101
5.2 Análisis de resultados.....	102
5.3 Validación de hipótesis.....	103
5.3.1 Planteamiento de la hipótesis	103
5.3.2 Validacion de hipótesis	103
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS.....	112

ANEXO A: Características técnicas del motor EC 60 FLAT brushless

ANEXO B: Datos técnicos servocontroladora ESCON 50/5

ANEXO C: Conectores de la Servocontroladora ESCON 50/5

ANEXO D: Conectores del motor Maxon EC60 Flat – Brushless-100 Watts

ANEXO E: Características del aluminio 7021

ANEXO F: Especificaciones LEADWELL V-30

ANEXO G: Rodamiento NTN 6000

ANEXO H: Programación en Arduino Uno

ANEXO I: Planos Mecánicos

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medidas antropométricos ecuatorianas	16
Tabla 2 Masa segmental con referencia a la masa total del cuerpo	16
Tabla 3 Cargas máximas permisibles en Ecuador.....	18
Tabla 4 Características de un reductor para manipulador robótico.....	23
Tabla 5 Tipos de Actuadores	24
Tabla 6 Ventajas de los tipos de actuadores	24
Tabla 7 Desventajas de los tipos actuadores	25
Tabla 8 Comparación ventajas y desventajas de actuadores eléctricos.....	26
Tabla 9 Características del acelerómetro MMA 7361	31
Tabla 10 Características del Arduino Uno	32
Tabla 11 Parámetros Denavit Hartenberg (D-H) del exoesqueleto.....	36
Tabla 12 Posiciones en x, y del extremo del exoesqueleto	38
Tabla 13 Posiciones en x, y del extremo del exoesqueleto codo120°	39
Tabla 14 Motores de corriente continua brushless	46
Tabla 15 Características de los reductores.....	47
Tabla 16 Selección del material para la estructura	50
Tabla 17 Características de la servocontroladora ESCON	62
Tabla 18 Características de la batería TURNIGY 5.0	63
Tabla 19 Conexiones de las fases de percepción y procesamiento de datos	64
Tabla 20 Elementos del exoesqueleto.....	67
Tabla 21 Secuencia de construcción del exoesqueleto	69
Tabla 22 Datos carga vs tiempo de desplazamiento	93
Tabla 23 Datos rango de movimiento flexión.....	95
Tabla 24 Datos rango de movimiento extensión.....	96
Tabla 25 Datos de precisión en la flexo-extensión del codo	97
Tabla 26 Datos de precisión en la flexo-extensión del hombro.....	99
Tabla 27 Datos prueba de carga.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación: a) No-portátiles. b) Portátiles	5
Figura 2 Exoesqueleto Hal 5.....	7
Figura 3 Exoesqueleto Titan Arm.....	7
Figura 4 H-Wex de Hyundai.....	7
Figura 5 Exoesqueleto Ninja PLN-01	8
Figura 6 Exoesqueleto Power Loader	8
Figura 7 Exoesqueleto EksoVest de Ford.....	9
Figura 8 Robo Mate	10
Figura 9 Guardian XO	10
Figura 10 Guardian XO Max	11
Figura 11 Guardian GT	11
Figura 12 Movimientos del hombro: flexo-extensión.....	12
Figura 13. Movimientos del hombro: Abducción	13
Figura 14. Movimiento en el codo: Flexo-extensión.....	13
Figura 15 Dimensiones antropométricas	15
Figura 16 Ergonomía	17
Figura 17 Tipos de trenes de engranaje	24
Figura 18 Motores de corriente continua	26
Figura 19 Cinemática directa e inversa.....	27
Figura 20 Acelerómetro MMA7361	31
Figura 21 Tarjeta servocontroladora	32
Figura 22 Arduino uno	32
Figura 23 Diseño geométrico del exoesqueleto	35
Figura 24 Diseño geométrico del exoesqueleto	35
Figura 25 Parámetros para Denavit-Hartenberg.....	36
Figura 26 Espacio de trabajo: Flexo-extensión del brazo	37
Figura 27 Espacio de trabajo: Flexo-extensión del brazo y antebrazo.....	39
Figura 28 Fuerzas que actúan sobre el antebrazo.....	41
Figura 29 Fuerzas que actúan sobre el brazo	42
Figura 30 Fuerzas que actúan sobre espaldar.....	42
Figura 31 Diagrama de cargas del eslabón codo-mano.	43
Figura 32 Diagrama de fuerzas cortantes del eslabón codo-mano.....	43

Figura 33 Diagrama de momentos del eslabón codo-mano.	44
Figura 34 Diagrama de cargas del segmento hombro-mano.	44
Figura 35 Diagrama de fuerzas cortantes del segmento hombro-mano.	44
Figura 36 Diagrama de momentos del segmento hombro-mano.	45
Figura 37 Diagrama de cargas del segmento espaldar-mano.	45
Figura 38 Diagrama de fuerzas cortantes del segmento espaldar-mano.	45
Figura 39 Diagrama de momentos del segmento espaldar-mano.	46
Figura 40 Tensión de Von Mises para el antebrazo.	51
Figura 41 Valor de esfuerzo obtenido del software.	54
Figura 42 Factor de seguridad para el antebrazo.	54
Figura 43 Valor de factor de seguridad obtenido del software.	55
Figura 44 Desplazamiento para el antebrazo.	55
Figura 45 Tensión de von Mises para el brazo.	56
Figura 46 Valor de esfuerzo obtenido del software.	57
Figura 47 Factor de seguridad para el brazo.	57
Figura 48 Valor de factor de seguridad obtenido del software.	58
Figura 49 Desplazamiento para el brazo.	58
Figura 50 Tensión de von Mises para el hombro.	59
Figura 51 Factor de seguridad para el hombro.	59
Figura 52 Desplazamiento para el hombro.	60
Figura 53 Tensión de von Mises para el espaldar.	60
Figura 54 Factor de seguridad para el espaldar.	60
Figura 55 Desplazamiento para el espaldar.	61
Figura 56 Diagrama de bloques de la unidad de control.	63
Figura 57 Conexiones de las fases de percepción y procesado de datos ...	65
Figura 58 Conexiones de la etapa de potencia.	66
Figura 59 Partes del exoesqueleto.	66
Figura 60 Carcaza de recubrimiento.	67
Figura 61 Centro de mecanizado CNC Leadwell V-30.	70
Figura 62 Materia prima.	70
Figura 63 Mecanizado antebrazo.	71
Figura 64 Brazo.	71
Figura 65 Mecanizado hombro.	71
Figura 66 Mecanizado espaldar.	71

Figura 67 Apoyo de muñeca	72
Figura 68 Acople hombro-espaldar	72
Figura 69 Pulido de las piezas	72
Figura 70 Recubrimiento interior de las piezas	72
Figura 71 Cinturones de banda elástica antebrazo.....	73
Figura 72 Cinturones de banda elástica brazo.....	73
Figura 73 Correas de sujeción espaldar	73
Figura 74 Software Cura para impresión 3D.....	74
Figura 75 Materia prima para impresión 3D.....	74
Figura 76 Carcaza espaldar.....	74
Figura 77 Carcaza brazo	75
Figura 78 Carcaza antebrazo.....	75
Figura 79 Elementos de fijación.....	75
Figura 80 Ensamblaje motor-reductor.....	76
Figura 81 Ensamblaje hombro-espaldar	76
Figura 82 Ensamblaje motoreductor hombro-hombro.....	76
Figura 83 Ensamblaje brazo-eje de motoreductor hombro	77
Figura 84 Ensamblaje motoreductor codo-brazo	77
Figura 85 Ensamblaje antebrazo-eje de motoreductor codo	77
Figura 86 Ensamblaje apoyo de muñeca-antebrazo.....	77
Figura 87 Ensamblaje final del exoesqueleto	78
Figura 88 Conexión del joystick y Arduino Uno	78
Figura 89 Conexión acelerómetro Arduino	79
Figura 90 Toma de datos acelerómetro	79
Figura 91 Programa para obtener la gráfica del acelerómetro.....	79
Figura 92 Gráfica del comportamiento del acelerómetro	80
Figura 93 Ecuación característica.....	80
Figura 94 Gráfica del filtrado de señal	81
Figura 95 Programación en Arduino	82
Figura 96 Acceso directo a ESCON Studio	82
Figura 97 Conexión tarjeta y PC	82
Figura 98 Asistente de inicio	83
Figura 99 Buscar controladora.....	83
Figura 100 Tipo de motor.....	83

Figura 101 Datos del motor	84
Figura 102 Datos del motor	84
Figura 103 Tipo de sensor	84
Figura 104 Modo de operación	85
Figura 105 Habilitación	85
Figura 106 Valor de consigna	85
Figura 107 Limitación de corriente.....	86
Figura 108 Rampa fija.....	86
Figura 109 Velocidad de giro mínima	86
Figura 110 Entradas y salidas digitales	87
Figura 111 Resumen de la configuración	87
Figura 112 Conexión etapa de potencia	87
Figura 113 Tipo de sintonización	88
Figura 114 Sintonización automática	88
Figura 115 Sintonización finalizada	89
Figura 116 Sinopsis del Monitor de la controladora ESCON	89
Figura 117 Entradas y salidas digitales.	90
Figura 118 Monitor de la controladora: Controladora.....	90
Figura 119 Monitor de la controladora: Motores/sensores.....	91
Figura 120 Controladora del Monitor de ESCON.....	91
Figura 121 Cargar los parámetros a la controladora ESCON	91
Figura 122 Exoesqueleto final.....	92
Figura 123 Tiempo en 90° con 1kg de carga	94
Figura 124 Tiempo en 90° con 6 kg de carga	94
Figura 125 Carga 12kg	94
Figura 126 Tiempo en 100° con 12kg de carga	95
Figura 127 Flexión en el codo.....	95
Figura 128 Flexión en el hombro	96
Figura 129 Extensión en el codo y hombro.....	96
Figura 130 Movimiento de flexión del codo 30°	97
Figura 131 Movimiento de flexión del codo 60°	98
Figura 132 Movimiento de flexión del codo 90°	98
Figura 133 Movimiento de flexión del codo 120°	98
Figura 134 Movimiento de flexión del hombro25°	99

Figura 135 Movimiento de flexión del hombro 50°	100
Figura 136 Movimiento de flexión del hombro 75°	100
Figura 137 Movimiento de flexión del codo 100°	100
Figura 138 Prueba de carga	101

RESÚMEN

El siguiente trabajo de investigación presenta el diseño e implementación de un exoesqueleto multiplicador de fuerza para extremidad superior con dos grados de libertad. Este estudio se centra en un tipo de exoesqueleto actual que mejora las funciones motoras del cuerpo humano al aumentar la fuerza, la velocidad y la resistencia física del usuario. El exoesqueleto se basa en la antropometría de la población ecuatoriana y la biomecánica humana, para el modelamiento del exoesqueleto se tomó como base el modelo matemático de su cinemática, además el diseño se validó con un software CAE en el que se realiza simulaciones mecánicas y análisis de esfuerzos de elementos finitos para determinar la seguridad del sistema. Del mismo modo, al usar el análisis cinemático inverso, se determina la relación no lineal entre la posición y la orientación del extremo del exoesqueleto con respecto a un sistema de coordenadas de referencia. Estos parámetros son aplicados en el diseño del sistema control el cual usa sensores para determinar su posición y orientación para luego ejecutar los movimientos requeridos mediante una palanca de mando. La intención del dispositivo exoesquelético es implementarse en un entorno de trabajo industrial, ya que puede levantar y transportar cargas de hasta 120 Newtons.

Palabras claves:

- **EXOESQUELETO**
- **ROBÓTICA**
- **BIOMECÁNICA**
- **EXTREMIDAD SUPERIOR FUERZA**

ABSTRACT

The following research paper presents the design and implementation of a force multiplier exoskeleton for upper limb with two degrees of freedom. This study focuses on a type of current exoskeleton that improves the motor functions of the human body by increasing the strength, speed and physical resistance of the user. The exoskeleton is based on the anthropometry of the Ecuadorian population and human biomechanics, for the modeling of the exoskeleton was based on the mathematical model of its kinematics, in addition the design was validated with CAE software in which mechanical simulations and analysis are performed of finite element stresses to determine the safety of the system. In the same way, when using inverse kinematic analysis, the non-linear relationship between the position and the orientation of the end of the exoskeleton with respect to a reference coordinate system is determined. These parameters are applied in the design of the control system which uses sensors to determine their position and orientation to then execute the required movements by means of a joystick. The intention of the exoskeletal device is to be implemented in an industrial work environment, since it can lift and transport loads of up to 120 Newtons.

Key words:

- **EXOSKELETON**
- **ROBOTIC**
- **BIOMECHANIC**
- **FORCE UPPER EXTREMITY**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Este trabajo de investigación pretende aportar tecnologías, que generen beneficios puntuales a las personas que realicen actividades en las que se necesite levantar objetos pesados, el espacio de trabajo sea reducido, y en los que el uso de dispositivos mecánicos tradicionales no sean posibles dentro de ambientes industriales, una solución para esto es la utilización de un exoesqueleto de extremidad superior multiplicador de fuerza, que a través de su estructura mecánica soporte cargas considerables por tiempos largos, se evita así lesiones y accidentes debido a sobreesfuerzos del trabajo físico.

Debido a la complejidad de la construcción de un exoesqueleto de cuerpo completo este proyecto se basa en el desarrollo de un exoesqueleto de extremidad superior que permita multiplicar la fuerza.

1.2 Antecedentes

La tecnología robótica ha avanzado notablemente. Una de sus contribuciones más significativas es la aplicación de órtesis y prótesis inteligentes o robóticas. El estudio de estos dispositivos se ejecuta principalmente con un objetivo en mente. Este objetivo principal es poder aprovechar las características de humanos y robots. Los seres humanos muestran complejos y especializados algoritmos de control natural, que proporcionan la capacidad de realizar tareas difíciles en una amplia gama de condiciones rápidamente. Por el contrario, los robots pueden llevar a cabo tareas que requieren grandes fuerzas o torsiones, que depende de la naturaleza de su estructura y la potencia de sus actuadores. Por lo tanto, es evidente que al combinar estas dos entidades, el humano y el robot, en un solo sistema mecatrónico integrado, se pueden lograr soluciones excepcionales al utilizar las ventajas de cada subsistema. Además, la integración de la potencia mecánica de la máquina con el sistema de control

inherente del humano podría llevar a la ejecución de tareas que exijan la aplicación de grandes fuerzas de manera eficiente.

1.3 Justificación

En el Ecuador el Ministerio De Trabajo en su Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo, Capítulo V. Manipulación Y Almacenamiento, Art. 128. Manipulación de Materiales en el enunciado 4 establece que la carga máxima a manipular por un trabajador es de 23 kilogramos al utilizar toda su fuerza corporal.

Así también, el enunciado 1 establece dentro de las obligaciones del empresario que éste deberá adoptar las medidas técnicas u organizativas necesarias para evitar la manipulación manual de cargas, en especial mediante la utilización de equipos para el manejo mecánico de las mismas, sea de forma automática o controlada por el trabajador.

1.4 Importancia

La importancia de este tema radica en que en el Art. 128 se señala que no se deberá exigir ni permitir a un trabajador el transporte manual de carga cuyo peso puede comprometer su salud o seguridad ya sea en trabajos que se realizan en una sola ocasión o los que se vuelven repetitivos para el trabajador, como medida preventiva, se propone la utilización de medios mecánicos en la medida de lo posible.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Investigar mecanismos multiplicadores de fuerza para el diseño y construcción de un exoesqueleto robótico de extremidad superior para levantamiento de carga.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Investigar los mecanismos multiplicadores de fuerza en fuentes bibliográficas, páginas web certificadas y marcas comerciales para establecer puntos de comparación, ventajas y desventajas de las

características generales de los mismos y seleccionar el más adecuado para el exoesqueleto.

- Diseñar un mecanismo de exoesqueleto de extremidad superior con la utilización de herramientas de diseño CAD/CAE y el análisis de elementos finitos para generar una propuesta de funcionamiento global del exoesqueleto.
- Construir el exoesqueleto diseñado, de forma secuencial y realizar el ensamblaje de sus componentes para establecer parámetros y estrategias de elaboración de piezas en base a costos, materiales y calidad.
- Desarrollar el sistema de control en base al estudio de los mecanismos multiplicadores de fuerza y a la cinemática del exoesqueleto robótico de miembro superior para tener una interacción natural entre el exoesqueleto y el usuario.
- Validar experimentalmente el diseño mecánico y de control con pruebas de movimiento y pruebas de carga.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

2.1.1 Generalidades de los exoesqueletos

Los humanos presentan complejos y especializados algoritmos naturales de control que les brindan la capacidad de realizar tareas complicadas en un amplio rango de condiciones y con rápidos tiempos de respuesta. En contraste, los robots pueden desarrollar tareas que requieren grandes fuerzas o torques, que dependen de la naturaleza de su estructura y de la potencia de sus actuadores. Es evidente entonces, que al combinar estas dos entidades, el humano y el robot, en un solo sistema integrado, se pueden alcanzar soluciones interesantes que se beneficiarían de las ventajas que aporta cada subsistema. Así, la potencia mecánica de las máquinas integrada con el sistema de control inherente del humano, llevaría a realizar tareas que necesitan aplicar grandes fuerzas que de una manera eficiente, lo cual es el principio básico del diseño de sistemas exoesqueléticos. (Grosso & Tibaduiza, 2009)

En el campo de la robótica se utiliza el término robótica para describir las estructuras externas rígidas que proporcionan soporte a las funciones motoras de la persona. (Kazerooni, 1990) Se puede decir que un exoesqueleto es básicamente, una estructura para ser usada sobre el cuerpo humano a manera de prenda de vestir, tal como lo escribe el término inglés “wearable robots”, que sirve como apoyo y se usa para asistir los movimientos y/o aumentar las capacidades del cuerpo humano. (Chávez & Spitia, 2010)

La principal característica de estas interfaces hombre-máquina, es que el contacto entre el usuario y el exoesqueleto permite transferir potencia mecánica y señales de información, por lo tanto su diseño debe ser lo más ergonómico posible para evitar lesiones en el usuario. (Grosso & Tibaduiza, 2009)

2.1.2 Clasificación de los exoesqueletos

Basándose en su portabilidad se puede clasificar a los exoesqueletos como: no portátiles y portátiles como se observa en la figura 1. (Rosen, Brand, & Fuchs, 2001)

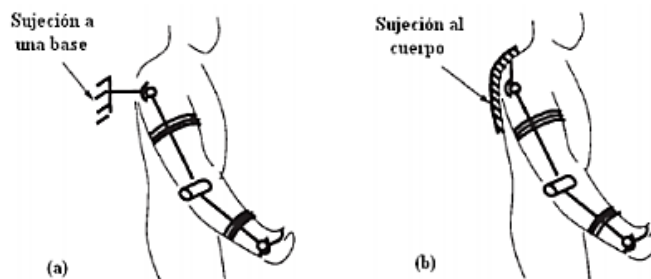


Figura 1 Clasificación: a) No-portátiles. b) Portátiles

Fuente: (Olaya & Ruíz, 2008)

Exoesqueletos portátiles

Estas interfaces portátiles se distinguen de las no portátiles en que el soporte sobre el que se apoya todo el peso del exoesqueleto es el propio usuario o un dispositivo móvil con el usuario. De esta forma los exoesqueletos portátiles ejercen las fuerzas de reacción sobre el usuario en los puntos de sujeción, mientras en los dispositivos no-portátiles dichas fuerzas son ejercidas sobre la base. (Rosen, Brand, & Fuchs, 2001)

Las características de portabilidad en un dispositivo obligan a diseñar interfaces de bajo peso y volumen, para evitar problemas de fatiga. Los actuadores deben disponer de una alta relación potencia-peso y potencia-volumen para poder ser utilizados en estas interfaces. Se clasifican en dos grandes grupos: los exoesqueletos para el brazo y la mano. (Rosen, Brand, & Fuchs, 2001)

2.1.3 Aplicación de los exoesqueletos

Conceptualmente, los sistemas exoesqueléticos pueden usarse para las siguientes aplicaciones. (Rosen, Brand, & Fuchs, 2001)

- Amplificadores de potencia.
- Dispositivo para realimentación háptica y fuerzas.
- Rehabilitación y entrenamiento motor.
- Estudio e investigación.

Amplificadores de potencia

El propósito principal del exoesqueleto en esta configuración es amplificar la capacidad física que puede desarrollar un operador. Sin embargo, también puede ser usado como órtesis para personas físicamente impedidas o limitadas (Rosen, Brand, & Fuchs, 2001)

Cuando se utiliza como amplificador de potencia, la persona suministra señales de control al exoesqueleto, mientras el dispositivo proporciona gran parte de la potencia necesaria para llevar a cabo la tarea. La persona llega a ser parte del sistema y percibe una versión reducida de la fuerza externa ejercida por el exoesqueleto debido a mecanismos de reflexión de fuerzas. (Kazerooni, 1990)

Como algunos usos generales de los exoesqueletos amplificadores de potencia se tiene los siguientes.

- Milicia.
- Construcción.
- Industria.
- Personas de edad.
- Trabajos de rescate.

2.1.4 Exoesqueletos para aplicaciones industriales

a. HAL de Cyberdine (2012)

HAL es un exoesqueleto desarrollado en la Universidad de Tsukuba por Sankai y la empresa Cyberdine para personas con debilidad muscular o para amplificación de fuerza en trabajo de carga (Grosso & Tibaduiza, 2009). Tiene dos objetivos, aumentar la fuerza y para propósitos de rehabilitación. (Kawamoto & Sankai, 2002)

HAL 5 es un exoesqueleto de cuerpo completo capaces de soportar más peso que el humanamente posible. Son utilizados en la industria mecánica y en tareas de apoyo. (Valero C. , 2014)



Figura 2 Exoesqueleto Hal 5

Fuente: (Gómez & Carrillo, 2009)

b. Titan Arm (2013)

Es un exoesqueleto desarrollado por la Universidad de Pennsylvania, pensado para el levantamiento de carga, este miembro robótico es eficiente y de bajo peso aproximadamente ocho kilogramos y capaz de levantar hasta 18 kilogramos extras de peso sin mucho esfuerzo. (Monclova, 2013)



Figura 3 Exoesqueleto Titan Arm

Fuente: (Monclova, 2013)

c. H-Wex de Hyundai (2016)

La marca coreana de autos desarrolló el exoesqueleto H-Wex para aumentar la fuerza y la resistencia, funciona como refuerzo en la espalda y las piernas para proteger la integridad física del usuario y fortalecer su capacidad de carga en actividades industriales. (Peña, 2016)

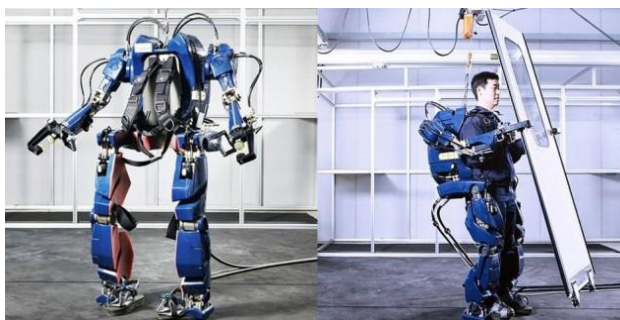


Figura 4 H-Wex de Hyundai

Fuente: (Peña, 2016)

d. Exoesqueletos de Panasonic (2016)

Activelink una de las empresas de capital de riesgo de la casa Panasonic es la encargada del área de robótica, que trabaja principalmente en dos campos; en la asistencia de personas mayores o con problemas de movilidad y el industrial- ayudando a trabajadores en sus actividades. (Xataka, 2016)

- **Exoesqueleto Ninja PLN-01**

Es un exoesqueleto para los miembros superiores del cuerpo, ayuda a cargar con el peso que se vaya a levantar con los brazos con el mínimo de esfuerzo, capaz de levantar hasta 12 kilogramos por brazo, principalmente es aplicable en áreas industriales donde se realice trabajos repetitivos y peligrosos. (Xataka, 2016)



Figura 5 Exoesqueleto Ninja PLN-01

Fuente: (Xataka, 2016)

- **Power Loader**

Exoesqueleto gigante, compuesto por cuatro sensores en cada mano y pie coordinan los movimientos de veinte motores, indicado como un traje de gran alcance, perfecto para su uso durante episodios de desastres, la construcción y la industria. (Matus, Digital Trends ES, 2016)

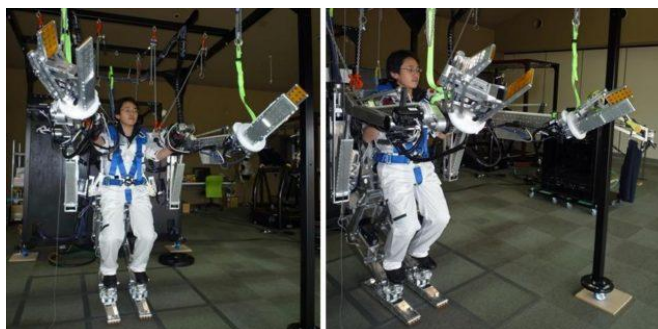


Figura 6 Exoesqueleto Power Loader

Fuente: (Matus, Digital Trends ES, 2016)

e. Exoesqueleto EksoVest de Ford (2017)

El gigante estadounidense de la automoción ha realizado una profunda apuesta por la tecnología en su línea de montaje, el modelo que ha elegido Ford es el EksoVest, desarrollado por Ekso Bionics. EksoVest es un exoesqueleto auxiliar de la parte superior del cuerpo humano que ayuda a los trabajadores de una línea de ensamblaje a hacer su trabajo de manera más eficiente y tiene como objetivo reducir la posibilidad de fatiga y lesiones en el trabajo. (Matus, Digital Trends ES, 2017)

El dispositivo portátil ligero se eleva y sostiene los brazos de un trabajador puede ser utilizado por personas que midan entre 1,52 y 1,95 metros. La cantidad de asistencia oscila entre 3 y 7 kilogramos por brazo lo que ayuda a disminuir el coste físico. (Matus, Digital Trends ES, 2017)

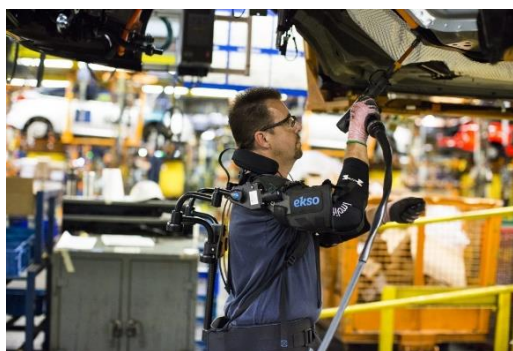


Figura 7 Exoesqueleto EksoVest de Ford

Fuente: (Matus, Digital Trends ES, 2017)

f. Robo-Mate (2017)

Es un exoesqueleto para desguazar vehículos en el sector del reciclaje automovilístico, desarrollado por la empresa francesa de reciclaje Indra con el patrocinio de Fiat y organismos oficiales de la Unión Europea. Facilita mucho los trabajos, ya que dota al operario de una fuerza muy superior y que puede llegar a multiplicarse por diez. En la práctica, los esfuerzos soportados por la columna vertical o lumbar y los brazos se reducen al mínimo y el trabajador puede manipular cargas de 15 kilogramos sin el mínimo esfuerzo muscular y articular. Con un peso total de 10 kilogramos, el Robo-Mate no solo facilita este tipo de manipulaciones directas, en el trabajo de desguace de automóviles. También aporta una sustancial mejora general en cuanto a las condiciones laborales. (Soto, 2017)



Figura 8 Robo Mate

Fuente: (Soto, 2017)

g. SARCOS (Entre 2019 y 2020)

Entre 2019 y 2020 quiere comercializar tres modelos de exoesqueletos para el área industrial para otorgar a sus usuarios de una fuerza extraordinaria para levantar objetos pesados. (Xataka, 2017)

- **Guardian XO**

Se trata de un exoesqueleto industrial de cuerpo completo que permitirá al portador levantar 36 kilogramos sin arriesgarse a sufrir lesiones por el esfuerzo. Todo ello con un diseño sencillo con el que prometen no restringir la libertad de movimiento del operador. Además de que el trabajador sufrirá menos lesiones y una mayor productividad. Su costo podría fluctuar a partir de 50000 dólares. (Xataka, 2017)



Figura 9 Guardian XO

Fuente: (Xataka, 2017)

- **Guardian XO Max**

Una exoarmadura de aspecto bastante mecánico y capaz de levantar 90 kilogramos, además se podrá manejar de forma remota con un panel de control. De esta manera si se la utiliza en situaciones peligrosas el operador no sufrirá ningún tipo de peligro. (Xataka, 2017)



Figura 10 Guardian XO Max
Fuente: (Xataka, 2017)

- **Guardian GT**

Dos monstruosos brazos mecánicos capaces de levantar 450 kilogramos. El usuario no irá dentro del mecanismo, sino que podría operarlos con unos controles. Los controles serán una especie de brazos mecánicos, de manera que este modelo también actuara como una extensión de los brazos del piloto. (Xataka, 2017)



Figura 11 Guardian GT
Fuente: (Xataka, 2017)

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Biomecánica

Con el estudio de la biomecánica se determina que para el levantamiento de carga con el miembro superior es necesario que el exoesqueleto tenga dos grados de libertad los cuales emulan las dos articulaciones principales del brazo que son: hombro y codo, para esto, de acuerdo a la biomecánica del brazo se estableció que actuarán los movimientos de flexo-extensión en las articulaciones antes mencionadas.

2.2.2 Biomecánica del hombro

El hombro o articulación proximal del miembro superior, es la más móvil de todas las articulaciones del cuerpo humano. Posee 3 grados de libertad

(GDL), lo que le permite orientar el miembro superior en relación a los tres planos del espacio, en base a tres ejes principales. (Kapandji, 2012)

Movimientos en el hombro

El eje longitudinal del húmero permite la rotación externa/interna del brazo y del miembro superior de dos formas distintas: Flexo-extensión y abducción. (Kapandji, 2012)

- **Flexo-extensión**

Los movimientos de flexo- extensión se efectúan en el plano sagital, en torno al eje transversal. (Kapandji, 2012)

- **Extensión:** Movimiento de poca amplitud, 45 a 50°.
- **Flexión:** Movimiento de gran amplitud, 180°, observe que la misma posición de flexión a 180° puede definirse también como una abducción de 180°, próxima a la rotación longitudinal. (Kapandji, 2012)

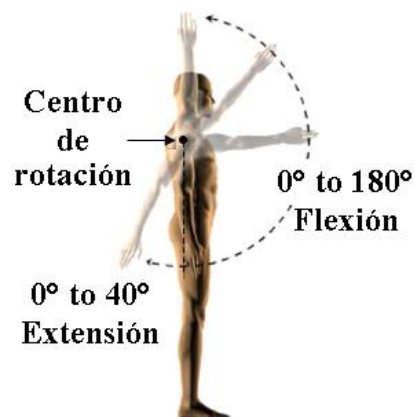


Figura 12 Movimientos del hombro: flexo-extensión

Fuente: (Kapandji, 2012)

- **La abducción**

La abducción es el movimiento que aleja el miembro superior del tronco, se realiza en el plano frontal, en torno al eje anteroposterior. (Kapandji, 2012)

En cuanto a las acciones musculares y el juego articular, la abducción que el exoesqueleto presentará son:

- **Posición anatómica** (apartado a figura 13).
- **Abducción de 0° a 60°** (apartado b figura 13) que puede efectuarse únicamente en la articulación glenohumeral.

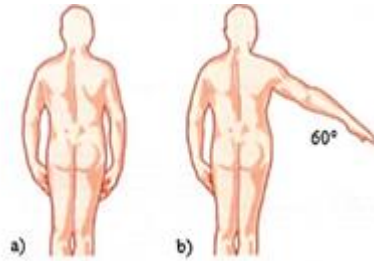


Figura 13 Movimientos del hombro: Abducción

Fuente: (Kapandji, 2012)

2.2.3 Biomecánica del codo

El codo es una articulación en bisagra/pivote formada por el extremo proximal del cúbito o ulna y del radio y el extremo distal del húmero. Funcionalmente, el codo es una sola articulación, ya que todo está envuelto por una cápsula articular. (Kapandji, 2012)

Movimientos en el codo

- **Flexo-extensión**

- **Flexión:** Amplitud de 145°, en un único tiempo, y partiendo de la posición anatómica. El ángulo que se forma entre el brazo superior y el antebrazo al realizar la flexión es de 35° ($145^\circ + 35^\circ = 180^\circ$). (Kapandji, 2012)
- **Extensión:** De la flexión máxima, la extensión recorre nuevamente 145° para llegar a la extensión completa. El ángulo formado entre el brazo superior y el antebrazo en este caso es de 180°. (Kapandji, 2012)

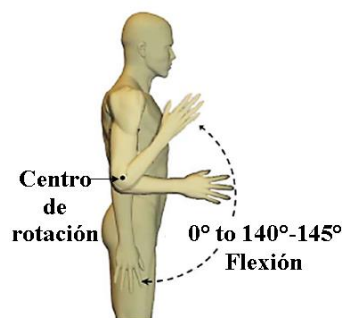


Figura 14 Movimiento en el codo: Flexo-extensión

Fuente: (Kapandji, 2012)

2.3 Antropometría

2.3.1 Generalidades

Partiendo de la necesidad de un diseño ergonómico y acorde a los estándares de la población en la que será aplicado el exoesqueleto, es primordial disponer de los datos antropométricos.

La antropometría es la ciencia de las mediciones de los seres humanos. La Antropometría estática o estructural es aquella cuyo objetivo es la medición de dimensiones estáticas, es decir, aquellas que se toman con el cuerpo en una posición fija y determinada. (Valero E. , 2017)

La antropometría descubre las relaciones entre las distintas dimensiones corporales. Estas relaciones pueden ser utilizadas para el diseño o evaluación de los productos. (Norton & Olds, 1996)

2.3.2 Medidas antropométricas necesarias para el exoesqueleto.

a. Altura Normal

Altura Normal o estatura es la distancia vertical desde la horizontal (superficie de sustentación) hasta el vértex (parte superior y más prominente de la cabeza). Esta medida se determina con la persona en posición erecta, con los miembros superiores a ambos lados del cuerpo, las palmas y dedos de las manos rectos y extendidos hacia abajo, mirando hacia el frente, en bipedestación, con el peso distribuido equitativamente en ambos pies, distancia A de la figura 15. (Carmenate, Moncada, & Borjas, 2014)

b. Longitud de la espalda

Distancia horizontal desde los puntos más laterales de los brazos (máxima protuberancia de los músculos deltoides), con los miembros superiores extendidos hacia delante, distancia B de la figura 15. (Carmenate, Moncada, & Borjas, 2014)

c. Longitud hombro-codo

Es la longitud del brazo superior, también se conoce como longitud acromial-radial y es la distancia o medida obtenida desde la marca acromial

(hombro) hasta la marca radial (codo), distancia C de la figura 15. (Norton & Olds, 1996)

d. Longitud codo a las puntas de los dedos

Distancia horizontal desde la parte posterior del codo hasta la punta del tercer dedo (medio) de la mano. Se determina en posición sedente, erecta, mirando hacia el frente, con rodillas y tobillos en ángulo recto. El antebrazo flexionado en ángulo recto (90°), mano y dedos extendidos, distancia D de la figura 15. (Carmenate, Moncada, & Borjas, 2014)

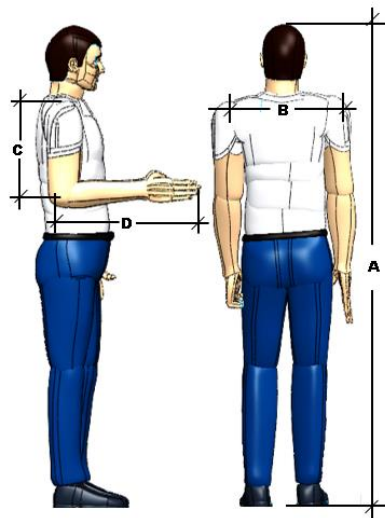


Figura 15 Dimensiones antropométricas

2.3.3 Datos antropométricos de la población ecuatoriana

Un exoesqueleto es considerado una prenda, por lo que la comodidad del usuario es un desafío en el diseño. Como tal, se usaron medidas estándares de personas promedio. Sin embargo en el Ecuador, no se cuenta con datos oficiales sobre dimensiones antropométricas de la población ecuatoriana mucho menos de grupos tales como personal militar, estudiantil o trabajador; este último grupo siendo el centro de enfoque de la investigación, sin embargo existen publicaciones científicas en varias Universidades del país sobre la antropometría de la población en edad de trabajar, datos que se tomaron como un punto de referencia para el desarrollo de este proyecto.

Medidas antropométricas de la población laboral ecuatoriana

A continuación se presenta la tabla con las medidas (en metros) con los respectivos percentiles 5, 50 y 95.

Tabla 1
Medidas antropométricas ecuatorianas

N°	Medidas	5°	50°	95°
1	Altura Normal	1,6225	1,7239	1,825
2	Altura posición sentado normal	0,8472	0,8991	0,9490
3	Altura posición sentado relajado	0,8312	0,8809	0,9307
4	Altura de la rodilla	0,4743	0,5239	0,5735
5	Altura de la poplítea	0,3645	0,4145	0,4645
6	Altura del codo en posición sentado	0,1836	0,2322	0,2809
7	Grosor del muslo	0,0995	0,01320	0,01644
8	Longitud Glúteo-rodilla	0,5119	0,5711	0,6302
9	Longitud glúteo-poplítea	0,4001	0,4636	0,5271
10	Longitud codo-codo posición sentado	0,3802	0,4470	0,5138
11	Ancho de caderas posición sentado	0,3150	0,3562	0,3975
12	Longitud Hombro-Codo	0,3353	0,3632	0,3912
13	Longitud Codo-mano	0,4215	0,4608	0,5000

Fuente: (Lema, 2013)

2.4 Percentiles

Los datos antropométricos se expresan generalmente en percentiles. Un percentil expresa el porcentaje de individuos de una población dada con una dimensión corporal igual o menor a un determinado valor. Los percentiles más empleados en diseño ergonómico son el P5 y el P95, es decir, que se proyecta para un 90% de los usuarios. (Valero E. , 2017)

Por consiguiente para el diseño del exoesqueleto se decidió usar como grupo de estudio las personas que se encuentran en el percentil P5.

2.5 Masa segmental con referencia a la masa total del cuerpo

Estos datos permiten una estimación más precisa de las dimensiones antropométricas del cuerpo humana. En base a parámetros para cada segmento del cuerpo y una relación que permite determinar la masa de cada segmento con respecto a la masa total del cuerpo. (Clauser & Conville, 1969)

Tabla 2
Masa segmental con referencia a la masa total del cuerpo

Segmento	Masa	CG
Cabeza y cuello	7,3%	46,4%
Tronco	50,7%	38,03%
Brazo	2,6%	51,3 %
Antebrazo y mano	2,3%	--
Antebrazo	1,6%	38,96%
Brazo completo	5%	--

Continúa →

Mano	0,7%	82%
Muslo	10,3%	37,19%
Pie	1,5%	44,9%

Fuente: (Clauser & Conville, 1969)

2.6 Ergonomía

La ergonomía es, de hecho, la ciencia fundamental del diseño. Se preocupa por optimizar la eficiencia, la salud, la seguridad, y el confort de las personas en el trabajo. Esto, por lo general, requiere el estudio de los sistemas en los cuales interactúan seres humanos y máquinas en este caso el exoesqueleto y el usuario, con el fin de adecuar la tarea y optimizar su rendimiento. (Norton & Olds, 1996)

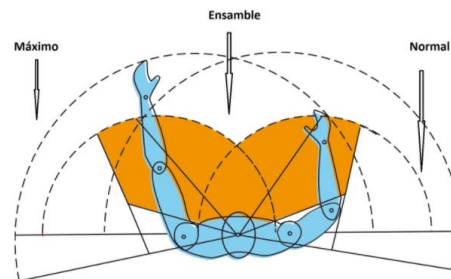


Figura 16 Ergonomía

Fuente: (Norton & Olds, 1996)

2.7 Manipulación manual de cargas

La manipulación manual de cargas se define como cualquier operación de transporte o sujeción de una carga por parte de uno o varios trabajadores, como el levantamiento, la colocación, el empuje, la tracción o el desplazamiento, que por sus características o condiciones ergonómicas inadecuadas entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores. (INSHT, 1997)

2.7.1 Efectos de la manipulación manual de cargas

- Trastornos acumulativos debido al progresivo deterioro del sistema musculoesquelético por la realización continua de actividades de levantamiento y manipulación de cargas, por ejemplo dolores dorsolumbares. (OSHA, 2007)
- Traumatismos agudos como cortes o fracturas debidos a accidentes. (OSHA, 2007)

2.7.2 Aspectos para agravar una lesión de espalda

El riesgo de sufrir una lesión de espalda aumenta si la tarea es:

- Agotadora, es decir, se realiza con demasiada frecuencia o durante demasiado tiempo. (OSHA, 2007)
- Implica la adopción de posturas o movimientos forzados, por ejemplo inclinar o torcer el tronco, levantar los brazos, girar las muñecas o realizar estiramientos excesivos. (OSHA, 2007)
- Incluye una manipulación repetitiva. (OSHA, 2007)

También puede aumentar el riesgo si se dan las siguientes características en el entorno:

- Un espacio insuficiente para la manipulación manual de cargas puede inducir a una postura forzada y favorecer un desplazamiento peligroso de la carga. (OSHA, 2007)

2.7.3 Medidas Preventivas

- **Eliminación:** Analizar si se puede evitar la manipulación manual de cargas, por ejemplo usando equipos eléctricos o mecánicos como cintas transportadoras o carretillas elevadoras. (OSHA, 2007)
- **Medidas técnicas:** Si la manipulación manual de cargas no se puede evitar, se debe considerar el uso de equipos de apoyo, como cabrestantes, carros y equipos neumáticos. (OSHA, 2007)

2.7.4 Cargas máximas permisibles para Ecuador

Según la Organización Internacional del trabajo (OIT), determina para Ecuador que en caso de levantamientos, transportes y descargas, permanentes o repetidos, existen directrices gubernamentales que autorizan a los ministerios a fijar el peso máximo que puede permitirse, de acuerdo con la cantidad de operaciones y otras cantidades. (OIT, 2012)

Tabla 3
Cargas máximas permisibles en Ecuador

Género	Edad	Peso
Masculino	Mayores a 18 años	23 kilogramos
Femenino	Mayores a 21 años	12 kilogramos

Fuente: (OIT, 2012)

En base a la OIT el Instituto ecuatoriano de seguridad social en el seguro general de riesgos de trabajo con el Decreto Ejecutivo 2393, establece el Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo. (IESS, 2002)

Implanta el Capítulo V. Manipulación y Almacenamiento, donde el Art. 128. Habla sobre la Manipulación de cargas y enuncian el numeral 1 y 4 lo siguiente:

- El transporte o manejo de materiales en lo posible deberá ser mecanizado, utilizando para el efecto elementos como carretillas, vagonetas, elevadores, transportadores de bandas, grúas, montacargas y similares. (IESS, 2002)
- El peso máximo de la carga que puede soportar un trabajador mayor de 18 años es de 23 kilogramos y una trabajadora mayor de 21 años es de 12 kilogramos. No se deberá exigir ni permitir a un trabajador el transporte manual de carga cuyo peso pueda comprometer su salud o seguridad. (IESS, 2002)

2.7.5 Normativas técnicas para la antropometría y manejo de cargas

- **INSTITUTO ECUATORIANO DE SEGURIDAD SOCIAL. SEGURO GENERAL DE RIESGOS DE TRABAJO. DECRETO EJECUTIVO 2393.** Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo.
- **ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO.** ISBN 92-2-306271-3. Peso máximo en el levantamiento y el transporte de cargas. Ginebra, Suiza.
- **INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.** NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (2014). NTE INEN-ISO 7250-1. Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: definiciones de las medidas del cuerpo y referencias (ISO 7250-1:2008, IDT)
- **ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN** (2007). Requisitos generales para el establecimiento de bases de datos antropométricos. UNE-EN ISO 15535. Madrid.

- **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION** (2017). Basic human body measurements for technological design -- Part 1: Body measurement definitions and landmarks. ISO 7250-1:2017

2.8 Teoría de von Mises

La teoría de von Mises o teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o compresión del mismo material. La teoría de von Mises para materiales dúctiles determina que la falla por fluencia ocurre cuando el esfuerzo de von Mises es igual o mayor que la resistencia a la fluencia (S_y) del material. (Budynas & Nisbett, 2014)

Así la ecuación de la fluencia puede escribirse como:

$$\sigma' \geq S_y \quad \text{(Ecu. 1)}$$

Teoría de von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau^2)} \quad \text{(Ecu. 2)}$$

Donde:

σ : Esfuerzo normal por flexión.

τ : Esfuerzo cortante.

Esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{M \cdot C}{I} \quad \text{(Ecu. 3)}$$

$$S = \frac{C}{I} \quad \text{(Ecu. 4)}$$

Donde:

M : Momento flector en la sección a analizar.

C : Distancia desde el eje neutro hasta la fibra de interés.

I : Momento de inercia de la sección de análisis.

Para una sección rectangular S es:

$$S = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{(Ecu. 5)}$$

Donde:

b : Base de la sección rectangular.

h : Altura de la sección rectangular.

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V*Q}{I*b} \quad \text{(Ecu. 6)}$$

Donde:

V : Fuerza cortante en la sección de análisis.

I : Momento de inercia de la sección de análisis.

Q : Primer momento del área.

b : Ancho de la sección a lo largo de la línea horizontal.

2.9 Deformaciones

Los límites de flexión máxima permisible de una viga de máquina, chasis o estructura se expresa como la relación de la flexión máxima ($y_{\text{máx}}$) a la longitud de la viga (L). (Mott & Untener, 2017)

$$\frac{y_{\text{máx}}}{L} = 0,003 \frac{\text{mm}}{\text{mm de longitud de viga}} \quad \text{(Ecu. 7)}$$

2.10 Factor de seguridad

Para evitar una falla estructural, la carga que es capaz de soportar debe ser mayor que la carga a las que se va a someter cuando esté en funcionamiento. La relación de la resistencia real entre la resistencia requerida se conoce como factor de seguridad (FDS), donde 2 es el FDS mínimo para que un elemento de máquina de material dúctil sometido a una carga estática sea seguro (Guoyuan & Haoping, 2017).

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} \quad \text{(Ecu. 8)}$$

Donde:

S_y : Resistencia a la fluencia del material.

σ_{eq} : Esfuerzo de von Mises.

2.11 Mecanismos

Un mecanismo es un dispositivo que transforma el movimiento producido por un elemento motriz en un movimiento deseado en la salida. Mediante un conjunto de elementos mecánicos que hacen una función determinada en una máquina. El conjunto de las funciones de los mecanismos de una máquina ha de ser el necesario para que esta realice la tarea encomendada. La principal función del mecanismo es transmitir o modificar el movimiento. (Cardona & Clos, 2008)

2.11.1 Mecanismos de transmisión de movimiento

Se denomina mecanismo de transmisión al conjunto formado por los órganos que se emplean en las máquinas para transmitir o transformar un tipo de movimiento en otro. Pueden ser transmisión lineal y transmisión circular. (González, 2011)

Transmisión circular

Los mecanismos multiplicadores de fuerza requieren de una reducción para así aumentar el torque que se genera y a su vez la fuerza en el movimiento, los reductores que son más habituales en robótica son aquellas que cuentan con movimiento circular, tanto a la entrada como a la salida. Por lo que los más idóneos para esta aplicación son: engranajes, correas dentadas y cadenas. (Singaña, 2015).

Engranajes: Es un conjunto mecánico compuesto de dos o más ruedas dentadas, cuyos dientes, enlazados entre sí, transmiten un movimiento circular de un árbol a otro. La transmisión se realiza por empuje de un diente a otro, impidiendo el deslizamiento entre las ruedas, lo que permite grandes potencias. (González, 2011)

Características

- Rendimiento próximo al 100%
- Área de trabajo reducido.
- Rozamiento por contacto directo.
- Bajo niveles de ruido y vibración.

- Soportar elevados torques puntuales.
- Reducción elevada de velocidad en un único paso.
- Elevada relación de reducción/transferencia de par.
- Alto torque de salida.
- Capaz de soportar funcionamiento continuo a un par elevado.
- Larga vida de funcionamiento.
- Mínimo mantenimiento.

2.11.2 Mecanismo reductor

Los mecanismos reductores poseen una secuencia de confiabilidad en su funcionamiento y el más confiable es el engranaje seguido de la cadena y finalmente la correa.

Tabla 4
Características de un reductor para manipulador robótico

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50-400
Peso y tamaño	0,1-30 kg
Momento de inercia	10^{-4} kg m ²
Velocidades de entrada máxima	6000-7000rpm
Torque de salida máximo	5700Nm-7900Nm
Rigidez torsional	100-2000 Nm/rad

Fuente: (Singaña, 2015)

Trenes de engranaje epicicloidales o planetarios

Un tren de engranaje es una sucesión de dos o más ruedas dentadas conectadas. El tren de engranaje epicicloidal o planetario es una clase de tren de engranajes que tiene extensa aplicación. En él son necesarias dos entradas para obtener una salida. Se utilizan en los cambios automáticos de los vehículos y en la reductora de los motores aplicados a robótica. (González, 2011)

Está formado por un engrane interior debido a que tiene la forma de una corona, con los dientes tallados en el interior de un anillo o de una rueda con reborde, en vez de en el exterior, suelen ser impulsados por un piñón este tipo de engrane mantiene el sentido de la velocidad angular. (Ayala, 2008)

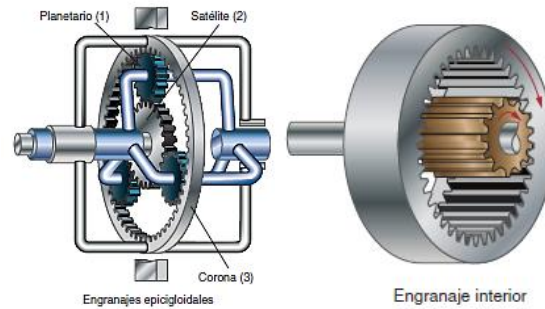


Figura 17 Tipos de trenes de engranaje

Fuente: (González, 2011)

2.12 Actuadores

Los actuadores son los encargados de generar el movimiento de los eslabones del brazo exoesquelético al seguir las órdenes enviadas por el sistema de control. En robótica se utilizan actuadores clasificados en función de la fuente de energía: eléctricos, neumáticos e hidráulicos. (Singaña, 2015)

Tabla 5
Tipos de Actuadores

	Eléctrico	Neumático	Hidráulico
Energía	Corriente eléctrica.	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (50-100 bar)
Tipos	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente continua. • Corriente alterna. • Motor paso a paso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros. • Motores de paletas. • Motor de pistón. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros. • Motores de paletas. • Motor de pistones axiales.

Fuente: (Creus, 2007)

Tabla 6
Ventajas de los tipos de actuadores

	Eléctrico	Neumático	Hidráulico
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Menos pesados. - Mayor precisión. - Respuesta rápida. - Posee sistemas de medición de posición, velocidad y frenos integrados. - No requieren de fluido de trabajo. - Fácil de programar el control de su movimiento. - Montaje mucho más simple. - Bajo tiempo de respuesta en cambio de aceleración, velocidad y cambio de giro. - Instalación sencilla. - Silenciosos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maneja cargas ciertamente considerables. - El fluido de trabajo es limpio. - Velocidades altas. - Rápidos. - Robustos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes fuerzas. - Rápidos. - Alta relación potencia-peso. - Autolubricantes. - Alta capacidad de carga. - Estabilidad frente a cargas estáticas.

Fuente: (Creus, 2007)

Tabla 7
Desventajas de los tipos actuadores

	Eléctrico	Neumático	Hidráulico
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia limitada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ruidosos. - Dificultad de control continuo. - Instalación especial (compresor, filtros, válvulas). - Difícil control de la velocidad - Instalación costosa. - Requiere un compresor de aire. - El vapor de agua del sistema genera corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Caros. - Difícil mantenimiento. - Instalación especial (filtros eliminación de aire). - Menor velocidad que los neumáticos debido a la viscosidad del fluido de trabajo. - Fugas de aceite son comunes, fluido no limpio. - Instalación muy costosa y compleja.

Fuente: (Creus, 2007)

Los actuadores eléctricos son los que equipan la mayoría de aplicaciones robóticas en la actualidad debido a que son menos pesados, más pequeños, más precisos y de respuesta más rápida que los accionamientos neumáticos e hidráulicos. (Singaña, 2015)

Además para el dispositivo se descarta la utilización de actuadores neumáticos e hidráulicos debido a que el exoesqueleto debe poseer autonomía en su movimiento lo cual es imposible con estos actuadores debido a que requieren circuitos cerrados ya sean con compresores de aire o depósitos para el aceite para su funcionamiento.

2.12.1 Actuadores eléctricos

Tecnológicamente existen tres grandes tipos de motores eléctricos en función de la fuente de alimentación necesaria para que funcione, y del parámetro del cual depende su velocidad, motor de corriente continua, corriente alterna y motor paso a paso. (Singaña, 2015)

a. Motor de corriente continua

El motor de corriente continua consiste usualmente en un rotor de imán permanente con un estator bobinado, la relación entre el par y la velocidad es una línea recta de pendiente negativa, es decir, a más velocidad menos par puede proporcionar el motor. El par que suministra viene limitado por la corriente que el bobinado del estator puede soportar sin daños. (Creus, 2007)

Los motores CC son controlados mediante referencias de velocidad generadas por una unidad de control y electrónica específica. Presentan el inconveniente del mantenimiento de escobillas, para evitarlo se ha desarrollado los motores sin escobillas: brushless. (Singaña, 2015)

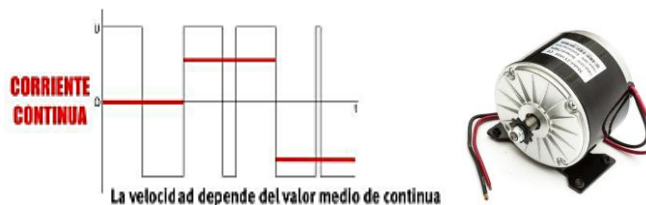


Figura 18 Motores de corriente continua

Fuente: (Singaña, 2015)

b. Comparación entre actuadores eléctricos

Tabla 8

Comparación de ventajas y desventajas de actuadores eléctricos

	C.C.	Corriente alterna	Paso a paso
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Inconveniente del mantenimiento de escobillas, para evitarlo se ha desarrollado los motores sin escobillas: brushless. 	<ul style="list-style-type: none"> -Precio bajo. -Robustez. -Mayor dificultad de control que los CC. -Para controlar posición y velocidad es necesario un variador electrónico. 	<ul style="list-style-type: none"> -El funcionamiento a bajas velocidades no es suave. -Sobrecalentamiento a velocidades elevadas. -Potencia nominal baja.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Facilidad de control de posición, par y velocidad. -Son controlados por referencias de velocidad generadas por unidad de control y electrónica específica. -Posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga. -La velocidad depende de la tensión de alimentación. 	<ul style="list-style-type: none"> -La velocidad depende de la frecuencia. -No tienen escobillas por lo que no presentan problemas de mantenimiento. -Usan convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia con facilidad y precisión. -Emplean microeléctrica que permite una gran capacidad de control. -Gran evacuación del calor. 	<ul style="list-style-type: none"> -La velocidad depende de la frecuencia. -El posicionamiento depende del número de pulsos. -Funcionamiento simple y exacto. -Pueden girar de forma continua y velocidad variable. -Ligeros fiables y fáciles de controlar. -Alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

Fuente: (Singaña, 2015)

Al diseñar el exoesqueleto se pretende reproducir el movimiento del brazo humano para lo cual se requiere de actuadores más adecuados son los motores de corriente continua debido a que simplifica el diseño y mejora la estética del dispositivo por su volumen y peso que es mucho menor en

comparación a los de corriente alterna o motores paso a paso, además permite que el sistema tenga autonomía y movilidad al utilizar para su alimentación baterías de corriente continua con lo cual el dispositivo se puede desplazar con facilidad de un lugar a otro.

2.13 Cinemática de manipuladores robóticos.

El principio de funcionamiento de un exoesqueleto de miembro superior es el mismo que el de un manipulador o brazo robótico, razón por la cual se utiliza la cinemática del manipulador para obtener la cinemática del exoesqueleto.

La cinemática es el estudio del movimiento sin importar las fuerzas que lo causa. Dentro de la cinemática se estudia la posición, velocidad y aceleración, y todas las derivadas de orden superior de las variables de posición. La cinemática de los manipuladores involucra el estudio de las propiedades geométricas y basadas en el tiempo del movimiento, y en particular como varios eslabones se mueven uno con respecto al otro y con el tiempo, y las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del manipulador con los valores que toman sus coordenadas articulares. Además del movimiento del mismo manipulador con respecto a un sistema de referencia. (Barrientos, 2007)

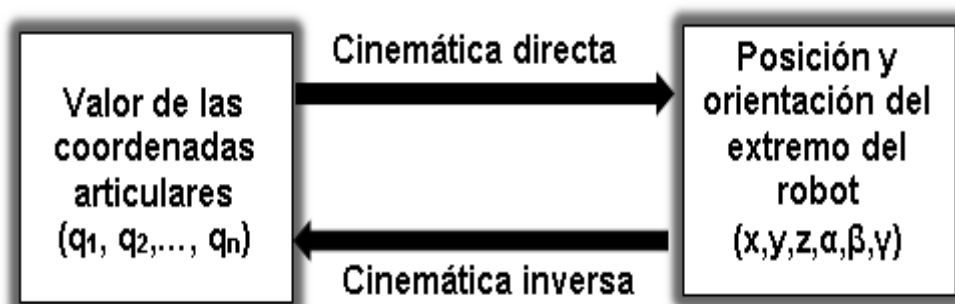


Figura 19 Cinemática directa e inversa

Fuente: (Barrientos, 2007)

2.13.1 Cinemática Directa

Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del manipulador, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidas los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del manipulador. (Barrientos, 2007)

Resolución por Denavit y Hartenberg

Denavit y Hartenberg Propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un manipulador, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4x4 que relacione la localización espacial del extremo del manipulador con respecto al sistema de coordenadas de su base. (Barrientos, 2007)

Las transformaciones básicas que relacionan el sistema $\{S_i\}$ de referencia del elemento i con el sistema $\{S_{i-1}\}$ del elemento $i-1$ son:

- Rotación θ_i alrededor del eje Z_{i-1}
- Traslación d_i a lo largo del eje Z_{i-1}
- Traslación a_i a lo largo del eje X_i
- Rotación α_i alrededor del eje X_i

Transformaciones respuesta sistema móvil: Matriz de transformación A.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Ecu. 9)}$$

Pasos para la resolución por Denavit-Hartenberg

1. Numerar los eslabones.
2. Numerar cada articulación.
3. Localizar el eje de cada articulación.
4. Situar el origen del sistema de la base.
5. Hallar los parámetros Denavit Hartenberg (D-H).
6. Obtener las matrices de transformación A.
7. Obtener la matriz de transformación T.

$$T = A_1 * A_2 \quad \text{(Ecu. 10)}$$

2.13.2 Cinemática Inversa

Resuelve la configuración que debe adoptar el manipulador para una posición y orientación del extremo conocidas. El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del manipulador para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. (Barrientos, 2007)

Se debe conseguir una solución analítica, es decir, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad \text{(Ecu. 11)}$$

$$q_k = K = 1 \dots n \text{ (GDL)} \quad \text{(Ecu. 12)}$$

2.14 Sistemas de control

2.14.1 Unidad de control para exoesqueletos

Esta etapa del sistema consiste en procesar los datos recibidos de los sensores y las órdenes dadas por el usuario y transmitir a los actuadores las señales necesarias para realizar la tarea programada. (Martínez, 2011)

- **Fase de percepción del entorno:** El exoesqueleto dispone de sensores para conocer lo que ocurre en su entorno. Cada sensor detecta una magnitud física variable como temperatura, humedad, un obstáculo en una trayectoria, etc., y lo convierte en una señal eléctrica. El conjunto de señales generadas por los sensores forman los datos de entrada al sistema. (Martínez, 2011)
- **Procesado e interpretación de los datos:** El elemento central del exoesqueleto robótico es la unidad de control. Este sistema consta generalmente de un microprocesador y de un programa específico para el tratamiento de dichos datos. Los datos digitales procedentes de los sensores son leídos e interpretados por el microprocesador, y este activa las señales de control correspondientes para ejecutar una acción. (Martínez, 2011)
- **Ejecución de la acción:** Se denominación a la ejecución física de un cambio en el exoesqueleto robótico, ya sea un movimiento de una articulación, un cambio de posición, una parada, etc. Estas tareas

son realizadas por dispositivos motrices, como motores eléctricos, cilindros neumáticos o hidráulicos, accionados eléctricamente. (Martínez, 2011)

2.14.2 Sensores

Para conseguir que un exoesqueleto realice su tareas con precisión, velocidad e inteligencia, es necesario que disponga de información de su estado (sensores internos) y del estado de su entorno (sensores externos). (Singaña, 2015)

a. Sensor de posición digital

La información que suministran ya es directamente un número con lo que se puede memorizar y procesar inmediatamente. Lógicamente cuanto más cantidad de números se den durante el recorrido del eje, mejor será la precisión del sistema. (Singaña, 2015)

b. Sensores de velocidad

La captación de la velocidad se hace necesaria para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del exoesqueleto. La información de la velocidad de movimiento de cada actuador se realimenta a un bucle de control analógico implementado en el propio accionador del elemento motor. (Singaña, 2015)

c. Sensor acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo versátil y de gran aplicación en el campo de la electrónica y la física, siendo el más común el piezoeléctrico por compresión, el cual se basa en el principio de que, cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada (Herrera, 2010)

El sensor MMA7361 es un acelerómetro analógico de 3 ejes (x, y, z). El nivel de las medidas del acelerómetro, permite medir la aceleración, o la inclinación de una plataforma con respecto al eje terrestre, otras características que tiene son el modo sleep, compensación de temperatura, auto prueba, y detección de 0g para caída libre. (HETPRO, 2018)



Figura 20 Acelerómetro MMA7361

Fuente: (HETPRO, 2018)

Tabla 9

Características del acelerómetro MMA 7361

Características	Acelerómetro MMA 7361
Voltaje de operación	2,2 – 3,6 VDC
Ejes de operación	3 (x,y,z)
Alta sensibilidad	800mV/g@1,5g
Consumo de corriente	400 uA
Modo de espera	3 uA
Tiempo de respuesta activa	0,5ms

Fuente: (HETPRO, 2018)

d. Sensores de efecto hall

Semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto hall sólo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo, cuando emplean en conjunción con un imán permanente en la configuración, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos.

Usando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto hall detecta un campo magnético interno en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano. (Singaña, 2015)

2.14.3 Servocontroladora de potencia

La servocontroladora ESCON es una compacta servocontroladora de alto rendimiento de 4 cuadrantes modulada por duración de pulso (PWM) para accionar eficazmente motores de CC con imán permanente y con escobillas, así como motores de CE sin escobillas. (Maxon Motor, 2015)

Los modos operativos de que se dispone (regulador de velocidad, variador de velocidad o regulador de corriente) satisfacen los requisitos más exigentes. La servocontroladora ESCON se ha diseñado de forma que pueda ser gobernada mediante un valor de consigna analógico y dispone de numerosas funcionalidades con entradas/salidas digitales y analógicas. Este dispositivo

se configura pa PCs windows mediante la interfáz gráfica de usuario “ESCON Studio” a través del puerto USB. (Maxon Motor, 2015)



Figura 21 Tarjeta servocontroladora

Fuente: (Maxon Motor, 2015)

2.14.4 Microcontrolador

Funciona como el cerebro del dispositivo, toma la información captada por los sensores y procede a controlar los actuador.

Arduino Uno es una placa de microcontrolador basada en ATmega328P. Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio (Arduino, 2018).



Figura 22 Arduino uno

Fuente: (Arduino, 2018)

Tabla 10

Características del Arduino Uno

Características	Arduino Uno
Microcontrolador	ATmega 328
Voltaje de operación	5v
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12v
Voltaje de entrada (maximo)	6-20v
Pines I/O Digitales	14
Pines lentrada analogos	6
Corriente I/O	40mA
Corriente para el pin 3,3V	50mA
SRAM	2kb
Velocidad del reloj	16Mhz

Fuente: (Arduino, 2018)

2.14.5 Baterías

Una batería eléctrica es un dispositivo que, formado por una o varias celdas electroquímicas, puede convertir la energía química que almacena en electricidad. A diferencia de las pilas, la reacción química que permite su funcionamiento es reversible, por lo que permite volver a cargar la batería por medios eléctricos. (Hiper, 2016)

Principales tipos de baterías:

- Baterías níquel-cadmio (Ni-Cd), están formados por electrodos de plomo bañados en un electrolito de ácido sulfúrico. No admiten sobrecargas ni descargas profundas y tienen un peso y volumen elevados. (Hiper, 2016)
- Baterías níquel- hidruro metálico (Ni-MH), formados por un ánodo de cadmio y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Menor efecto memoria y mayor capacidad, no trabaja bien con fríos extremos. (Hiper, 2016)
- Baterías iones de Litio (Li-ion), emplean un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto u óxido de manganeso. Su capacidad es elevada en relación a su peso y volumen, teniendo además un factor de descarga muy reducido. No soporta bien los cambios de temperatura y no admiten descargas completas. (Hiper, 2016)
- Baterías de polímero de Litio (Li-Po), son una variación de las baterías de iones litio que mejoran sus características de peso y volumen, así como su tasa de descarga, acusan mucho las descargas profundas quedando prácticamente inutilizadas si se descarga en exceso. (Hiper, 2016)

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL EXOESQUELETO

3.1 Parámetros de diseño

Como parámetros iniciales en el diseño se tiene que el exoesqueleto podrá levantar una carga neta de 12 kilogramos mediante sus actuadores. Constará con 2 grados de libertad que serán los movimiento de flexo-extensión en el codo y flexo-extensión en el hombro, además estos tendrán un rango de movilidad que el caso del primero será de 0° a 120° y en el segundo de 0° a 100° . Estos datos varían de los valores determinados en la biomecánica del capítulo anterior, debido a que los movimientos del exoesqueleto son limitados por sus eslabones y la estructura que los conforma. Estos rangos de movimiento tendrán un tiempo de levantamiento aproximado de 1,5 seg para el codo y 2,5 seg para el hombro, como adicional el exoesqueleto permitirá el movimiento de abducción (no motorizado) de 0° a 60° .

En la parte antropométrica se tomará las medidas de percentil 5 en la población ecuatoriana debido a que tomando mediciones con la población del entorno en donde se realiza el proyecto se encontró que estas medidas son las que se aproximan más a la realidad. Se considera que el diseño será para una persona de una masa promedio de 60 kilogramos, además en la parte ergonómica se tomara en cuenta que el exoesqueleto debe ser ligero, debe ser cómodo, seguro y portable, permitir una fácil movilidad y transportación así como una fácil colocación para el usuario.

3.2 Diseño geométrico del exoesqueleto

El exoesqueleto a diseñar como se muestra en la figura 23, constará de las siguientes partes:

1. Un espaldar el cual sirve de soporte para el brazo exoesquelético.
2. Un brazo exoesquelético que será el encargado de levantar la carga formado por dos eslabones el antebrazo y el brazo superior exoesquelético.

3. Un hombro exoesquelético que une el brazo con el espaldar, que además permite realizar un movimiento de abducción de 0° a 60°
4. Dos actuadores uno en el codo y otro en el hombro los cuales generaran los movimientos de flexo-extensión.

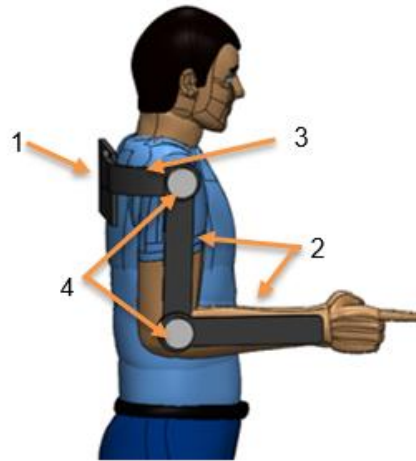


Figura 23 Diseño geométrico del exoesqueleto

Como se enuncio anteriormente para las medidas el brazo exoesquelético y sus dos eslabones se toma en cuenta las medidas antropométricas (Percentil 5), pero cabe recalcar que para los cálculos el valor que se toma en para cada eslabón es la medida entre los centros de rotación de los motores (ver figura 24), es decir en los puntos de unión de los eslabones, en el brazo superior desde el centro de giro del hombro hasta el centro de giro del codo (264 mm), en el antebrazo desde el centro de giro del codo hasta la muñeca (270 mm), medidas tomadas del diseño final.

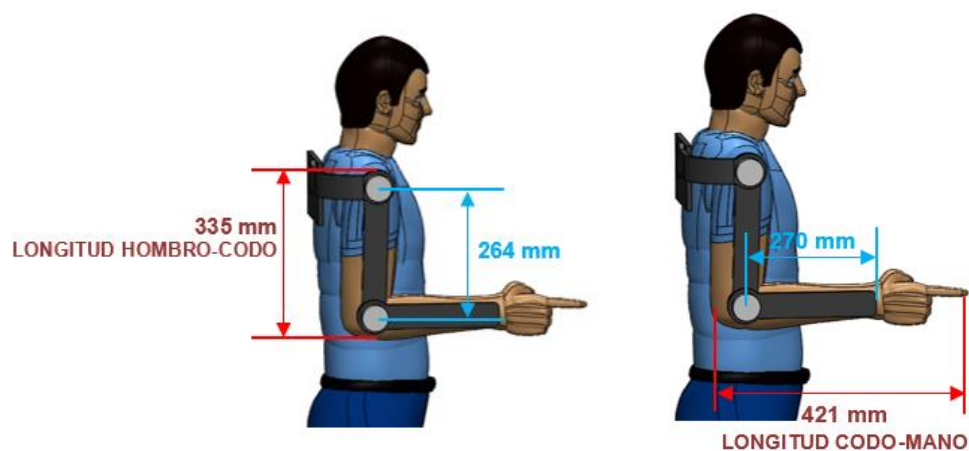


Figura 24 Diseño geométrico del exoesqueleto

3.3 Cinemática del exoesqueleto

Con la cinemática se obtiene el modelo matemático del exoesqueleto, formulismo muy útil para determinar si en alguna posición o configuración del exoesqueleto se presentan problemas extraños o inesperados que ocasionen colisiones durante su funcionamiento en algún ángulo determinado de desplazamiento, parámetros para luego tenerlas en cuenta en el diseño a realizar.

3.3.1 Cálculo de la cinemática directa del exoesqueleto

En la figura 25, se establecen los parámetros Denavit- Hartenberg necesarios para el cálculo de la matriz de transformación que determina la posición y orientación del extremo del exoesqueleto con respecto al sistema de coordenadas x e y.

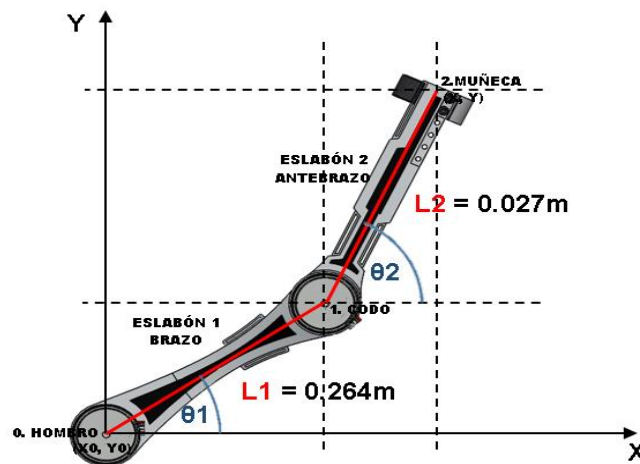


Figura 25 Parámetros para Denavit-Hartenberg

Tabla 11

Parámetros Denavit Hartenberg (D-H) del exoesqueleto

Articulación	θ (Rotación en el eje z)	d (Traslación en el eje z)	a (Traslación en el eje x)	α (Rotación en el eje x)
1 (hombro)	θ_1 (ángulo del hombro)	0	L1 (Longitud del brazo)	0°
2 (codo)	θ_2 (ángulo del codo)	0	L2 (Longitud del antebrazo)	0°

Los parámetros D-H se remplazan en la ecuación 9 y se obtienen la matriz de transformación A1 y la matriz de transformación A2 que se requiere para el cálculo de la matriz de transformación T.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\cos(0^\circ) * \text{Sen}\theta_1 & \text{Sen}(0^\circ) * \text{Sen}\theta_1 & 0,264 * \cos\theta_1 \\ \text{Sen}\theta_1 & \cos(0^\circ) * \cos\theta_1 & -\text{Sen}(0^\circ) * \cos\theta_1 & 0,264 * \text{Sen}\theta_1 \\ 0 & \text{Sen}(0^\circ) & \cos(0^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\cos(0^\circ) * \text{Sen}\theta_2 & \text{Sen}(0^\circ) * \text{Sen}\theta_2 & 0,27 * \cos\theta_2 \\ \text{Sen}\theta_2 & \cos(0^\circ) * \cos\theta_2 & -\text{Sen}(0^\circ) * \cos\theta_2 & 0,27 * \text{Sen}\theta_2 \\ 0 & \text{Sen}(0^\circ) & \cos(0^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación T se obtiene aplicando la ecuación 10, que consiste en multiplicar las matrices A, es así que esta matriz representa la posición en (x, y) del extremo del exoesqueleto con respecto a la base, además conociendo las longitudes de los eslabones (ver figura 25) y variando los ángulos de desplazamiento (θ_1 y θ_2) definidos en los parámetros de diseño del exoesqueleto se tiene:

$$T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,264 * \cos(\theta_1) + 0,27 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0,264 * \sin(\theta_1) + 0,27 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

En base a los parámetros funcionales, la aplicación de la ecuación de transformación T obtenida y con la utilización de un software matemático se determina el espacio de trabajo (área rayada de la figura 26) en el que el exoesqueleto se mueve sin sufrir colisiones. Además se genera una tabla con medidas de las posiciones del extremo del exoesqueleto en los ejes x e y, para un movimiento de flexo-extensión en la coyuntura del hombro en la que el ángulo se desplaza en un rango de 0 a 100° y el ángulo del codo es 0°.

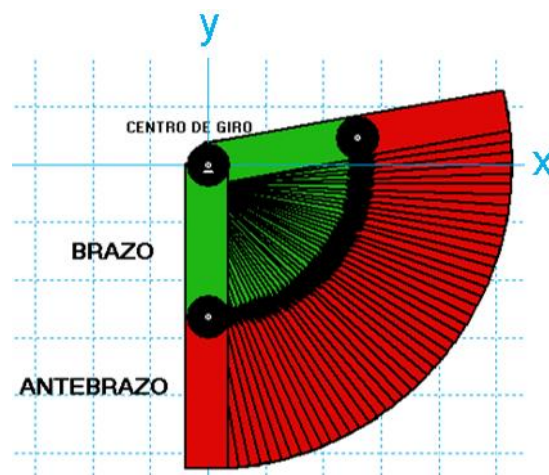


Figura 26 Espacio de trabajo: Flexo-extensión del brazo

La tabla 12, muestra la longitud máxima y mínima del brazo exoesquelético en los ejes x e y, para un movimiento de flexo-extensión del brazo, es así que cuando el brazo exoesquelético se encuentre en la posición 0° el extremo estará a 0,534 metros del centro de rotación en el eje $-y$.

Tabla 12
Posiciones en x, y del extremo del exoesqueleto con $\theta_2=0^\circ$

Ángulo de flexo- extensión del brazo ($^\circ$)	Ángulo (θ_1)	Ángulo (θ_2)	x (m)	y (m)
0°	-90°	0°	0,000	-0,534
5°	-85°	0°	0,047	-0,532
10°	-80°	0°	0,093	-0,526
15°	-75°	0°	0,138	-0,516
20°	-70°	0°	0,183	-0,502
25°	-65°	0°	0,226	-0,484
30°	-60°	0°	0,267	-0,462
35°	-55°	0°	0,306	-0,437
40°	-50°	0°	0,343	-0,409
45°	-45°	0°	0,378	-0,378
50°	-40°	0°	0,409	-0,343
55°	-35°	0°	0,437	-0,306
60°	-30°	0°	0,462	-0,267
65°	-25°	0°	0,484	-0,226
70°	-20°	0°	0,502	-0,183
75°	-15°	0°	0,516	-0,138
80°	-10°	0°	0,526	-0,093
85°	-5°	0°	0,532	-0,047
90°	0°	0°	0,534	0,000
95°	5°	0°	0,532	0,047
100°	10°	0°	0,526	0,093

También se requiere determinar el espacio de trabajo del exoesqueleto cuando el ángulo del codo alcanza su mayor desplazamiento 120° y se produce un movimiento de flexo-extensión del brazo, como se observa en la figura 27, el área rayada es el espacio de trabajo en el que el exoesqueleto se mueve sin sufrir colisiones, con lo cual el queda demostrado que los movimientos biomecánicos del exoesqueleto antes establecidos son seguros.

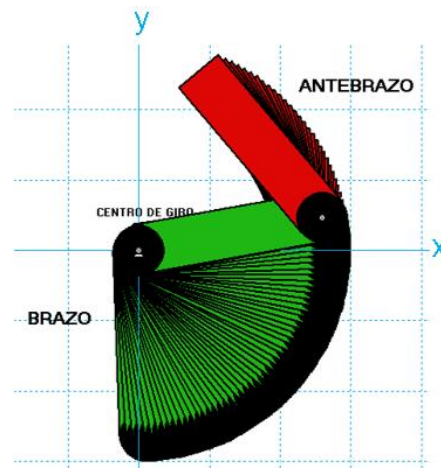


Figura 27 Espacio de trabajo: Flexo-extensión del brazo y antebrazo

La Tabla 13, adquirida con la matriz de transformación T presenta las medidas de la posición del extremo del exoesqueleto en los ejes x e y, para un movimiento de flexo-extensión del brazo de 0 a 100° y con el ángulo del codo desplazado 120°.

Tabla 13

Posiciones en x, y del extremo del exoesqueleto con $\theta_2=120^\circ$

Ángulo de flexo-extensión del brazo (°)	Ángulo (θ_1°)	Ángulo (θ_2°)	x (m)	y (m)
0°	-90°	120°	0,234	-0,129
5°	-85°	120°	0,244	-0,108
10°	-80°	120°	0,253	-0,087
15°	-75°	120°	0,259	-0,064
20°	-70°	120°	0,264	-0,041
25°	-65°	120°	0,267	-0,018
30°	-60°	120°	0,267	0,005
35°	-55°	120°	0,266	0,028
40°	-50°	120°	0,262	0,051
45°	-45°	120°	0,257	0,074
50°	-40°	120°	0,249	0,096
55°	-35°	120°	0,240	0,118
60°	-30°	120°	0,229	0,138
65°	-25°	120°	0,216	0,157
70°	-20°	120°	0,201	0,176
75°	-15°	120°	0,185	0,192
80°	-10°	120°	0,168	0,208
85°	-5°	120°	0,149	0,222
90°	0°	120°	0,129	0,234
95°	5°	120°	0,108	0,244
100°	10°	120°	0,087	0,253

3.4 Análisis de carga

Se parte desde las medidas de los eslabones hombro-codo (Brazo) y codo-mano (Antebrazo) determinados para el estudio.

Datos:

Brazo = 264 mm

Antebrazo = 270 mm

Para determinar el valor aproximado del peso del brazo se toma en cuenta los parámetros del porcentaje de cada masa de cada segmento con referencia a la masa total del cuerpo humano (ver tabla 2), y los pesos de la estructura se tomaron del diseño final del exoesqueleto, lo cual permite determinar el peso total que tienen los eslabones que serán levantados por los motores.

$$Masa_{estructura\ brazo} = 0,4\ Kg$$

$$Masa_{estructura\ antebrazo} = 0,18\ Kg$$

Con los datos de la tabla 2, y el porcentaje de masa en los segmentos a considerar para una persona promedio de 60kg se tienen los siguientes valores:

$$Masa_{corporal\ brazo} = 60\ kg * 0,026 = 1,56\ kg$$

$$Masa_{corporal\ antebrazo} = 60\ kg * 0,016 = 0,96\ kg$$

Para obtener el valor total de las masas en los eslabones se suman la masa corporal y la masa estructural y se tiene:

$$Masa_{total} = Masa_{corporal} + Masa_{estructura}$$

$$Masa_{total\ brazo} = 1,56\ kg + 0,4\ kg = 1,96\ kg$$

$$Masa_{total\ antebrazo} = 0,96\ kg + 0,185\ kg = 1,14\ kg$$

Transformando la masa a peso:

$$Peso_{total\ brazo} = 19,2\ N$$

$$Peso_{total\ antebrazo} = 11,17\ N$$

3.4.1 Cálculo de torque en el codo

Para un diseño seguro y confiable se debe verificar que los eslabones o piezas de la estructura sean lo suficientemente rígidas y vayan a soportar todas las cargas a las que van a estar sometidos, para esto se debe tomar en cuenta las condiciones más críticas de cada sección y así determinar el máximo torque al que estará sometido.

En el análisis del eslabón codo-mano, se considera primero las fuerzas que van a estar involucradas en el movimiento del codo y como fuerza principal en el conjunto se tiene al peso del objeto a levantar que como se mencionó anteriormente para un diseño seguro es necesario considerar el instante más crítico del eslabón, es por eso que se coloca el peso máximo que será de 117,6 Newtons (12 kg), la posición de la figura 28, es en donde se generará el máximo torque, por lo tanto será la posición más crítica del eslabón.

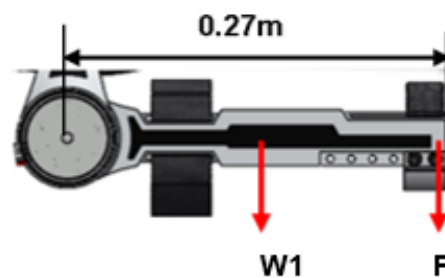


Figura 28 Fuerzas que actúan sobre el antebrazo

Donde:

$$F = \text{Peso a levantar} = 117,6 \text{ N}$$

$$W1 = \text{Peso antebrazo} = 11,17 \text{ N}$$

$$\text{Torque}_{\text{Codo}} = (117,6 \text{ N})(0,27 \text{ m}) + (11,17 \text{ N})(0,135 \text{ m})$$

$$\text{Torque}_{\text{Codo}} = 33,22 \text{ N m}$$

3.4.2 Cálculo de torque en el hombro

Para el análisis del segmento hombro-mano, se sigue el mismo procedimiento que el cálculo anterior, con la diferencia que ahora hay más datos que considerar en las fuerzas que actúan sobre el exoesqueleto, como

el peso del eslabón brazo y el peso del motor en el codo, valor que se obtiene de la sección de selección de motoredutores, de igual manera al emular las condiciones más críticas para tener un diseño seguro, la posición totalmente extendida como se ve en la figura 29, es el estado más crítico del eslabón.

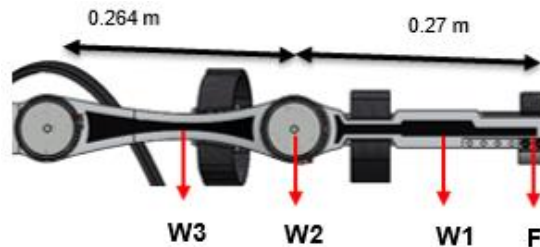


Figura 29 Fuerzas que actúan sobre el brazo

Donde:

$$W2 = \text{Peso motor codo} = 12,15 \text{ N}$$

$$W3 = \text{Peso brazo} = 19,2 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Torque}_{\text{Hombro}} &= (117,6 \text{ N})(0,534 \text{ m}) + (11,17 \text{ N})(0,399 \text{ m}) \\ &+ (12,15 \text{ N})(0,264 \text{ m}) + (19,2 \text{ N})(0,132 \text{ m}) \\ \text{Torque}_{\text{Hombro}} &= 73 \text{ N m} \end{aligned}$$

3.4.3 Cálculo de torque en el espaldar

Finalmente para el análisis del segmento espaldar-mano se determinó que el estado crítico es la misma posición que en el análisis del hombro-mano, considerando las fuerzas y distancias adicionales, la medida del eslabón hombro y su peso se tomaron del diseño final del exoesqueleto, el peso del motor en el hombro también se obtiene de la sección de selección de motoredutores, como se muestra en la figura 30.

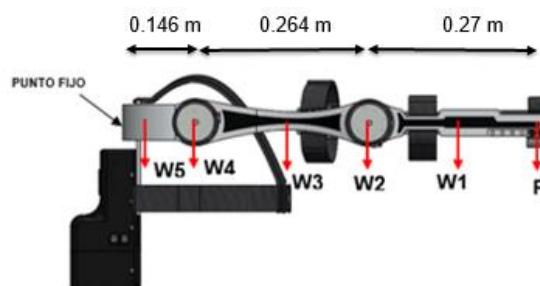


Figura 30 Fuerzas que actúan sobre espaldar

Donde:

$$W4 = \text{Peso motor hombro} = 13,62 \text{ N}$$

$$W5 = \text{Peso hombro} = 4,22 \text{ N}$$

$Torque_{Espaldar}$

$$= (117,6 \text{ N})(0,68 \text{ m}) + (11,17 \text{ N})(0,498 \text{ m}) + (12,15 \text{ N})(0,41 \text{ m}) \\ + (19,2 \text{ N})(0,259 \text{ m}) + (13,62 \text{ N})(0,146 \text{ m}) + (4,22 \text{ N})(0,083 \text{ m})$$

$$\mathbf{Torque_{Espaldar} = 97,82 \text{ N m}}$$

3.5 Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores

3.5.1 Eslabón codo-mano

Con los datos obtenidos anteriormente de las fuerzas que actúan sobre el eslabón se realiza el análisis en software para obtener los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores en la estructura.

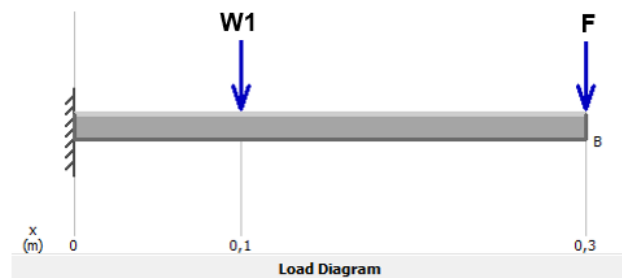


Figura 31 Diagrama de cargas del eslabón codo-mano

Fuerzas cortantes

De acuerdo al diagrama de cargas se obtiene el diagrama de fuerzas cortantes en el cual se determina la fuerza cortante máxima.

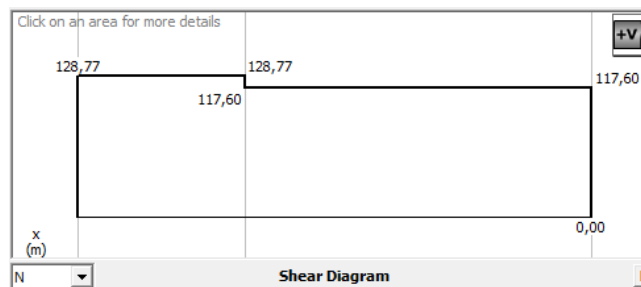


Figura 32 Diagrama de fuerzas cortantes del eslabón codo-mano

$$\mathbf{Fuerza\ cortante\ máxima = 128,77 \text{ N}}$$

Momentos flectores

De acuerdo al diagrama de fuerzas cortantes se obtiene el diagrama de momentos flectores en el cual se determina el momento flector máximo, se concluye que este es el punto a analizar ya que es donde se concentra en mayor grado las fuerzas y momentos que actúan sobre el eslabón.

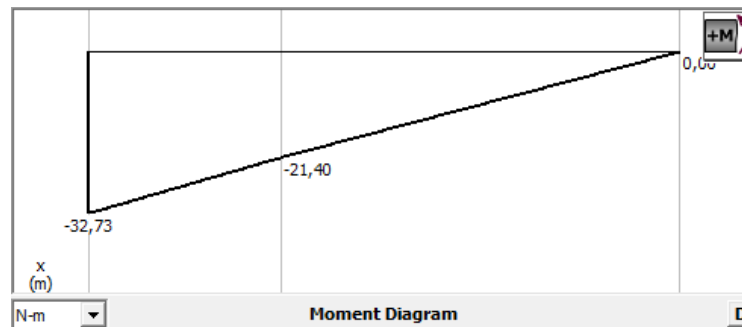


Figura 33 Diagrama de momentos del eslabón codo-mano

$$\text{Momento torsor máximo} = 32,73 \text{ N m}$$

3.5.2 Eslabón hombro-mano

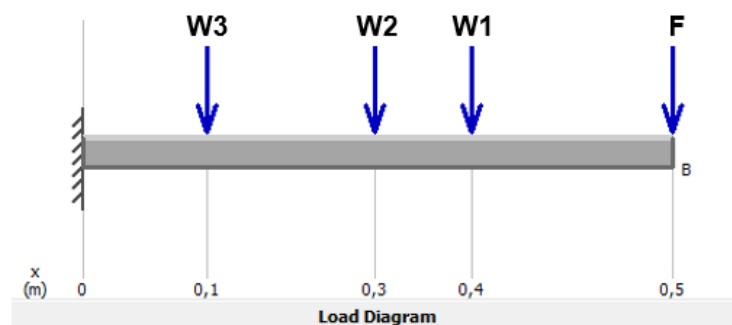


Figura 34 Diagrama de cargas del segmento hombro-mano

Fuerzas cortantes

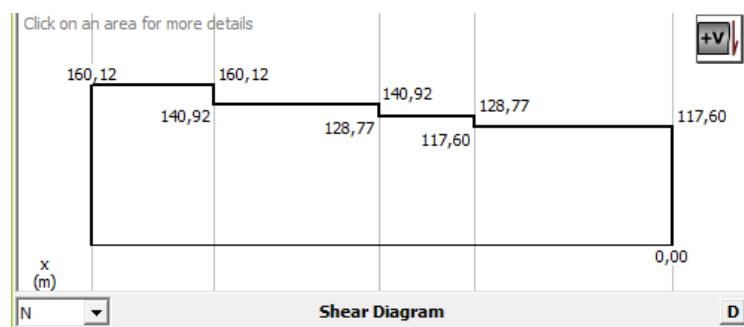


Figura 35 Diagrama de fuerzas cortantes del segmento hombro-mano

$$\text{Fuerza cortante máxima} = 160,12 \text{ N}$$

Momentos flectores

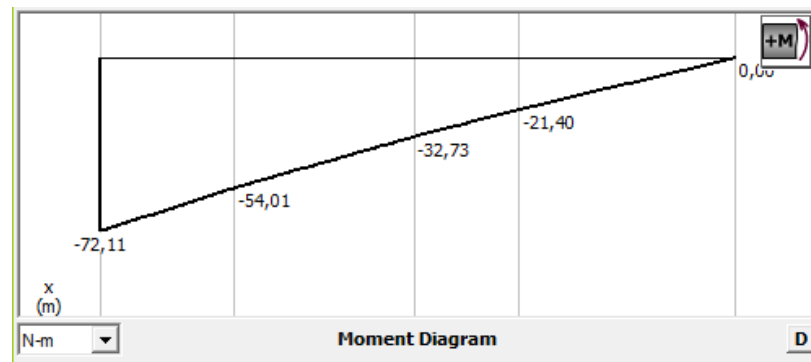


Figura 36 Diagrama de momentos del segmento hombro-mano

Momento torsor máximo = 72,11 N m

3.5.3 Eslabón espaldar-mano

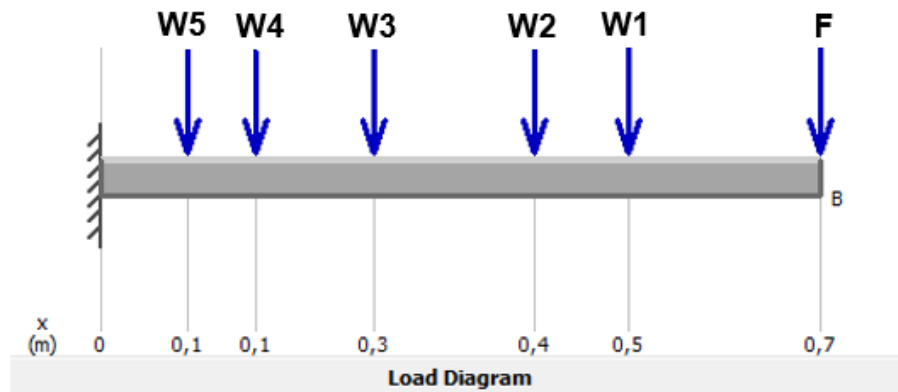


Figura 37 Diagrama de cargas del segmento espaldar-mano

Fuerzas cortantes

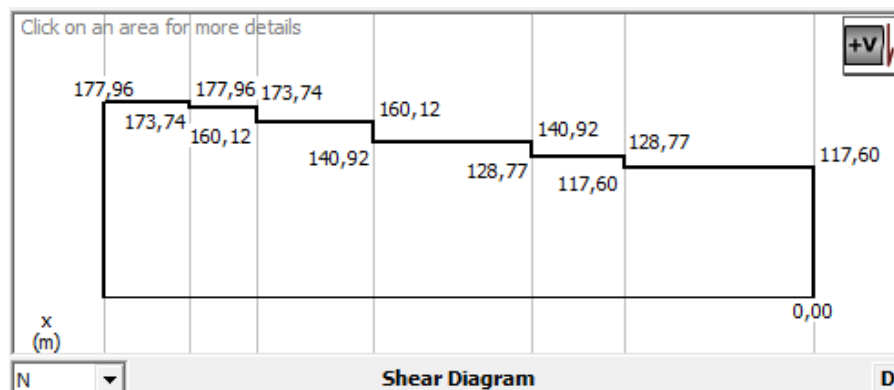


Figura 38 Diagrama de fuerzas cortantes segmento espaldar-mano

Fuerza cortante máxima = 177,96 N

Momentos flectores

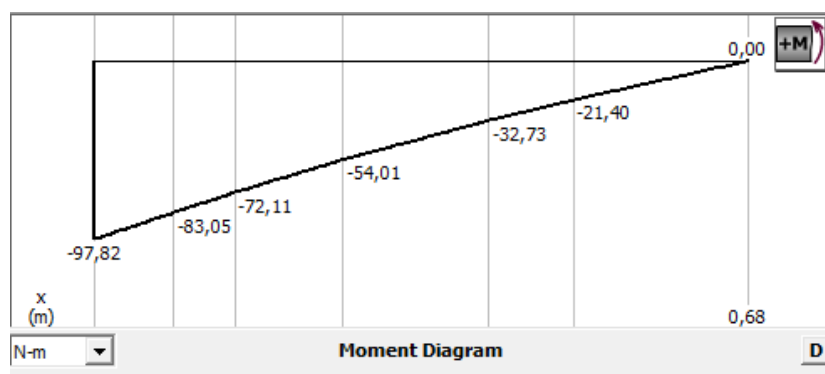


Figura 39 Diagrama de momentos del segmento espaldar-mano

$$\text{Momento torsor máximo} = 97,82 \text{ N m}$$

3.6 Selección de motoredutores

3.6.1 Selección motoreductor del codo

Los motores de corriente continua utilizados en aplicaciones de robótica en la actualidad son los Brushless (no poseen escobillas/se reduce su mantenimiento).

Tabla 14

Motores de corriente continua brushless

	Características	MAXON Motor EC 60 FLAT (brushless)	Motor ROBODRIVE ILM 50x 14	PRINTED Motor WORKS IR9 009088 (brushless)
Valores a tensión nominal	Potencia	100 W	180 W	148 W
	Tensión nominal	24 V	48V	42 V
	Velocidad nominal	3740 rpm	3500 rpm	800 rpm
	Par nominal (máx. par en continuo)	289 mNm	500mNm	1300 Nm
	Par de arranque	4180 mNm	1400mNm	1880 Nm
	Máx. rendimiento	86 %	90 %	90%
	Velocidad máxima	6000 rpm	3500 rpm	1295 rpm
	Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	5,47 A	5 A	7 A
Datos térmicos	Temperatura ambiente	-40...+100 °C	40...+125 °C	-15...+125 °C
	Máx. temperatura de bobinado	+125 °C	+125 °C	+125 °C
Datos mecánicos	Peso	470 g	135 g	2940 g
	Longitud	43 mm	22,8 mm	68 mm
	Diámetro	68 mm	50 mm	108 mm

De acuerdo a los parámetros de diseño se requiere que el antebrazo haga su movimiento de 0° a 120° en aproximadamente 1,5 seg, para esto el cálculo de la velocidad que debe tener el motor es el siguiente:

$$120^{\circ} = 0,33 \text{ rev}$$

La velocidad del motor del codo para un desplazamiento de 0,33 rev en 1,5 segundos es:

$$n_{\text{motor codo}} = 13,2 \text{ rpm}$$

Tomando el valor del torque que debe tener el motor del codo, calculado en la sección anterior, se obtiene la potencia.

$$T_{\text{Motor codo}} = 33,22 \text{ N m}$$

$$n_{\text{Motor codo}} = 1,38 \text{ rad/seg}$$

$$P_{\text{Motor codo}} = T_{\text{Motor codo}} * n_{\text{Motor codo}}$$

$$P_{\text{Motor codo}} = 33,22 \text{ N m} * 1,37 \text{ rad/seg}$$

$$P_{\text{Motor codo}} = 45,84 \text{ W}$$

De acuerdo a los datos de torque, velocidad y potencia que debe tener en la salida el motoreductor y considerando que existirá pérdidas por rendimiento se seleccionó como el motor más idóneo para la aplicación, el motor Maxon EC60 flat Brushless de la tabla 14.

Tabla 15
Características de los reductores

Características	CODO REDUCTOR PLANETARIO GP 52 C MAXON	HOMBRO REDUCTOR PLANETARIO GP 52 B MAXON
Relación de reducción	156:1	353:1
Peso y tamaño	0,77 kg	0,92 kg
Momento de inercia	9,1 g cm ²	9,4 g cm ²
Velocidades de entrada máxima	6000 rpm	6000 rpm
Torque de salida máximo	45 Nm	500 Nm
Torque en continuo máximo	30 Nm	200 Nm
Rendimiento	80%	84%

El motor seleccionado cumple con el parámetro de potencia necesaria, pero no con la velocidad y el torque requeridos, es por esto que es necesario utilizar

una caja reductora de engranes planetarios de reducción 156:1 para generar el torque y la velocidad requerido en la salida.

Datos de salida del motoreductor del el codo:

Potencia

$$P = 100 \text{ W}$$

Torque

$$T = 0,289 \text{ Nm} * 156 = 45,084 \text{ Nm}$$

Velocidad

$$n = \frac{3740 \text{ rpm}}{156} = 23,97 \text{ rpm}$$

Sin embargo esos valores no son los reales ya que hay que tomar en cuenta la eficiencia de trabajo.

$$\text{Valor}_{real} = \text{Valor}_{ideal} * (\text{eficiencia motor}) * (\text{eficiencia reductor})$$

Potencia

$$P_{real} = (100\text{W}) * (0,86) * (0,8)$$

$$\mathbf{P_{real} = 68,8 \text{ W}}$$

Torque

$$T_{real} = (45,084 \text{ Nm}) * (0,86) * (0,8)$$

$$\mathbf{P_{real} = 31 \text{ Nm}}$$

Velocidad

$$n_{real} = (23,97 \text{ rpm}) * (0,86) * (0,8)$$

$$\mathbf{n_{real} = 16,49 \text{ rpm}}$$

$$Peso_{motoreductor_codo} = 1,24 \text{ kg}$$

3.6.2 Selección motoreductor del hombro

Para el cálculo de la velocidad de este motor se toma en cuenta la configuración del movimiento en el torque debe ser mayor por ende más lento, por lo tanto se determinó que se levantará los 100° en 2,5 segundos, para esto se tiene:

$$100^\circ = 0,27 \text{ rev}$$

La velocidad del motor del hombro para un desplazamiento de 0,27 rev en 2,5 segundos es:

$$n_{motor\ hombro} = 6,48\ rpm$$

Tomando el valor del torque del motor del hombro, calculado en la sección anterior, se obtiene la potencia

$$T_{Motor\ hombro} = 73\ N\ m$$

$$n_{Motor\ hombro} = 0,678\ rad/seg$$

$$P_{Motor\ hombro} = T_{Motor\ hombro} * n_{Motor\ hombro}$$

$$P_{Motor\ hombro} = 73\ N\ m * 0,678\ rad/seg$$

$$\mathbf{P_{Motor\ hombro} = 49,49\ W}$$

Se seleccionó el mismo motor del codo ya que también cumple con las especificaciones que se requieren.

De igual manera que en la selección anterior el motor seleccionado cumple con el parámetro de potencia necesaria, pero no con la velocidad y el torque requeridos, por lo tanto se acopla al motor una caja reductora de engranes planetarios de reducción 353:1.

Datos de salida del motoreductor del el hombro:

Potencia

$$P = 100\ W$$

Torque

$$T = 0,289\ Nm * 353 = 102,2\ Nm$$

Velocidad

$$n = \frac{3740\ rpm}{353} = 10,59\ rpm$$

Sin embargo esos valores no son los reales ya que hay que tomar en cuenta la eficiencia de trabajo.

$$Valor_{real} = Valor_{ideal} * (eficiencia\ motor) * (eficiencia\ reductor)$$

Potencia

$$P_{real} = (100W) * (0,86) * (0,84)$$

$$P_{real} = 72,24 W$$

Torque

$$T_{real} = (102,2 Nm) * (0,86) * (0,84)$$

$$P_{real} = 73,8 Nm$$

Velocidad

$$n_{real} = (10,59 rpm) * (0,86) * (0,8)$$

$$n_{real} = 7,65 rpm$$

$$Peso \text{ motoreductor hombro} = 1,39 kg$$

3.7 Selección de material

El material del cual estará compuesto el exoesqueleto es un punto determinante a la hora de su funcionamiento, como se sabe de este depende su resistencia, durabilidad y confiabilidad al utilizarlo.

Tabla 16
Selección del material para la estructura

Propiedades	Aluminio 7021	Acero 1020	Titanio
Densidad (g/m³)	2,8	7,9	4,5
Maquinabilidad	Muy bueno	Bueno	Malo
Módulo de elasticidad (GPa)	70	207	103
Tensión de fluencia (MPa)	325	296	275
Tensión de tracción	370	393	345
Alargamiento	8%	36%	20%
Dureza HB	117	140	200

A través del cuadro comparativo con diferentes opciones se determina el material que mejor se ajuste a las necesidades y requerimientos del diseño. La comparación se realizó en base a los tres materiales más utilizados en exoesqueletos multiplicadores de fuerza. En donde se concluye que:

- El mecanizado del Aluminio se efectúa cinco veces más rápido que la del acero. Esto disminuye el tiempo de mecanización y por consiguiente los costes.
- El aluminio inmediatamente después de que se dañe su superficie forma una capa protectora contra la oxidación algo que no ocurre con el acero.

- Además el aluminio es un metal liviano, un 40% más liviano que el titanio y un 65% más liviano que el acero.

En base a las ventajas presentadas por el aluminio 7021 se seleccionó este material para la estructura del exoesqueleto.

3.8 Análisis de esfuerzos, factor de seguridad y deformación

Para el análisis se utilizó todos los datos anteriormente calculados, como los estados críticos de los eslabones, fuerzas, momentos y puntos de apoyo en estos, el análisis fue realizado con la ayuda de un software CAE que determina los valores de la tensión de von Mises, factor de seguridad y desplazamiento que se producirá en cada una de las piezas del exoesqueleto.

3.8.1 Análisis antebrazo

Para comenzar con el estudio primero se debe tomar las fuerzas que actúan sobre el eslabón las cuales se aplicaran en el software en los puntos donde se generan así como los puntos de apoyo del mismo.

Esfuerzo combinado

En la figura 40, se aprecia el análisis de la tensión de von Mises, el cual muestra que el valor máximo aplicado es de 67,53 MPa, el material utilizado para el antebrazo es el Aluminio 7021 cuyo límite a la fluencia (S_y) es de 325 MPa. De acuerdo a la teoría de von Mises y la Ecuación 1, descrita en el capítulo 2 se demuestra que el eslabón no sufre fallos ya que la tensión de von Mises es menor a la resistencia a la fluencia.

$$67,53 \text{ MPa} < 325 \text{ Mpa}$$

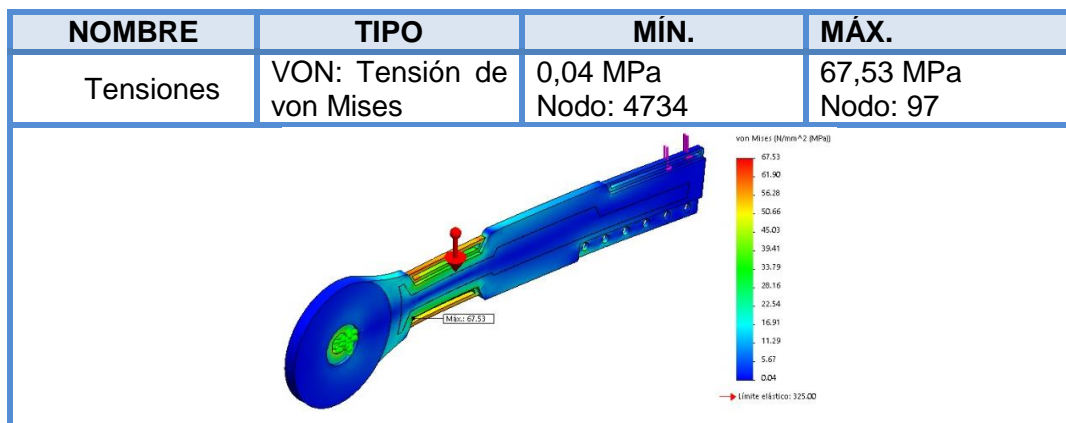


Figura 40 Tensión de Von Mises para el antebrazo

Por motivos de comprobación se realiza los cálculos del análisis de esfuerzos para así demostrar la veracidad de los datos obtenidos por software.

El cálculo se centra en demostrar los valores en solo un punto del eslabón, en este caso donde se encuentra el momento flector máximo calculado anteriormente, ya que como se sabe las capacidades de procesamiento de una computadora es muy alta y es por eso que esta calcula mediante el método de elementos finitos los valores en todos los puntos de la estructura.

Dicho lo anterior el cálculo parte desde el valor máximo de momento torsor que actúa en el eslabón el cual ya se lo obtuvo y se encuentra en el punto A de la figura 33.

$$\text{Momento torsor maximo} = 32,735 \text{ N m}$$

$$\text{Fuerza cortante maxima} = 128,77 \text{ N}$$

Para una sección rectangular S, se aplica la Ecuación 5 donde:

$$b = 0,01 \text{ m}$$

$$h = 0,039 \text{ m}$$

$$S = \frac{b * h^2}{6}$$

$$S = \frac{0,01 \text{ m} * (0,039 \text{ m})^2}{6}$$

$$S = 2,535 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

El esfuerzo normal se obtiene aplicando la Ecuación 3.

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{M * C}{I}$$

$$\text{Donde } S = \frac{C}{I}$$

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{32,735 \text{ N m}}{2,535 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 12,913214,99 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma = 12,913 \text{ MPa}$$

Para el esfuerzo cortante se aplica la Ecuación 6

$$\tau = \frac{V * Q}{I * b}$$

$$\tau = \frac{3V}{2A}$$

$$\tau = \frac{3(128,77 \text{ N})}{2(0,01\text{m} * 0,039\text{m})} = \frac{386,31 \text{ N}}{0,78 \times 10^{-3} \text{m}^2}$$

$$\tau = 495269,23 \frac{N}{m^2}$$

$$\tau = 0,4952 \text{ MPa}$$

Para la teoría de von Mises se aplica la Ecuación 2.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau^2)}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{12,913^2 + 3(0,4942^2)}$$

$$\sigma_{eq} = 12,941 \text{ MPa}$$

Con los valores de los cálculos realizados se compara y comprueba los datos obtenidos por software y se demuestra la validez de este método que ayuda a tener una visión amplia del comportamiento de la estructura al encontrarse en funcionamiento, cabe recalcar que el valor que se obtiene en el cálculo es el valor del esfuerzo en el punto donde se genera el momento flector máximo, pero no es este punto donde se genera el mayor esfuerzo, esto se debe a que la forma de la estructura del eslabón tiene secciones estructurales más débiles, que donde está el punto donde hay mayor momento flector, esto se observa en la figura 41.

Esfuerzo de von Mises

Valor calculado ≈ Valor del software

$$12,94MPa \approx 12,73MPa$$

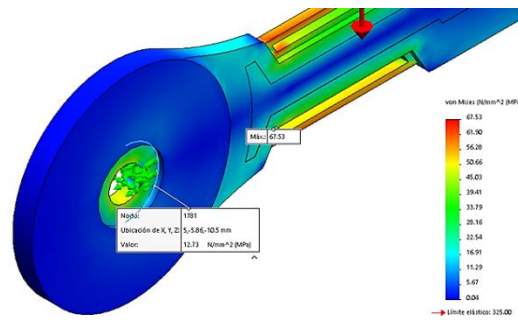


Figura 41 Valor de esfuerzo obtenido del software

Factor de seguridad

Al tomar en cuenta el concepto de la relación de la resistencia real y la resistencia requerida que se expone en el capítulo 2, se observa en la figura 42, que el FDS mínimo obtenido por el software es 4,81 cuyo valor es mayor a 2 con lo cual el diseño es seguro.

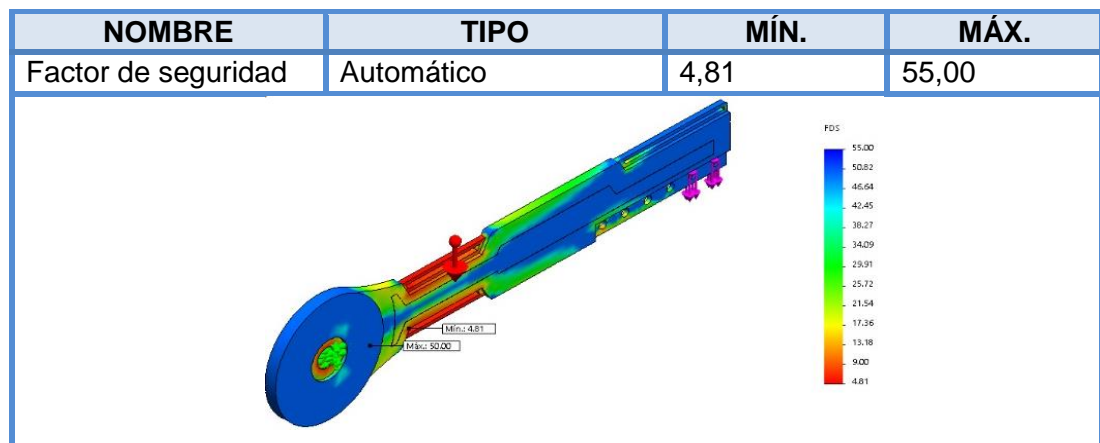


Figura 42 Factor de seguridad para el antebrazo

De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente se obtiene;

El factor de seguridad se obtiene aplicando la Ecuación 8.

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$$

$$n = \frac{325}{12,491} = 25,11$$

El valor calculado es el valor del factor de seguridad en el punto donde se genera el momento flector máximo.

Valor calculado \approx Valor del software

$$25,11 \approx 25,53$$

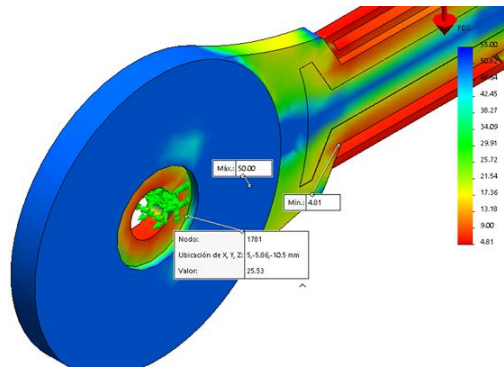


Figura 43 Valor de factor de seguridad obtenido del software

Deformación

La figura 44, muestra el desplazamiento estático por flexión cuyo valor máximo de desplazamiento es 0,72 mm, obtenido del software. Al emplear la Ecuación 7 para el límite de flexión recomendado descrita en el capítulo 2, se tiene:

$$y_{m\acute{a}x} = 0,003 \frac{mm}{mm\ de\ longitud\ viga} * 270mm = 0,81mm$$

Con lo cual se determina que el diseño cumple con el límite de flexión máximo para que el diseño sea confiable y seguro.

$$0,72\ mm < 0,81\ mm$$

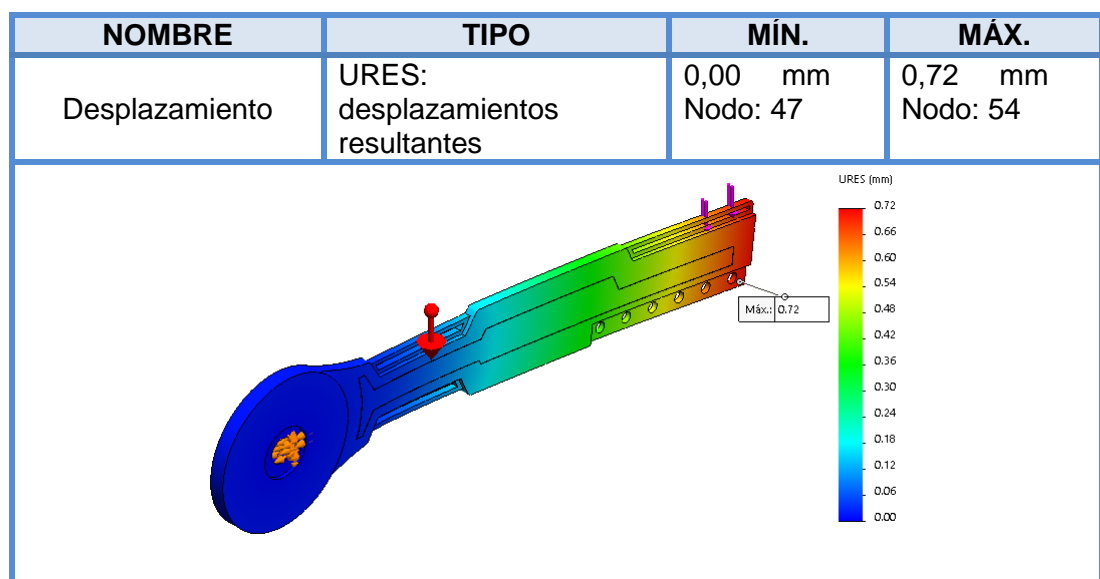


Figura 44 Desplazamiento para el antebrazo

3.8.2 Análisis brazo

Esfuerzo combinado

Para empezar este análisis se debe trasladar las fuerzas y momentos que se generan en el eslabón anterior (antebrazo) a este, para poder realizar el análisis al emular el estado más crítico del exoesqueleto.

Al generar el análisis con los valores de las fuerzas que actúan en este eslabón y al utilizar las mismas teorías aplicadas en el análisis del antebrazo se observa que en la figura 45, el valor máximo de von Mises es 114,76 MPa. Al emplear la teoría de von Mises se obtiene que este valor es menor que el S_y (325 MPa) del material, con lo cual el eslabón no sufre fallos.

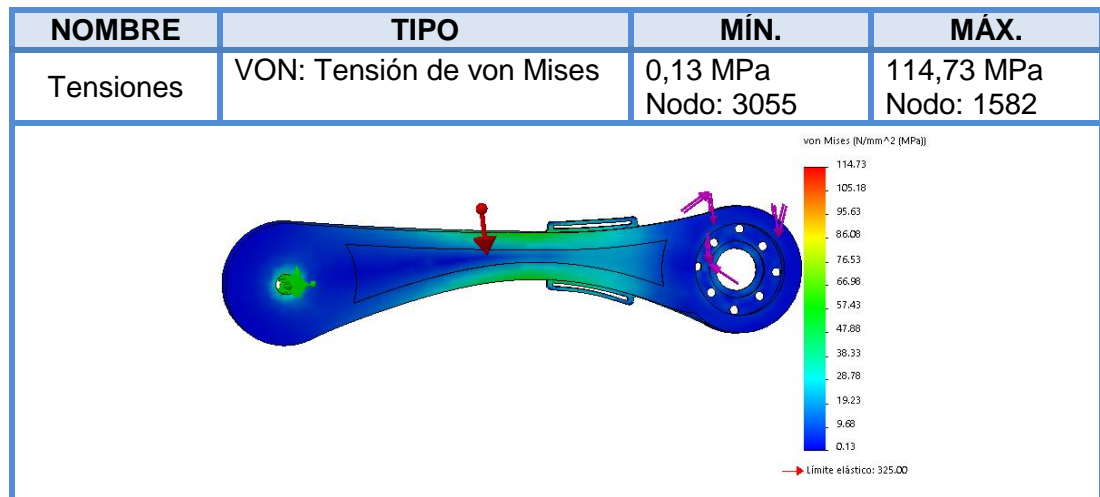


Figura 45 Tensión de von Mises para el brazo

Para la comprobación también se realizan los cálculos del análisis de esfuerzos para así demostrar la veracidad de los datos obtenidos por software, donde al igual que en la sección anterior el valor de esfuerzo en el punto donde se genera el momento flector máximo no es el mayor, debido a la forma de la estructura, entonces utilizando las ecuaciones empleadas en la comprobación del antebrazo se tiene,

Esfuerzo de von Mises

Valor calculado \approx Valor del software

$$27,1MPa \approx 27,41MPa$$

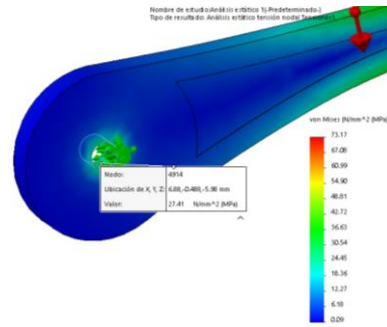


Figura 46 Valor de esfuerzo obtenido del software

Factor de seguridad

El Factor de seguridad mínimo para que el eslabón sea confiable y seguro es 2, en la figura 47, se obtiene 2,83 valor que cumple con el requerimiento.

NOMBRE	TIPO	MÍN.	MÁX.
Factor de seguridad.	Automático	2,83 Nodo: 1582	60,00 Nodo: 1

Figura 47 Factor de seguridad para el brazo

El valor calculado es el valor del factor de seguridad en el punto donde se genera el momento flector máximo.

Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$$

$$n = \frac{325 \text{ MPa}}{27,1 \text{ MPa}} = 11,9$$

Valor calculado \approx Valor del software

$$11,9 \approx 11,86$$

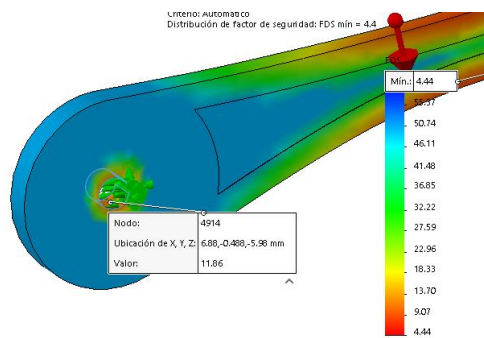


Figura 48 Valor de factor de seguridad obtenido del software

Deformación

Al emplear la fórmula para el límite de flexión recomendado, el desplazamiento máximo para que el diseño sea seguro es 0,79 mm y como se observa en la figura 49, el valor generado por el software es 0,77 mm valor que está dentro del límite de flexión máximo.

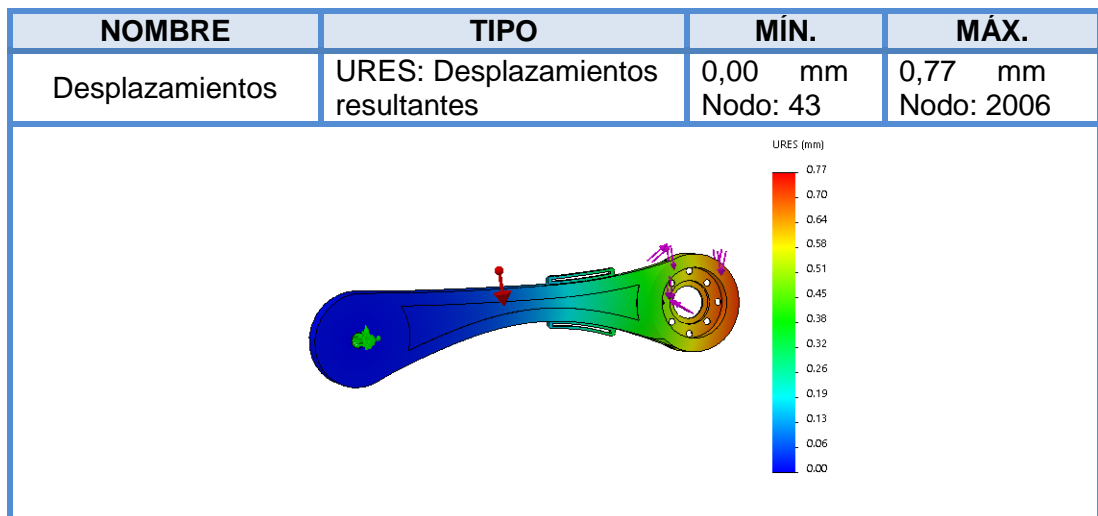


Figura 49 Desplazamiento para el brazo

3.8.3 Análisis hombro

Esfuerzo combinado

Al igual que en el punto anterior se debe trasladar los valores de fuerzas y momentos, esta vez de los dos eslabones anteriores, así se asegura el cálculo correcto al emular el estado más crítico del exoesqueleto.

La figura 50, muestra 106,60 MPa como valor máximo de von Mises valor que es menor a 325 MPa (Sy del Aluminio 7021) cumpliendo con la teoría de Von Mises, para que el eslabón no falle.

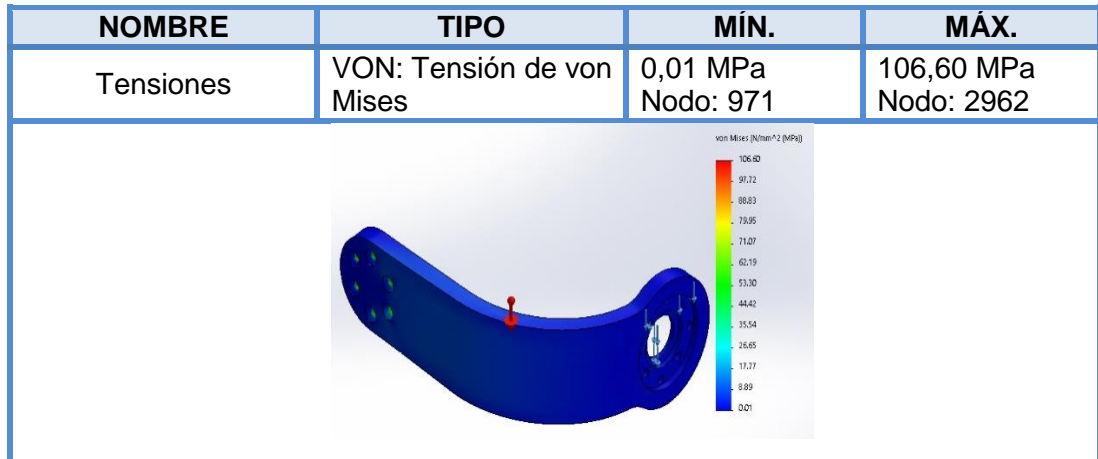


Figura 50 Tensión de von Mises para el hombro

Factor de seguridad

La figura 51, presenta un FDS 3,05 en la teoría el valor mínimo es 2 con lo cual el eslabón no sufrirá fallas.

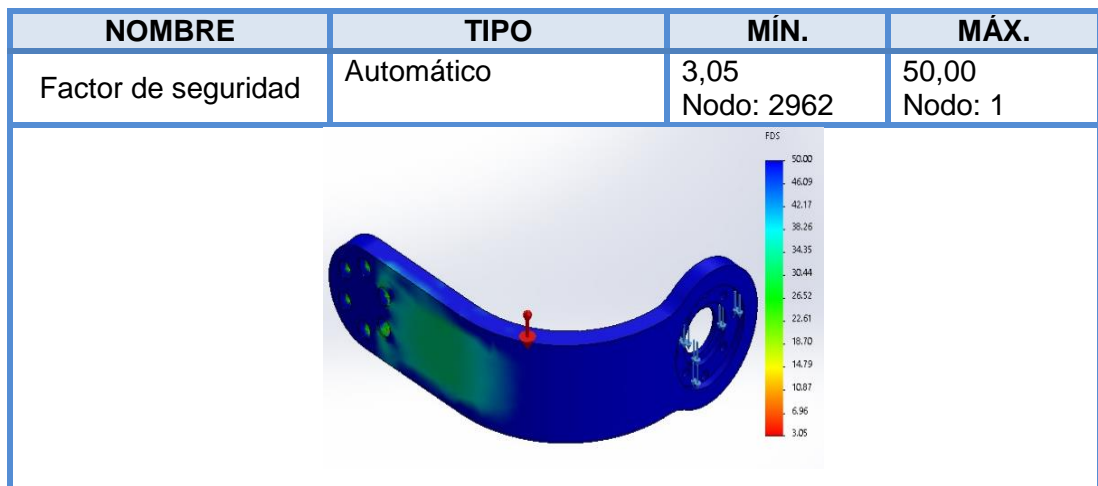


Figura 51 Factor de seguridad para el hombro

Deformación

Al aplicar la fórmula para el límite de flexión recomendado, para este eslabón se halla que el desplazamiento máximo es 0,48 mm para una longitud de viga de 160 mm, la figura 52, presenta un desplazamiento de 0,28 mm con lo cual el eslabón es seguro.

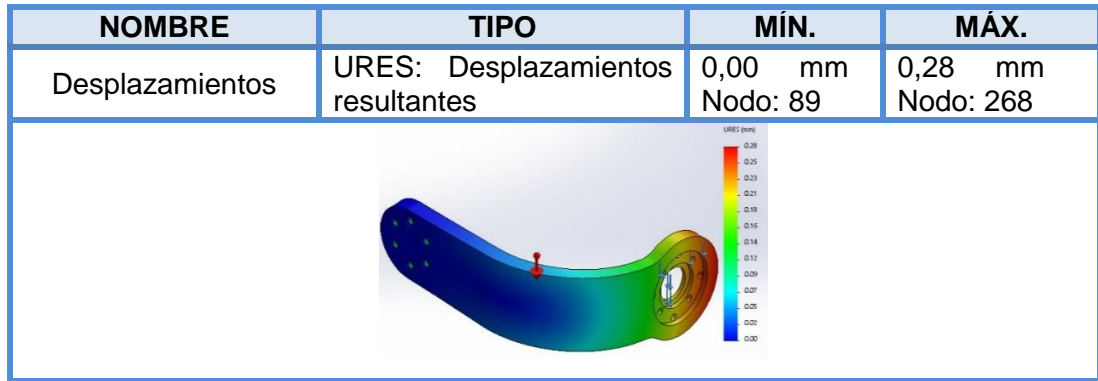


Figura 52 Desplazamiento para el hombro

3.8.4 Análisis Espaldar

Esfuerzo combinado

La figura 53, muestra el valor 47,134 MPa como valor máximo de von Mises valor que es menor a 325 Mpa, cumpliendo con la teoría de Von Mises, para que no falle.

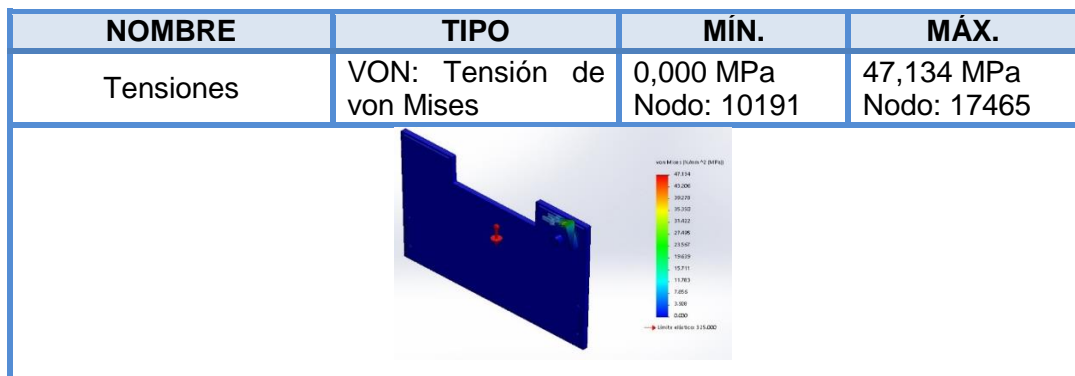


Figura 53 Tensión de von Mises para el espaldar

Factor de seguridad

La figura 54, presenta un FDS 6,9 en la teoría el valor mínimo es 2 con lo cual el eslabón no sufrirá fallas.

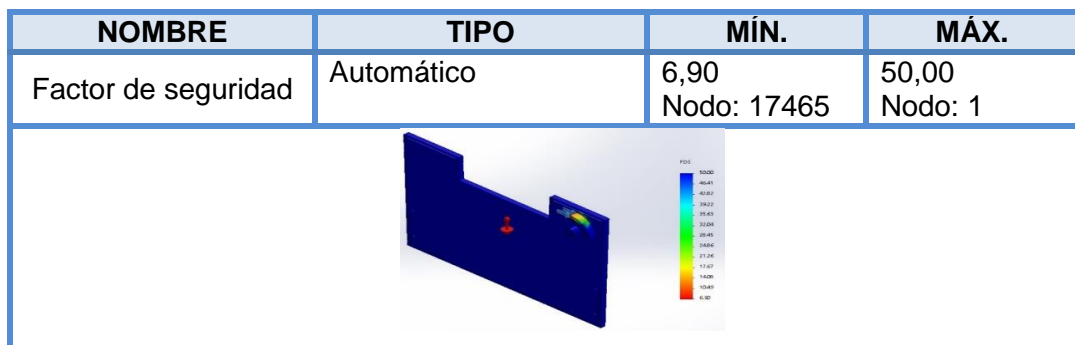


Figura 54 Factor de seguridad para el espaldar

Deformación

El desplazamiento máximo es 0,03 mm para una longitud de viga de 10 mm, la figura 55, presenta un desplazamiento de 0,01 mm con lo cual el eslabón es seguro.

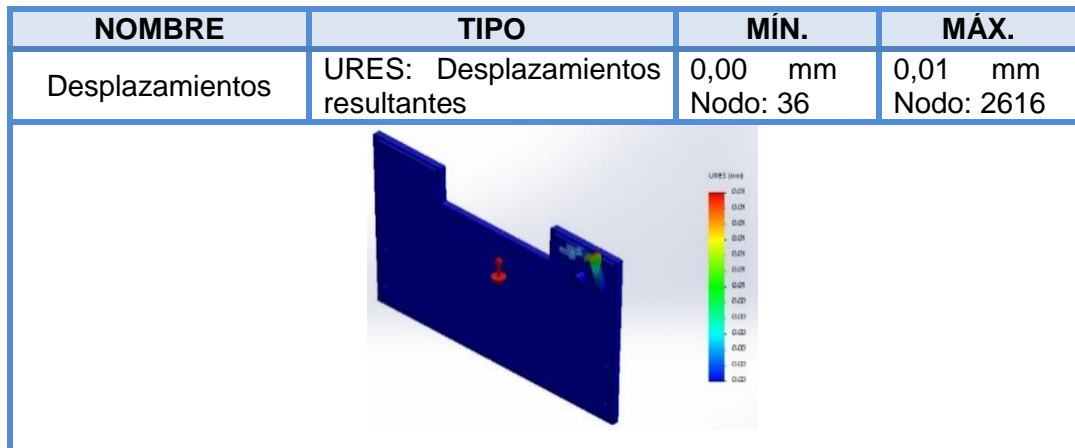


Figura 55 Desplazamiento para el espaldar

3.9 Diseño del sistema de control

El exoesqueleto de miembro superior tiene como objetivo multiplicar la fuerza del sistema muscular humano, sin perder el control natural de los movimientos. Por lo cual debe realizar la tarea de dar cierta ganancia a las capacidades físicas netas que ejerce el usuario sobre una carga aplicada mediante un actuador eléctrico. Por lo cual requiere un sistema de control que actualice y procese en tiempo real una señal de posición y orientación del exoesqueleto obtenida de sensores externos y que a través de una palanca de mandos genere los movimientos.

3.9.1 Selección de dispositivos electrónicos

a. Sensor: Acelerómetro MMA7361

Es necesario para el control de los movimientos del exoesqueleto obtener los datos de la posición y orientación, se lo realiza por medio de acelerómetros MMA7361 que permite obtener el ángulo de cada uno de los eslabones y tener la percepción del entorno y también la seguridad de no sobrepasar los ángulos y rangos de movimientos establecidos para el exoesqueleto, además de ser compatibles con las tarjetas Arduino.

b. Servocontroladora de potencia

Las tarjetas servocontroladoras utilizadas para accionar los motores maxon EC flat brushless de 100W son la ESCON 50/5 y la ESCON 70/10, la principales diferencias entre estas dos son:

Tabla 17

Características de la servocontroladora ESCON

Características	ESCON 50/5	ESCON 70/10
Potencia	250W/750W	700W/2100W
Voltaje Nominal	10-50 VDC	10-70 VDC
Max. Corriente	15 A	30 A
Corriente nominal	5 A	10 A
Eficiencia	95%	98%
Máxima velocidad	150000 rpm	150000 rpm
Peso	204 g	259 g
Dimensiones	115X75,5X24 mm	125X78,5X27 mm
Temperatura de operación	-30...+45°C	-30...+45°C

Segun los requerimientos del motor maxon EC60 flat sin escobillas de 100W, la servocontroladora más optima a utilizarse es la ESCON 50/5 ya que es una compacta servocontroladora de alto rendimiento de 4 cuadrantes modulada por duración de pulso (PWM).

c. Microprocesadores

Para el procesado e interpretación de datos en la unidad de control se requiere de un microprocesador capaz de procesar en tiempo real los datos digitales procedentes de los sensores y la palanca de mano para activar las señales de control correspondientes para ejecutar los movimientos mediante los actuadores eléctricos por lo tanto se usa una tarjeta Arduino Uno.

d. Baterías

Los motores Maxon EC60 flat Brushless de acuerdo a la tabla 14, necesitan para su funcionamiento un voltaje de 24 VDC, y una corriente de 5,47 A, para lo cual como fuente de alimentación de cada motor se seleccionó una batería TURNIGY de 6 Celdas (22,2V) y 5000 mAh, la cual permite alimentar cada motor y tener una duración aproximada de funcionamiento de 0,9 horas, además de tener una constante de descarga de 20-30C la cual ayuda a sobrellevar los picos de corriente que se generan en los arranques de los motores que son por lo general de 15A.

Tabla 18
Características de la batería TURNIGY 5.0

Características	Batería
Capacidad	5000 mAh
Configuración	6S1P/22,2V/6Cell
Constante de descarga	20C
Descarga máxima	30C (10seg)
Conector de carga	JST-XH
Conector de descarga	XT90
Dimensiones	145 x 50 x 50mm
Peso	765 g

3.9.2 Unidad de control

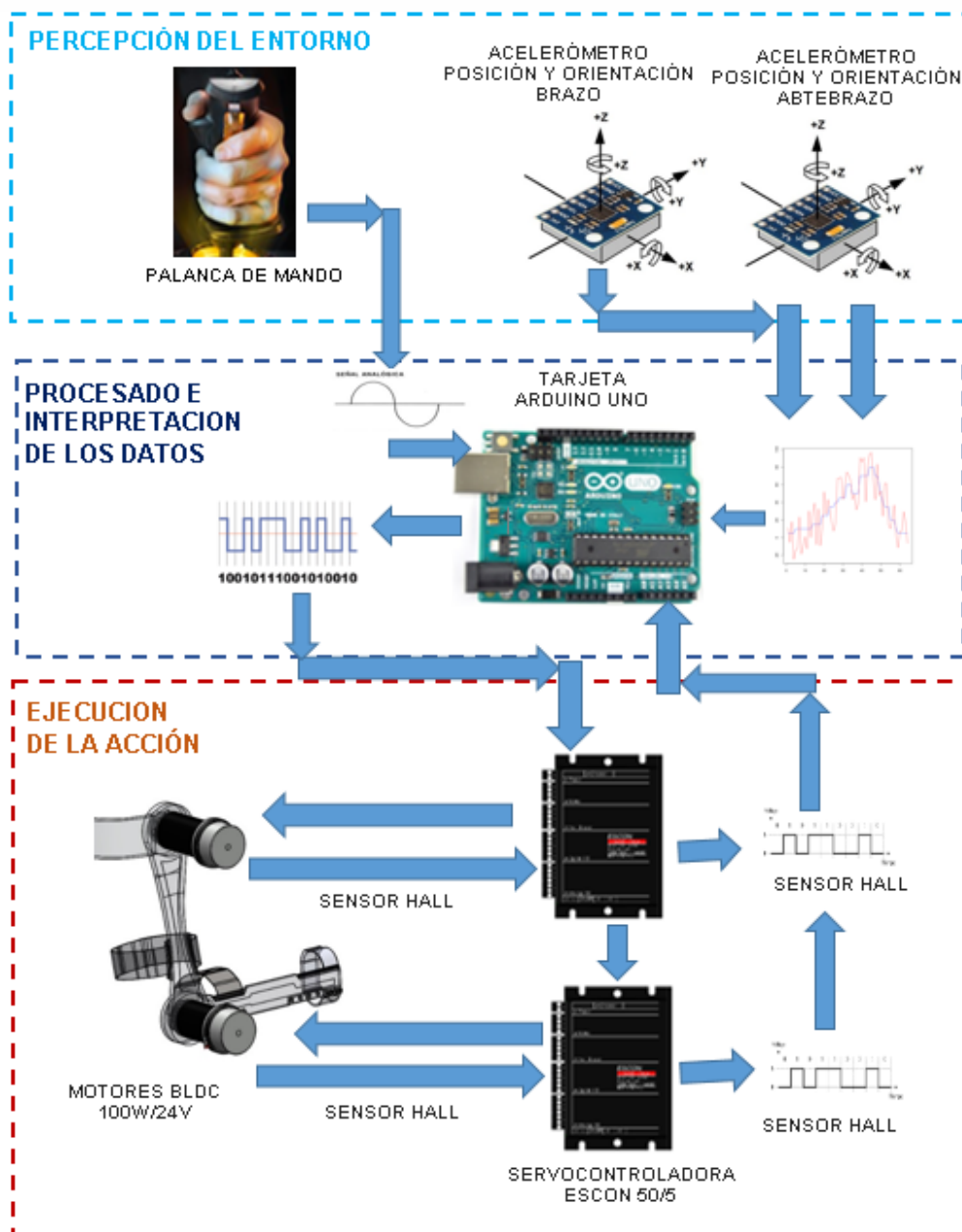


Figura 56 Diagrama de bloques de la unidad de control

La unidad de control procesa los datos recibidos de los sensores y las órdenes generadas por el usuario del exoesqueleto para luego transmitir a los actuadores eléctricos las señales necesarias para realizar el levantamiento de carga. La unidad de control consta de tres fases: percepción del entorno, procesado e interpretación del entorno y ejecución de la acción.

a. Fase de percepción del entorno del exoesqueleto

El exoesqueleto dispone de dos sensores, uno para conocer su posición (sensor acelerómetro) y otro para conocer su velocidad (sensor Hall) en el momento de su funcionamiento. Además posee una palanca de mando para detectar la magnitud física variable y convertirla en una señal eléctrica. El conjunto de señales generadas por el módulo forman los datos de entrada al sistema, los cuales generan las órdenes para el movimiento del exoesqueleto.

b. Procesado e interpretación de los datos.

Esta fase consta de un microprocesador Arduino Uno y su software para el tratamiento de estos datos. Los datos digitales y análogos procedentes de los sensores son leídos e interpretados por el microprocesador, para luego activar las señales de control correspondientes para ejecutar un movimiento.

Tabla 19
Conexiones de las fases de percepción y procesado de datos














Arduino	Señal	Dispositivos
5V		5V
GND		GND
A0		Salida X
A1		Salida Y
A2		Salida Z
A3		Eje X joystick
A4		Eje Y joystick
8		Sensor Hall ESCON 50/5
9		Entrada digital ESCON 50/5
10		Entrada digital ESCON 50/5
11		Sensor Hall ESCON 50/5
12		Entrada digital ESCON 50/5
13		Entrada digital ESCON 50/5



Figura 57 Conexiones fases: De percepción y procesamiento de datos

La palanca de mando se encarga de generar los datos de entrada y enviarlos al microprocesador para así ejecutar los movimientos del exoesqueleto. Este estará enviando datos del movimiento que el usuario desee ejecutar con el exoesqueleto mediante una conexión al microprocesador Arduino Uno.

c. Ejecución de la acción: Etapa de potencia

Esta fase de la unidad de control permite realizar las acciones de ejecución de los movimientos de las articulaciones y desplazamiento de los eslabones del exoesqueleto estas acciones se los ejecuta mediante los dispositivos motrices, las servocontroladoras ESCON 50/5 y los motores Maxon EC 60 FLAT Brushless una en la coyuntura del codo y otra en el hombro.

Diagrama de potencia

Conexiones de la etapa de potencia para un motor Maxon EC 60 Flat /100 Watts/24VDC con sensor Hall y una servocontroladora ESCON 50/5 y

baterías turnigy de 5000 mAh, el mismo diagrama aplica para el motor del codo y del hombro.

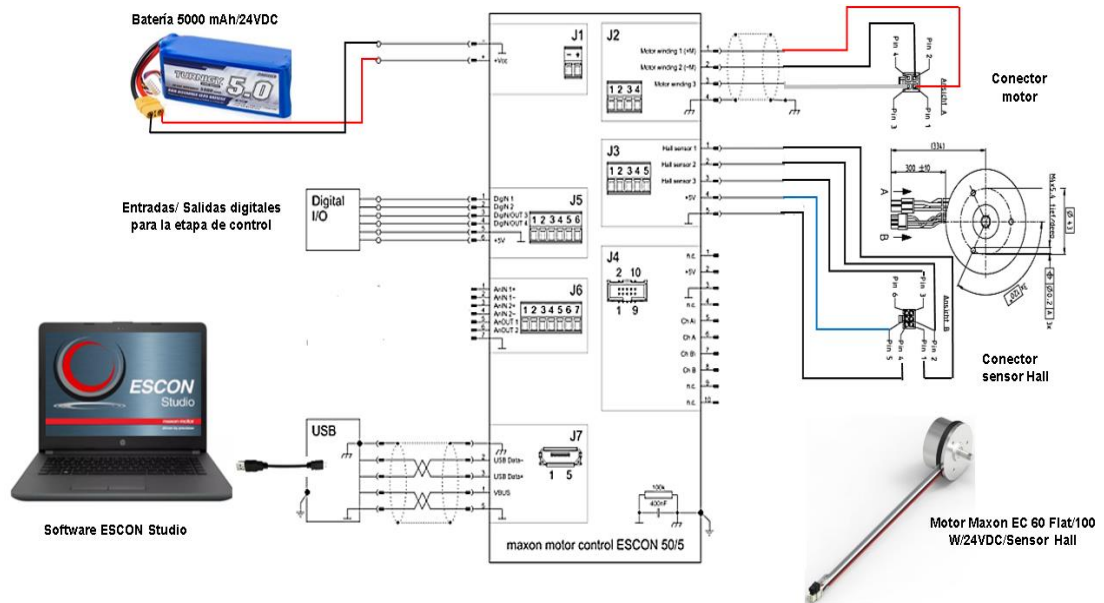


Figura 58 Conexiones de la etapa de potencia

3.10 Exoesqueleto final

Una vez finalizado todo el diseño el prototipo va a quedar estructurado de la siguiente forma:

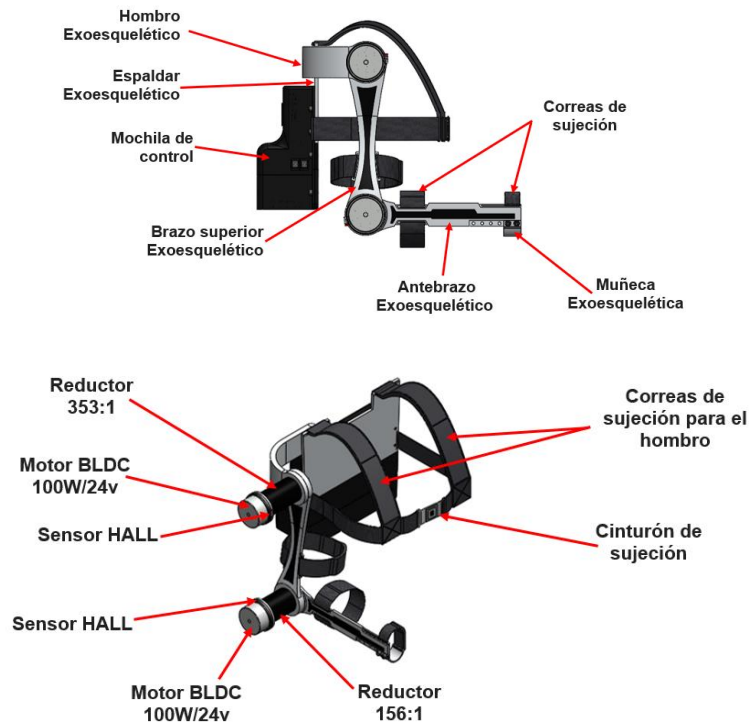


Figura 59 Partes del exoesqueleto

Por motivos de estética y la necesidad de proteger los sensores colocados en los eslabones, se diseñó una carcasa que recubre el exoesqueleto y le da una mejor presencia y protección de los dispositivos electrónicos, esta carcasa se la realizó de polímero PLA con la ayuda de una impresora 3D ya que esta no estará sometida a ningún tipo de esfuerzo.

De esta misma forma y material se desarrolló la mochila en donde se almacenara todos los elementos necesarios para el control y los dispositivos de potencia.

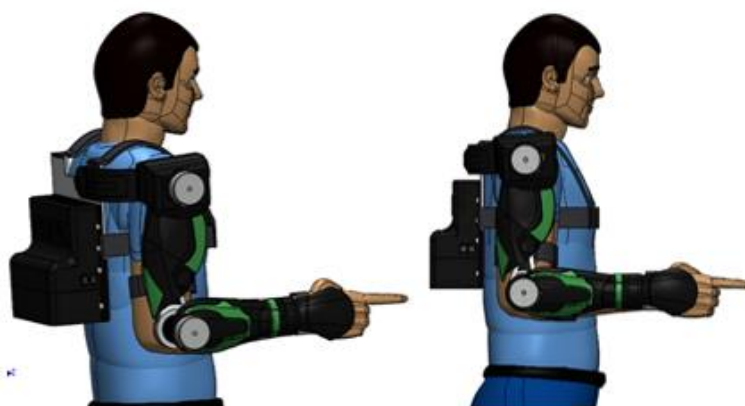


Figura 60 Carcaza de recubrimiento

Tabla 20

Elementos del exoesqueleto

N°	Pieza	Cantidad
1	Soporte para la muñeca	1
2	Antebrazo exoesquelético	1
3	Brazo exoesquelético	1
4	Hombro exoesquelético	1
5	Espaldar exoesquelético	1
6	Acople hombro-espaldar	1
7	Motores Maxon EC60 Flat brushless	2
8	Reductor Planetario GP 52C 156:1	1
9	Reductor Planetario GP 52C 353:1	1
10	Correas de nylon	3
11	Correas de bandas elásticas con velcro	3
12	Cierre hebilla de plástico	1
13	Tornillo M-5X0,8X20 SOCKET	8
14	Tornillo M-5X0,8X12 SOCKET	8
15	Tornillo M-6X1,0X10 HEX	10
16	Tornillo M-6X1,0X20 SOCKET	6
17	Tornillo M-4X0,7X0,8 SOCKET	2
18	Rodamiento NTN 6000	1
19	Anillo de seguridad D8	1
20	Impresión 3D mochila de control	1

Continúa →

21	Impresión 3D carcasa hombro	1
22	Impresión 3D carcasa brazo	1
23	Impresión 3D carcasa antebrazo	1
24	Baterías TURNIGY 5000mA	2
25	Acelerómetros MMA7361	2
26	Joystick	1
27	Tarjeta Arduino 1	1
28	Servocontroladora ESCON 50/5	2

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN

4.1 Manufactura y ensamblaje

El objetivo de este apartado es obtener como dispositivo físico el exoesqueleto multiplicador de fuerza para miembro superior que cumpla con los requisitos funcionales de la biomecánica, antropometría y dimensiones características del modelado descritas en capítulos anteriores.

4.1.1 Secuencia para obtener el exoesqueleto final.

Tabla 21
Secuencia de construcción del exoesqueleto

SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN		
	Proceso	Tareas
OPERACIONES DE PROCESAMIENTO	Proceso de formado por remoción de material.	Obtención de materia prima Mecanizado de antebrazo Mecanizado de brazo Mecanizado de hombro Mecanizado de espaldar Mecanizado de apoyo de muñeca Mecanizado de acople hombro-espaldar
	Procesamiento de superficies.	Pulido y limpieza de superficies de piezas mecanizadas
	Recubrimiento.	Tapizado interior de piezas
	Elaboración de elementos de sujeción.	Sujeción del antebrazo Sujeción del brazo Sujeción del espaldar
	Proceso de formado por prototipado rápido, deposición de hilo fundido (FDM).	Obtención de materia prima Mochila Carcaza del brazo Carcaza de antebrazo
OPERACIONES DE ENSAMBLE	Ensamblaje Mecánico	Motor-Reductor Hombro-Espaldar Motoreductor Hombro-Hombro Brazo-Eje de Motoreductor Hombro Motoreductor Codo-Brazo Antebrazo-Eje de Motoreductor Codo Apoyo de muñeca-Antebrazo Carcazas-Brazo Exoesquelético

a. Operaciones de procesamiento

- **Proceso de formado por remoción de material**

Las piezas se realizaron en un centro de mecanizado con husillo vertical debido a que son los más adecuados para realizar las operaciones de maquinado en superficies planas con cavidades relativamente hondas. (ver anexo F)

Además se utilizó este centro de mecanizado debido a que es una máquina de gran automatización capaz de realizar diversas operaciones de maquinado bajo CNC (Control Numérico Computarizado) en el cual se ingresan los códigos G generados por un software CAM de cada una de las piezas a mecanizar. Las operaciones que se usaron en esta máquina fueron con herramientas de cortes rotatorios: brocas y fresas.



Figura 61 Centro de mecanizado CNC Leadwell V-30

Tareas a realizar durante el proceso de formado.

1. Obtención de la materia prima

La materia prima para los eslabones son bloques de aluminio 7021.



Figura 62 Materia prima

2. Mecanizado de antebrazo



Figura 63 Mecanizado antebrazo

3. Mecanizado de brazo



Figura 64 Brazo

4. Mecanizado de hombro

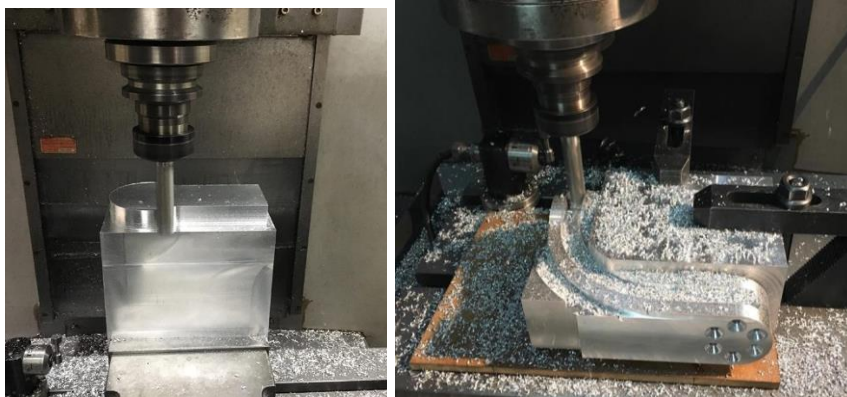


Figura 65 Mecanizado hombro

5. Mecanizado de espaldar



Figura 66 Mecanizado espaldar

6. Mecanizado de apoyo de muñeca



Figura 67 Apoyo de muñeca

7. Mecanizado de acople hombro-espaldar



Figura 68 Acople hombro-espaldar

- **Procesamiento de superficies**

Las tareas de procesamiento de superficies son: Pulido y limpieza de superficies de piezas mecanizadas para mejora en el acabado superficial de las mismas.



Figura 69 Pulido de las piezas

- **Proceso de recubrimiento**

Tapizado interior de las piezas: Las piezas del exoesqueleto son recubiertas con terciopelo para que no se genere ninguna incomodidad al usuario.



Figura 70 Recubrimiento interior de las piezas

- **Elaboración de elemento de sujeción**

Las tareas realizadas en este proceso son:

1. Sujeción del antebrazo: La sujeción del antebrazo exoesquelético al antebrazo del usuario se lo realiza mediante bandas elásticas y velcro.



Figura 71 Cinturones de banda elástica antebrazo

2. Sujeción del brazo: Se lo realiza de la misma manera que para el caso anterior.



Figura 72 Cinturones de banda elástica brazo

3. Sujeción del espaldar: La sujeción del espaldar exoesquelético al usuario se elaboran correas de nylon para los hombros y el pecho con un cierre con hebilla de plástico.



Figura 73 Correas de sujeción espaldar

- **Proceso de formado por prototipado rápido, deposición de hilo fundido (FDM)**

Se realizó una impresión en 3D de la carcasa que consta de dos partes el brazo y antebrazo. Además de la mochila de control que es la pieza donde se colocan las servocontroladoras ESCON 50/5, las baterías y el microprocesador.

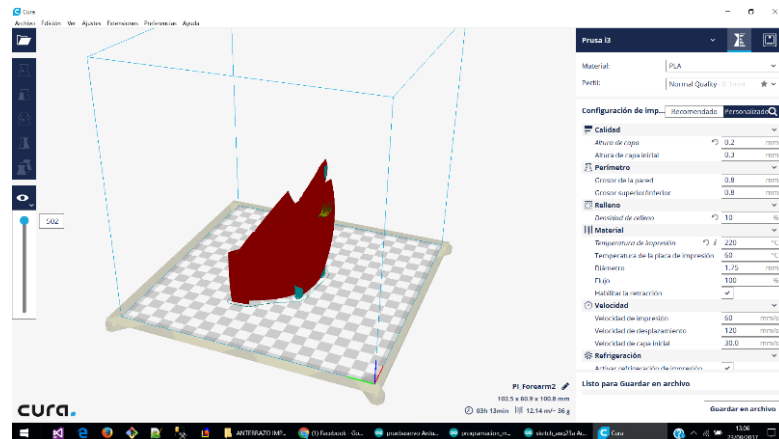


Figura 74 Software Cura para impresión 3D

Tareas realizadas para el proceso de formado por prototipado rápido:

1. Obtención de materia prima: El material es polímero PLA.



Figura 75 Materia prima para impresión 3D

2. Impresión de la mochila de control



Figura 76 Carcasa espaldar

3. Impresión de la carcasa del brazo



Figura 77 Carcaza brazo

4. Carcaza de antebrazo



Figura 78 Carcaza antebrazo

b. Operaciones de ensamble

- **Ensamblaje mecánico**

El ensamblaje final está compuesto por las piezas de Aluminio 7021, las piezas en impresión 3D y los motores maxon EC 60 FLAT brushless con sus respectivas cajas reductoras.

Los elementos utilizados para la fijación de las piezas son pernos, anillos de seguridad y un rodamiento NTN 6000 (ver anexo G).



Figura 79 Elementos de fijación

Secuencia para el ensamble del exoesqueleto:

1. Motoreductor del hombro y codo



Figura 80 Ensamblaje motor-reductor

2. Hombro-Espaldar



Figura 81 Ensamblaje hombro-espaldar

3. Motoreductor Hombro-Hombro



Figura 82 Ensamblaje motoreductor hombro-hombro

4. Brazo-Eje de Motoreductor Hombro



Figura 83 Ensamblaje brazo-eje de motoreductor hombro

5. Motoreductor Codo-Brazo



Figura 84 Ensamblaje motoreductor codo-brazo

6. Antebrazo-Eje de Motoreductor Codo

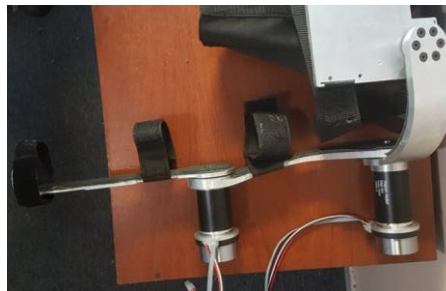


Figura 85 Ensamblaje antebrazo-eje de motoreductor codo

7. Apoyo de muñeca-Antebrazo



Figura 86 Ensamblaje apoyo de muñeca-antebrazo

8. Carcazas-Brazo exoesquelético



Figura 87 Ensamblaje final del exoesqueleto

4.2 Desarrollo del sistema de control

En esta sección se desarrolla el sistema de control para la ejecución de los movimientos del exoesqueleto diseñado en el capítulo 3.

4.2.1 Percepción del entorno

a. Adquisición de las señales de mando.

Para la ejecución de mando de los movimientos del exoesqueleto se utilizó un joystick debido a que su funcionamiento está basado en el movimiento en dos dimensiones de una palanca, con lo cual envía señales analógicas de sus potenciómetros para los ejes x e y. Estos valores permiten controlar el desplazamiento del brazo y antebrazo en sus ejes.

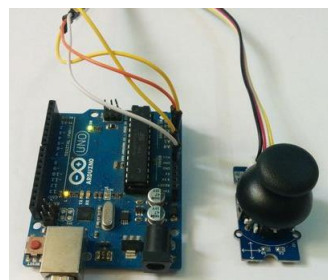


Figura 88 Conexión del joystick y Arduino Uno

b. Adquisición de señal del acelerómetro

1. Conectar el acelerómetro a la tarjeta arduino para adquirir los datos de giro en el eje y.



Figura 89 Conexión acelerómetro Arduino

2. Los datos de giro del acelerómetro no son datos estándares por lo cual se requiere realizar una caracterización del sensor transformando estos datos a grados, para esto es necesario generar una ecuación de su funcionamiento ya que los valores no varían de forma lineal, esto se realiza con la ayuda de una aplicación celular de nivel, se toman datos de los valores del acelerómetro y los valores en grados proporcionados por la aplicación celular.

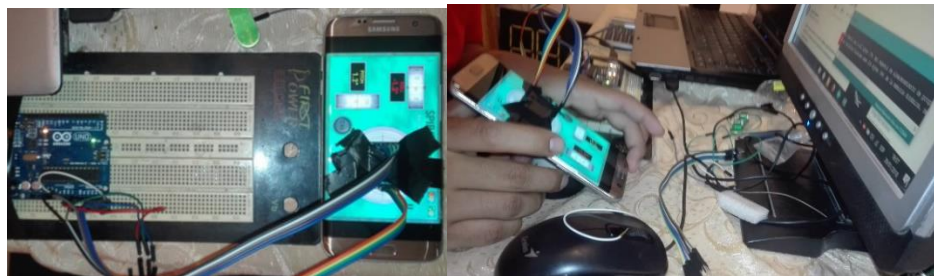


Figura 90 Toma de datos acelerómetro

3. Con los valores obtenidos en la toma de datos, se genera la gráfica del comportamiento del acelerómetro, esta gráfica se genera con la ayuda del software matlab.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - close all
4 - D=load('lectura_grados.txt');
5 - grados=D(:,1);
6 - lectura=D(:,2);
7 - plot(lectura,grados,'r')
8
9 - title('CARACTERIZACION DE LECTURAS SOBRE EL EJE Y')
10 - xlabel('Lecturas tomadas')
11 - ylabel('Grados')

```

Figura 91 Programa para obtener la gráfica del acelerómetro

4. Con la gráfica que se obtiene se genera una ecuación la cual describe el comportamiento del acelerómetro, para este caso la ecuación que mejor describe la gráfica es una de 6to grado polinomial, la cual se observa en la figura 92.

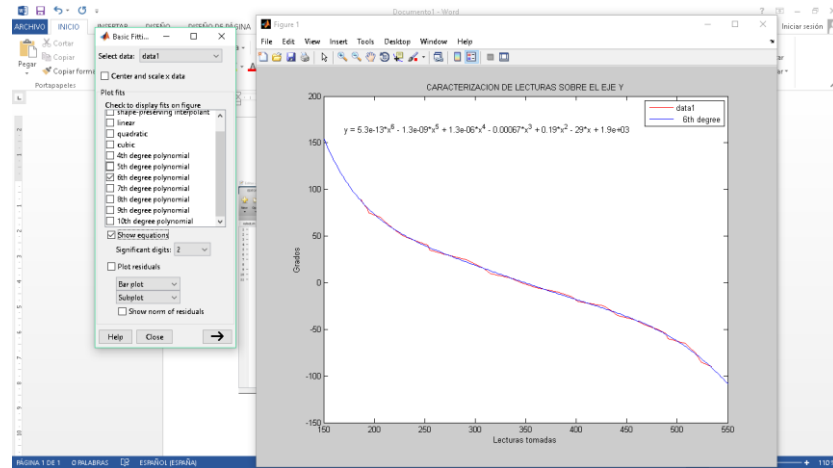


Figura 92 Gráfica del comportamiento del acelerómetro

5. Una vez obtenida la ecuación de caracterización del acelerómetro se utiliza para tener todos los valores en grados, estos valores se la procesa para tener la posición del exoesqueleto.

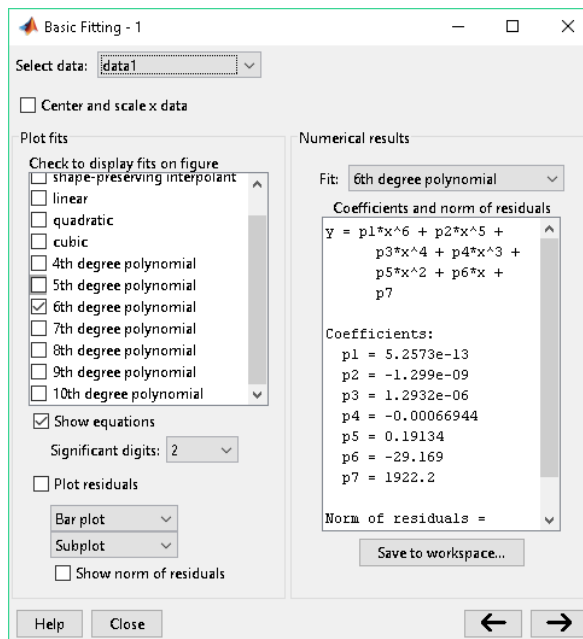


Figura 93 Ecuación característica

6. Si bien la caracterización del sensor ayuda a tener valores estándares de grados de acuerdo a la ecuación del comportamiento del sensor, estos datos siguen siendo muy inestables, esto se debe al ruido

eléctrico que se genera en el acelerómetro en combinación con las vibraciones que se producen al realizar los movimientos, para corregir esto se tomo la decisión de usar un filtro pasabajos al valor de la medición, implementando un filtro paso-bajo IIR de orden 1, se consigue la siguiente funcion de transferecia.

$$H(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}$$

Lo que se traduce en la siguiente ecuacion.

$$y[n] = (1 - \alpha)x[n] + \alpha y[n - 1]$$

Donde $y[n]$ representa el valor de aceleración filtrado actual, $x[n]$ es la muestra actual en bruto tomada del acelerómetro, e $y[n - 1]$ es la muestra filtrada en el instante inmediatamente anterior.

El resultado final es el que se observa en la figura 94, en donde la gráfica de color azul es la señal filtrada:

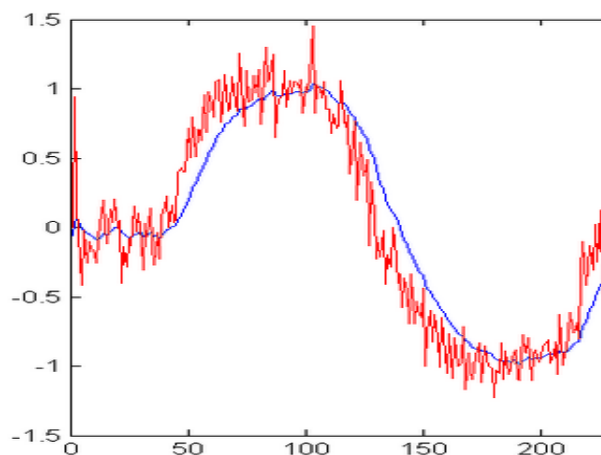


Figura 94 Gráfica del filtrado de señal

4.2.2 Procesado e interpretación de los datos

Programación en Arduino

Se desarrolla un programa en el IDE de Arduino que permite adquirir las señales de posicionamiento del acelerómetro y filtrarlas para eliminar ruido, luego se realiza la caracterización del sensor y se obtiene los datos transformados en grados, inmediatamente se verifica el estado en el cual se encuentran los eslabones del exoesqueleto mediante la señal de posición y así ejecutar las acciones de desplazamiento dentro de los rangos establecidos en la biomecánica para cumplir con parámetros de seguridad que debe tener

en su funcionamiento, si se encuentra en el rango de funcionamiento se podrá subir o bajar los eslabones, y si es el caso de que se encuentre en un rango de peligro de colisión se detendrá el movimiento y solo permitirá moverse fuera del rango de peligro, los movimientos se los podrán hacer mediante la adquisición de señales del mando que tendrán a su vez unas salidas digitales a la tarjeta de potencia que permitirá que se realicen los movimientos, la adquisición de la señal del sensor hall de los motores permite determinar la velocidad y posición de los motores con lo que se tiene una realimentación en el control (ver anexo 10).

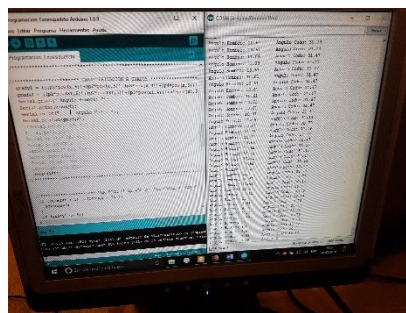


Figura 95 Programación en Arduino

4.2.3 Ejecución de la acción: Etapa de potencia

a. Configuración de la servocontroladora ESCON 50/5

1. Inicie ESCON Studio, el software se encuentra en la pagina www.maxonmotor.com distribuidora de la servocontroladora: Instalar y abrir el acceso directo de “ESCON Studio.exe” de su escritorio. «ESCON Studio» se iniciará.



Figura 96 Acceso directo a ESCON Studio

2. Conecte la servocontroladora a la PC mediante el cable USB.



Figura 97 Conexión tarjeta y PC

3. Inicie el “Asistente de inicio”. Lea las "Instrucciones de seguridad" y confirme. Seleccione “Siguiente”.

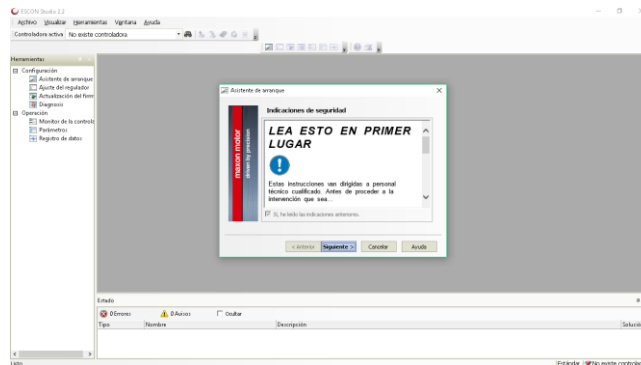


Figura 98 Asistente de inicio

4. Introducción: Seleccione “Siguiente”. Observación: el software busca la servocontroladora.



Figura 99 Buscar controladora

5. Seleccionar el tipo de motor, maxon EC Motor utilizado en este exoesqueleto.

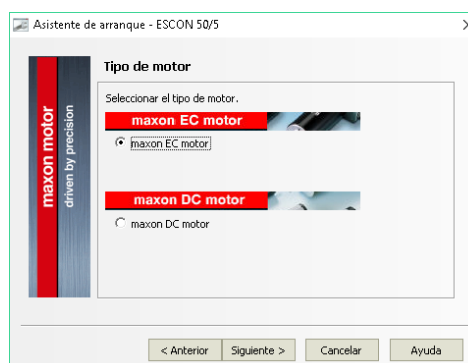


Figura 100 Tipo de motor

6. Datos del motor: Introduzca las características del motor (ver anexo A). Seleccione “Siguiente”.

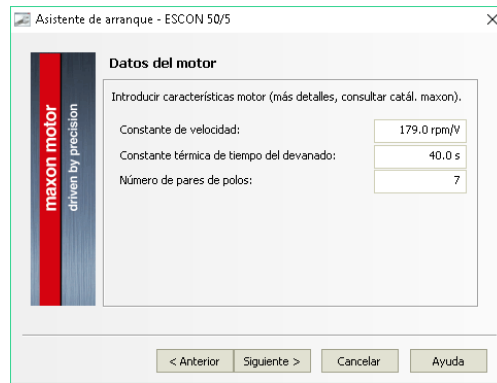


Figura 101 Datos del motor

7. Introduzca los datos del sistema. Seleccione “Siguiete”. (ver anexo A)

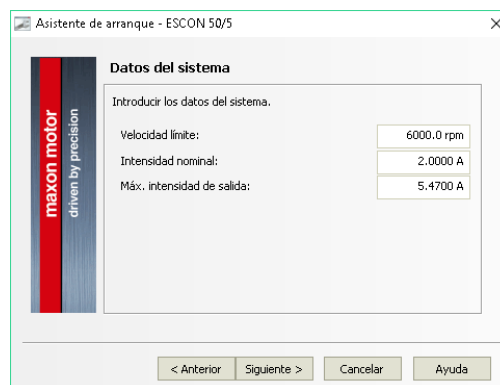


Figura 102 Datos del motor

8. Seleccione el tipo de sensor, “Sensores Hall digitales” y la Polaridad, “maxon”. Seleccione “Siguiete”. (ver “Ayuda” en la barra de herramientas del programa ESCON Studio)

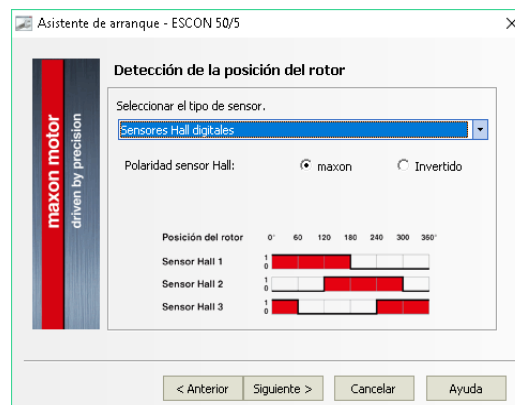


Figura 103 Tipo de sensor

- Configuración del Sensor de velocidad de giro. Seleccione el modo de operación: “Regulador de velocidad”. Seleccione “Siguiete”. (ver “Ayuda” en la barra de herramientas del programa ESCON Studio)

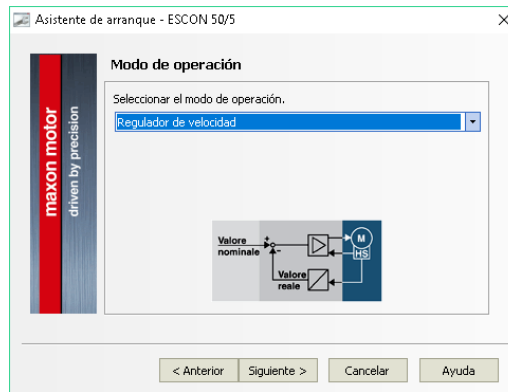


Figura 104 Modo de operación

- Seleccionar el tipo de función para Habilitación. Seleccione “Siguiete” (ver “Ayuda” en la barra de herramientas del programa ESCON Studio).

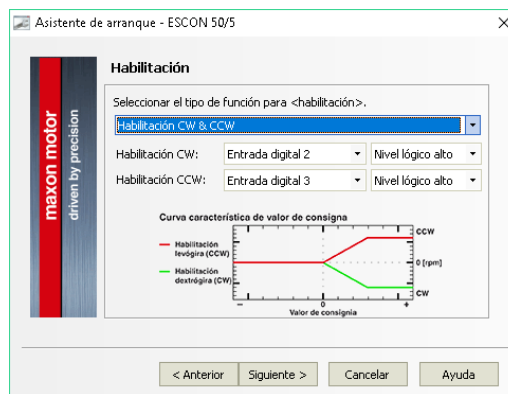


Figura 105 Habilitación

- Seleccionar el tipo de función para valor de consigna: “Valor de consigna fijo”. Valor de consigna máximo “3740 rpm”. Seleccione “Siguiete”. (ver anexo A)

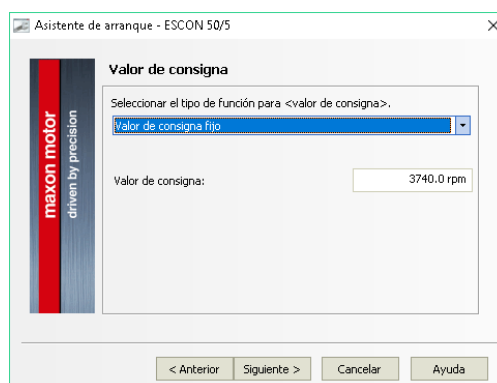


Figura 106 Valor de consigna

- Seleccionar el tipo de función para limitación de corriente: “Limitación de corriente fija”. Valor limitación de “5,47 A”. Seleccione

“Siguiente”. (ver anexo A)

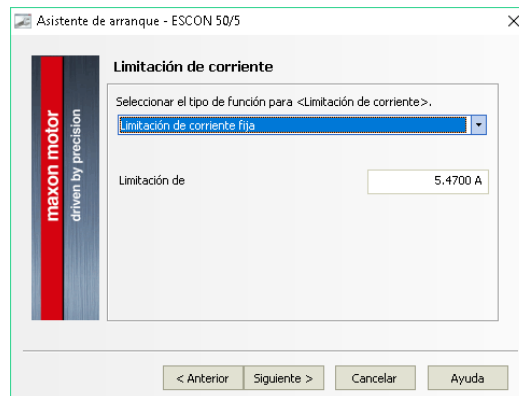


Figura 107 Limitación de corriente

- Seleccionar el tipo de función para Rampa de velocidad: “Rampa fija”. Valores de aceleración y desaceleración de “2000 rpm/s”. Seleccione “Siguiente”. (ver “Ayuda” en la barra de herramientas del programa ESCON Studio).

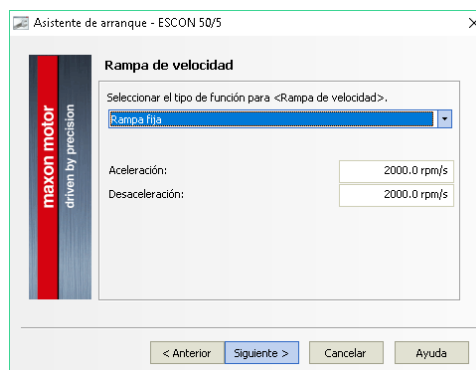


Figura 108 Rampa fija

- Colocar el valor de velocidad de giro mínima: “500 rpm”. Seleccione “Siguiente”. (ver “Ayuda” en la barra de herramientas del programa ESCON Studio).

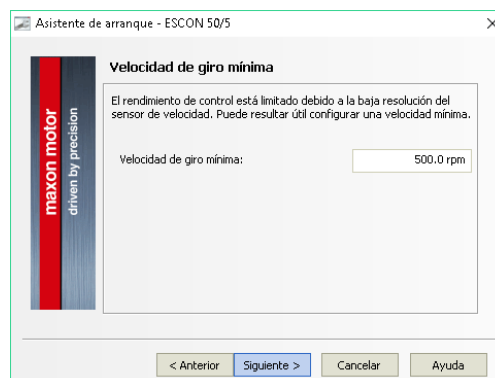


Figura 109 Velocidad de giro mínima

- Seleccionar funciones para las entradas y salidas digitales: “Salida

digital 4". Frecuencia de conmutación. Seleccione "Siguiente".

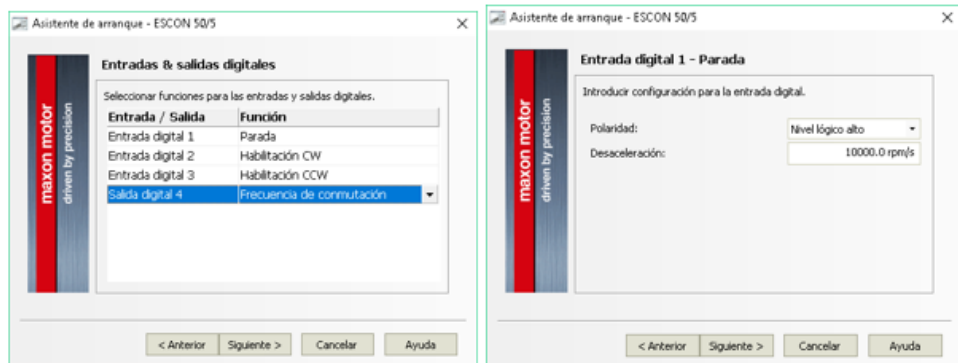


Figura 110 Entradas y salidas digitales

9. Resumen de la configuración.

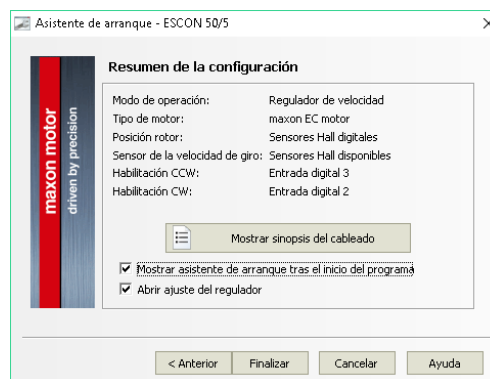


Figura 111 Resumen de la configuración

b. Conexión de la etapa de potencia

Conecte el motor, las salidas digitales de control del microprocesador y el sensor hall a la servocontroladora ESCON 50/5.

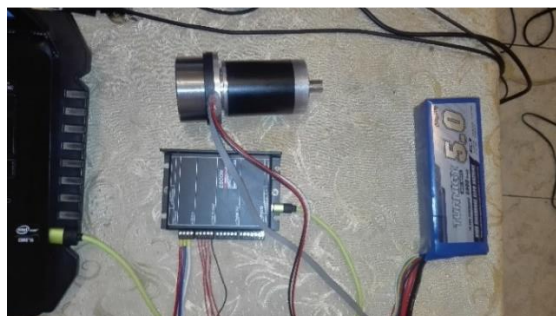


Figura 112 Conexión etapa de potencia

c. Sintonización automática del motor maxon EC60 Flat brushless

1. Encienda la fuente de alimentación ESCON.
2. Elija el método de sintonización. "Sintonización automática". Seleccione "Siguiente".



Figura 113 Tipo de sintonización

3. Sintonización automática: Haga clic en "Inicio".
4. Hay que asegurarse que el eje del motor esté funcionando libremente para iniciar la sintonización automática.
5. La sintonización automática comienza y se ejecuta un procedimiento de dos pasos:
 - Primero identifica los parámetros de control durante este proceso el eje del motor oscila la barra de estado roja se mueve y se pone de color verde.
 - A continuación, los parámetros de control identificados son verificados mediante la evaluación de su respuesta de paso - durante este proceso, el eje del motor oscila, la respectiva barra de estado verde se mueve.

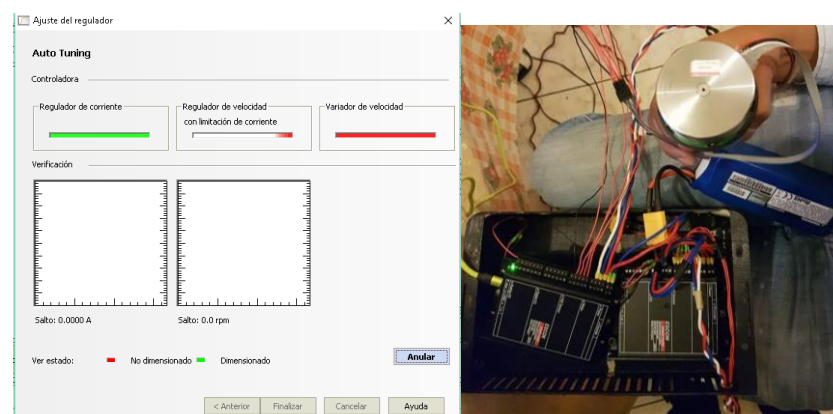


Figura 114 Sintonización automática

6. La sintonización automática se ha completado correctamente ya que todas las barras de estado se han cambiado a verde. Con lo cual el motor ha sido configurado a un punto de referencia inicial.

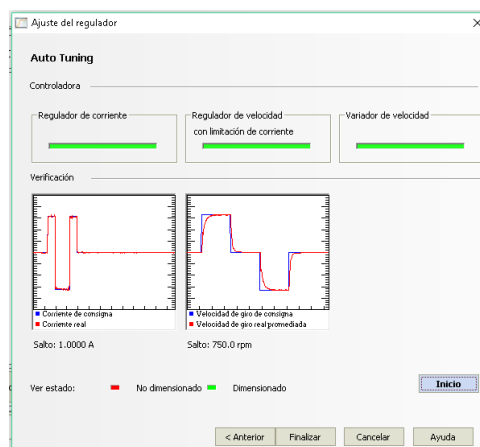


Figura 115 Sintonización finalizada

d. Funcionamiento de la servocontroladora ESCON 50/5.

Representación gráfica en tiempo real de la configuración antes realizada y del funcionamiento de la tarjeta servocontroladora ESCON 50/5.

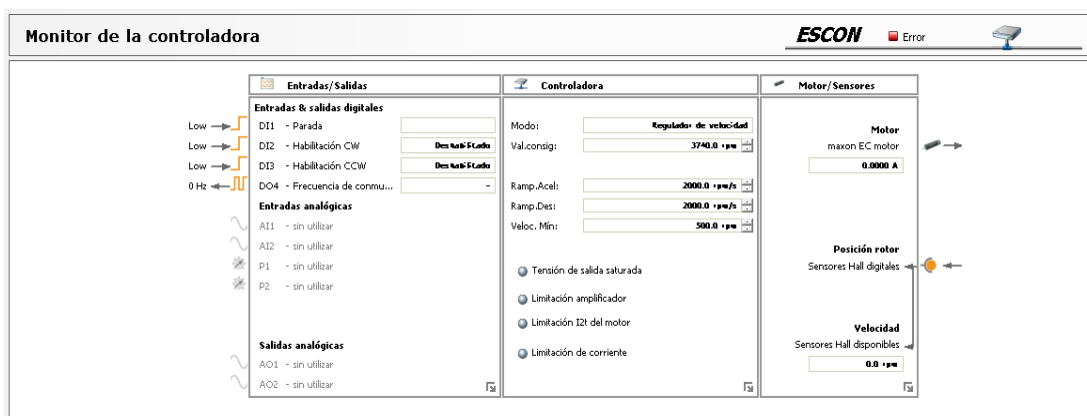


Figura 116 Sinopsis del Monitor de la controladora ESCON

1. Entradas/Salidas

La figura 116 de la sinopsis en su primera parte muestra la activación y desactivación de las entradas digitales y su estado donde:

- Entrada Digital 1 (DI1): Configurado como Parada y utilizada para el paro de emergencia programado dentro del microprocesador, como medida de seguridad para todo el sistema.
- Entrada Digital 2 (DI2): Habilitación CW, el eje del motor sólo podrá girar hacia la derecha. Señal enviada desde el microprocesador arduino Uno.
- Entrada Digital 3 (DI3): Habilitación CCW, el eje del motor sólo

podrá girar hacia la izquierda. La cual se activa con una señal enviada desde el microprocesador arduino Uno.

- Salida Digital 4 (DO4): La velocidad de giro actual se transmite en forma de señal digital (alto/bajo) y corresponde a la frecuencia de conmutación (1 impulso por revolución). Señal enviada al microprocesador para determinar la posición y velocidad en la que se encuentra el motor (Sensor Hall).
- Esta configuración se realiza para las dos servocontroladoras utilizadas en los motores del hombro y el codo.

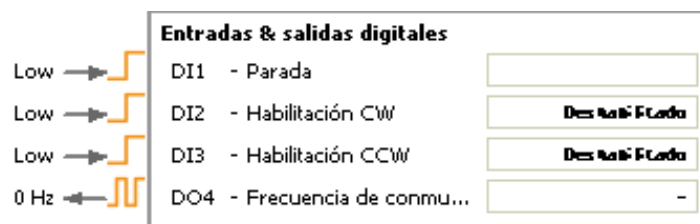


Figura 117 Entradas y salidas digitales.

2. Controladora

La sección de la Controladora indica el modo de operación utilizada en este caso "Regulador de velocidad" y el valor de consigna del funcionamiento del motor, es decir el motor funciona a 3740 rpm de manera constante. Además indica los valores de la rampa de aceleración y desaceleración del motor, utilizadas para el arranque y frenado en el que se generan retardos de 0,77 segundos.



Figura 118 Monitor de la controladora: Controladora

3. Motores/Sensores

Indica en tiempo real el amperaje que el motor maxon EC 60 FLAT brushless consume durante su funcionamiento, además muestra si el sensor hall está o no enviando datos a la controladora.

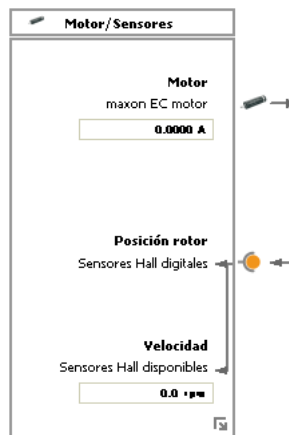


Figura 119 Monitor de la controladora: Motores/sensores

Además el software ESCON Studio presenta en tiempo real un diagrama del funcionamiento antes mencionado de todo el sistema.

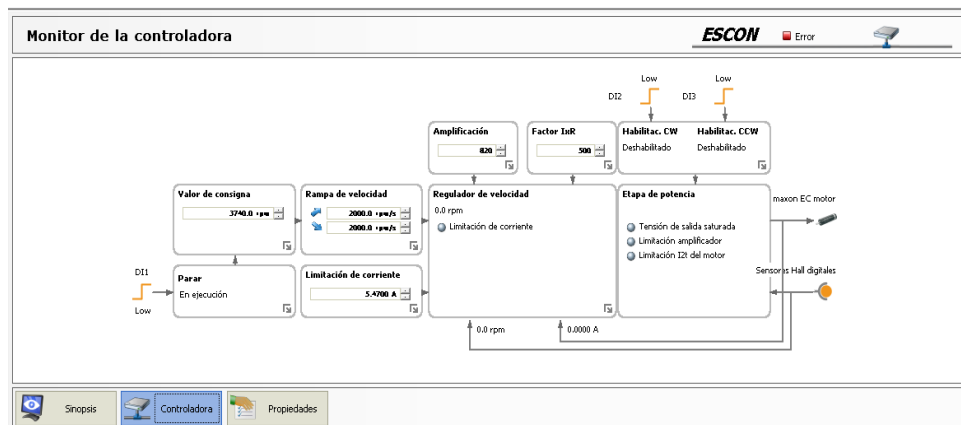


Figura 120 Controladora del Monitor de ESCON

Finalmente cargar los parámetros configurados en el software ESCON Studio a la servocontroladora ESCON 50/5.

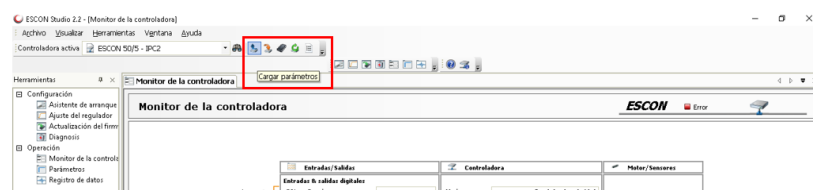


Figura 121 Cargar los parámetros a la controladora ESCON

4.3 Exoesqueleto final

La figura 122, muestra el exoesqueleto final una vez implementado la parte mecánica y el sistema de control. El brazo exoesquelético tiene un peso aproximado de 4 kg (motoreductores, brazo, antebrazo, hombro, carcaza), el espaldar y la mochila de control pesan 2kg, dando así como resultado un peso total de 6 kg.



Figura 122 Exoesqueleto final

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Pruebas a realizar

Para probar el adecuado funcionamiento del exoesqueleto y comprobar que cumple con los requerimientos de diseño se va a realizar las siguientes pruebas:

5.1.1 Tiempo de cada ciclo

Tabla 22
Datos carga vs tiempo de desplazamiento

CARGA	CODO		HOMBRO	
1 kg	Ángulo	Tiempo	Ángulo	Tiempo
	30°	0,56 Seg	25°	0,81 Seg
	60°	1,14 Seg	50°	1,62 Seg
	90°	1,65 Seg	75°	2,43 Seg
	120°	2,25 Seg	100°	3,25 Seg
3 kg	Ángulo	Tiempo	Ángulo	Tiempo
	30°	0,58 Seg	25°	0,81 Seg
	60°	1,16 Seg	50°	1,63 Seg
	90°	1,68 Seg	75°	2,47 Seg
	120°	2,28 Seg	100°	3,28 Seg
6 kg	Ángulo	Tiempo	Ángulo	Tiempo
	30°	0,6Seg	25°	0,84 Seg
	60°	1,2 Seg	50°	1,66 Seg
	90°	1,74 Seg	75°	2,49 Seg
	120°	2,3 Seg	100°	3,3 Seg
9 kg	Ángulo	Tiempo	Ángulo	Tiempo
	30°	0,6 Seg	25°	0,86 Seg
	60°	1,22 Seg	50°	1,69 Seg
	90°	1,75 Seg	75°	2,52 Seg
	120°	2,32 Seg	100°	3,3 Seg
12 kg	Ángulo	Tiempo	Ángulo	Tiempo
	30°	0,63 Seg	25°	0,86 Seg
	60°	1,25 Seg	50°	1,71 Seg
	90°	1,8 Seg	75°	2,54 Seg
	120°	2,4 Seg	100°	3,36 Seg

Tiempo de desplazamiento de 90° del antebrazo para una carga de 1kg.



Figura 123 Tiempo en 90° con 1kg de carga

Tiempo de desplazamiento de 90° del antebrazo para una carga de 6kg.



Figura 124 Tiempo en 90° con 6 kg de carga

Tiempo de desplazamiento de 100° del brazo para una carga de 12kg.



Figura 125 Carga 12kg



Figura 126 Tiempo en 100° con 12kg de carga

5.1.2 Rango de movimiento

En las pruebas de los rangos de movimiento se utilizan los ángulos establecidos con anterioridad en la que el movimiento de flexión del codo será de 0 a 120° y del hombro de 0 a 100°.

Tabla 23
Datos rango de movimiento flexión

ÁNGULO	FLEXIÓN CODO	ÁNGULO	FLEXIÓN HOMBRO
0-120°	1	119,95°	0-100°
	2	119,95°	1
	3	119,84°	2
	4	119,84°	3
	5	119,70°	4
	P	119,84°	5
		P	99,694°

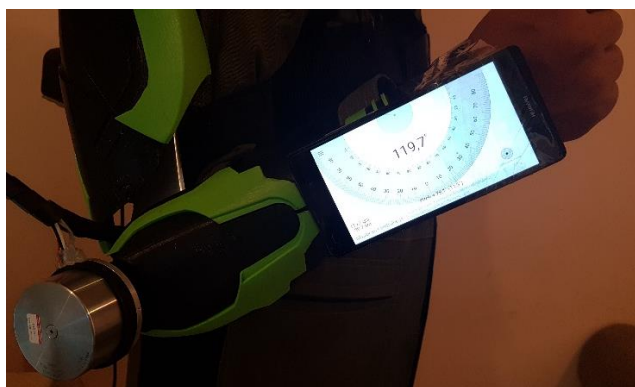


Figura 127 Flexión en el codo



Figura 128 Flexión en el hombro

Los movimientos de extensión del codo son de 120° a 0° y del hombro de 100° a 0° .

Tabla 24
Datos rango de movimiento extensión

ÁNGULO	EXTENSIÓN CODO	ÁNGULO	FLEXIÓN HOMBRO
$120^\circ - 0^\circ$	1	$100^\circ - 0^\circ$	1
	2		2
	3		3
	4		4
	5		5
	P		P
	$0,75^\circ$		$0,61^\circ$
	$0,75^\circ$		$0,61^\circ$
	$0,84^\circ$		$0,00^\circ$
	$0,84^\circ$		$0,61^\circ$
	$1,00^\circ$		$0,2^\circ$
	$0,804^\circ$		$0,414^\circ$

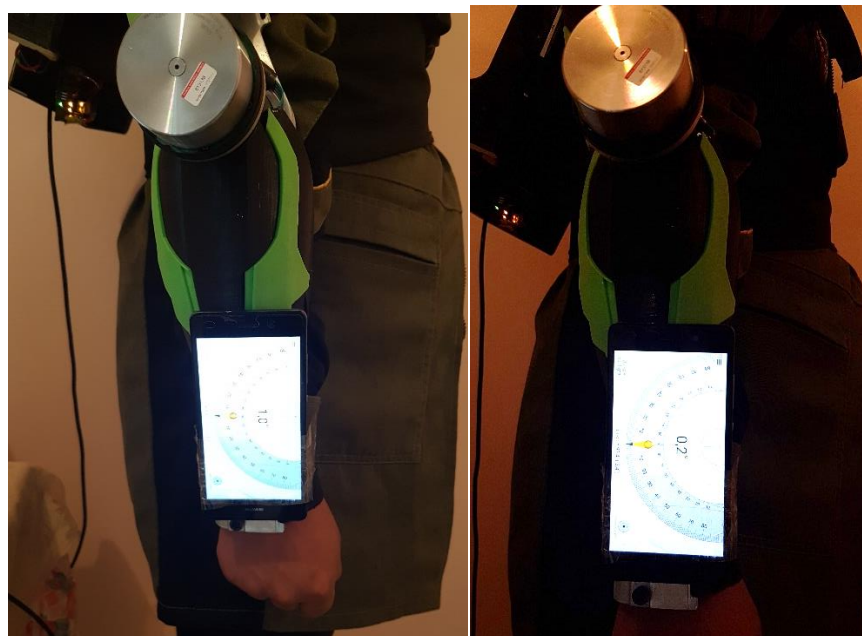


Figura 129 Extensión en el codo y hombro

5.1.3 Prueba de precisión

La prueba de precisión para el codo se lo realiza en segmentos de 30° realizando movimientos de flexo-extensión, en el que se toman datos para determinar el porcentaje promedio de imprecisión.

Tabla 25
Datos de precisión en la flexo-extensión del codo

ÁNGULO	FLEXO-EXTENSIÓN CODO	
De 0 a 30°	1	30,84°
	2	30,84°
	3	30,84°
	4	29,95°
	5	30,84°
	P	30,662°
De 30° a 60°	1	60,95°
	2	60,95°
	3	61,00°
	4	60,95°
	5	60,95°
	P	60,96°
De 60° a 90°	1	89,95°
	2	89,95°
	3	90,84°
	4	90,84°
	5	90,84°
	P	90,484°
De 90° a 120°	1	120,84°
	2	120,84°
	3	120,84°
	4	120,84°
	5	120,84°
	P	120,84°

Movimiento de flexión del codo 30°

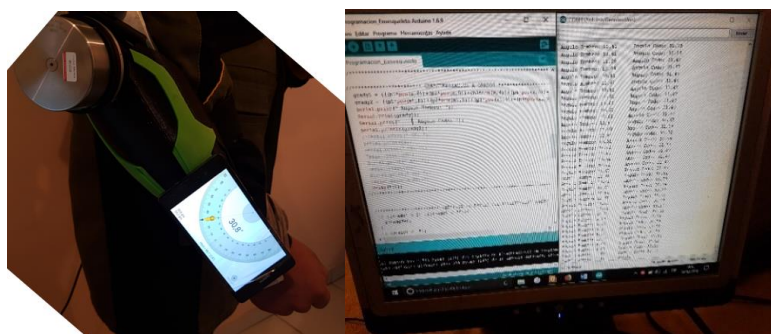


Figura 130 Movimiento de flexión del codo 30°

Movimiento de flexión del codo 60°

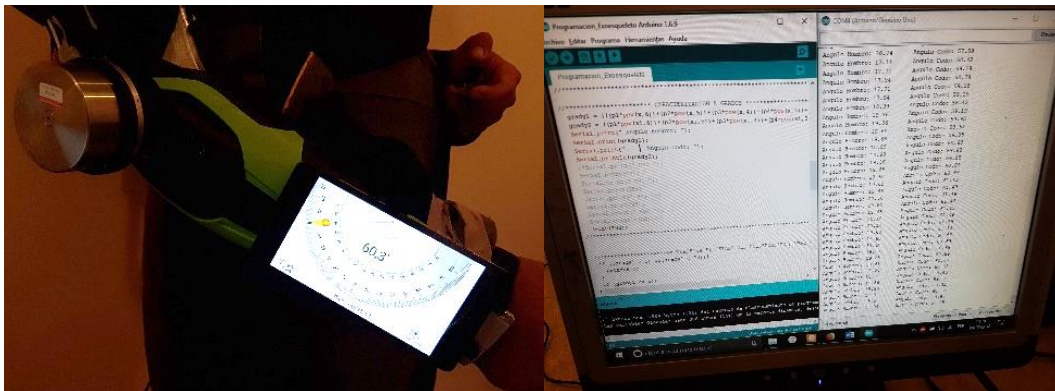


Figura 131 Movimiento de flexión del codo 60°

Movimiento de flexión del codo 90°

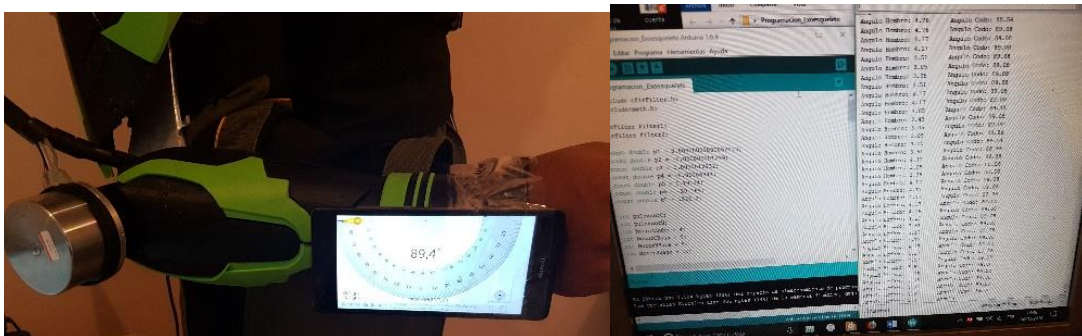


Figura 132 Movimiento de flexión del codo 90°

Movimiento de flexión del codo 120°



Figura 133 Movimiento de flexión del codo 120°

Para la prueba de precisión del hombro se lo realiza en segmentos de 25° realizando movimientos de flexo-extensión, en el que se toman cinco mediciones para determinar el porcentaje de imprecisión.

Tabla 26
Datos de precisión en la flexo-extensión del hombro

ÁNGULO	FLEXO-EXTENSIÓN DEL HOMBRO	
De 0° a 25°	1	25,00°
	2	25,00°
	3	24,61°
	4	25,00°
	5	24,61°
	P	24,844°
De 25° a 50°	1	49,24°
	2	49,24°
	3	49,61°
	4	50,00°
	5	50,00°
	P	49,618°
De 50° a 75°	1	75,00°
	2	75,61°
	3	75,24°
	4	76,30°
	5	75,00°
	P	75,692°
De 75° a 100°	1	98,21°
	2	99,24°
	3	99,24°
	4	99,24°
	5	99,76°
	P	99,418°

Movimiento de flexión del hombro 25°

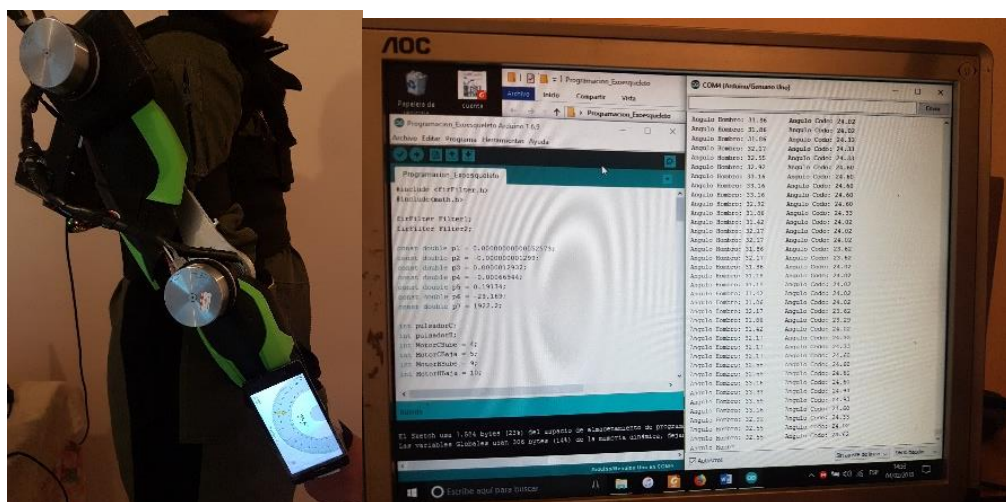


Figura 134 Movimiento de flexión del hombro 25°

5.1.4 Prueba de carga

La prueba de carga consiste en comprobar la multiplicación de fuerza del exoesqueleto, para lo cual se lo realiza sin ser colocado en el usuario. Para demostrar que su carga neta de trabajo es 12 kilogramos.

Tabla 27
Datos prueba de carga

CARGA	FLEXO-EXTENSIÓN DEL CODO			FLEXO-EXTENSIÓN DEL HOMBRO		
	N° PRUEBAS	SI	NO	N° PRUEBAS	SI	NO
10 kg	1	X		1	X	
	2	X		2	X	
11 kg	1	X		1	X	
	2	X		2	X	
12 kg	1	X		1	X	
	2	X		2	X	
13 kg	1	X		1	X	
	2	X		2	X	
14 kg	1		X	1		X
	2		X	2		X

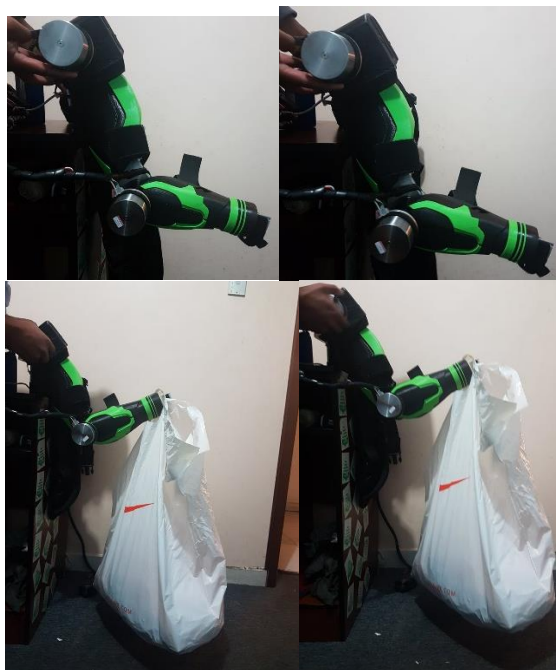


Figura 138 Prueba de carga

5.2 Análisis de resultados

Tiempo de cada ciclo

Los datos del tiempo propuesto en los parámetros de diseño para los movimientos del exoesqueleto se cumplen ya que en el cálculo no se consideró que los motores no alcanzan su velocidad nominal hasta después de un tiempo de arranque, y no detienen el movimiento hasta un tiempo de desaceleración, que tomando datos el tiempo de arranque y desaceleración aumenta al tiempo de movimiento un promedio 0,77 seg.

Rango de movimiento

Según datos obtenidos en la tabla 23, para el movimiento de flexión del codo el ángulo de desplazamiento promedio es $119,84^\circ$, el ángulo que debe alcanzar es 120° por lo que el error es del 0,13%. Para el movimiento de flexión del hombro se tiene un ángulo promedio de $99,694^\circ$, el ángulo que debe alcanzar es 100° con lo cual existe un error del 0,306%

En base a los datos de la tabla 24, para el movimiento de extensión el ángulo al que debe llegar es 0° en el codo y el hombro, en el codo el ángulo promedio de desplazamiento es $0,804^\circ$ que representa un error del 0,194%. En el hombro el ángulo promedio de extensión es $0,414^\circ$ el que representa un 0,586% de error.

Prueba de precisión

En la tabla 25, del movimiento de flexo-extensión del codo se tiene que para un desplazamiento de 0° a 30° el margen de error es $\pm 0,662^\circ$, de 30° a 60° el error es $\pm 0,96^\circ$, de 60° a 90° el error es $\pm 0,484$ y de 90° a 120° el error es $\pm 0,84$, con lo cual se concluye que el margen de error del movimiento de flexo extensión del codo es $\pm 0,7365^\circ$ que representa el 98,946 % de precisión.

Según la tabla 26, del movimiento de flexo-extensión del hombro se tiene que para un desplazamiento de 0° a 25° el margen de error es $\pm 0,844^\circ$, de 25° a 50° el error es $\pm 0,618^\circ$, de 50° a 75° el error es $\pm 0,692$ y de 75° a 100° el error es $\pm 0,418$, con lo cual se determina que el margen de error del

movimiento de flexo extensión del hombro es $\pm 0,643$ que representa el 97,428 % de precisión.

5.3 Validación de hipótesis

5.3.1 Planteamiento de la hipótesis

El exoesqueleto robótico multiplicador de fuerza de extremidad superior permite levantar una carga de 12 kilogramos en un solo brazo.

5.3.2 Validación de hipótesis

De acuerdo a los resultados que muestra la tabla 27, de la sección 5.1, la hipótesis es admitida como verdadera, validando el levantamiento por parte del exoesqueleto de una carga de 12 kilogramos, al haber realizados pruebas satisfactorias de levantamiento de carga.

CONCLUSIONES

- A pesar de que el exoesqueleto se diseñó para levantar 12 kilogramos se puede alcanzar 13 kilogramos sin ningún tipo de problema en su estructura y en su funcionamiento.
- En los parámetros de diseño se estableció que la velocidad más conveniente para trabajo de flexo-extensión en el codo es 38,30°/s y en el hombro 16,92°/s, y se comprueba que estas velocidades se mantienen constantes debido a que es una velocidad establecida en la configuración de las servocontroladoras el parámetro que sufre mínimas variaciones es el tiempo de acuerdo a la carga aplicada por efectos del arranque y frenado.
- Los resultados obtenidos luego de hacer el análisis estadístico se ve que en el movimiento de flexo-extensión del codo la precisión es $\pm 0,7365^\circ$ que representa el 98,946% de confiabilidad. En el movimiento de flexo-extensión del hombro la precisión es $\pm 0,643$ que representa el 97,428% de confiabilidad.
- Se diseñó e implemento un exoesqueleto para extremidad superior capaz de levantar y transportar una carga de hasta 120 Newtons con un esfuerzo mínimo dentro de los entornos de trabajo. La estructura se basó en datos antropométricos de la población ecuatoriana y en su biomecánica. Estos aspectos hacen que el exoesqueleto sea ergonómico y cómodo para el usuario.
- El exoesqueleto es capaz de moverse en dos grados de libertad. El primero, un movimiento de flexo-extensión en la coyuntura del codo en un rango de 0 a 120 °. Y el segundo en la coyuntura del hombro para un movimiento de flexo-extensión de 0 a 100°.
- El exoesqueleto cumple con todos los parámetros de requerimientos que se establecieron para el diseño con lo cual el dispositivo es seguro confiable y no sufrirá fallas.

RECOMENDACIONES

- A pesar de que el exoesqueleto cumple de forma adecuada con la mayoría de los parámetros de diseño requerido para multiplicar la fuerza se recomienda la implementación del otro miembro superior para incrementar la aplicabilidad del exoesqueleto dentro de la industria.
- El peso final del exoesqueleto se encuentra dentro de los rangos de peso manejados por los exoesqueletos comerciales, sin embargo se recomienda investigar e implementar materiales más resistentes y sobre todo más livianos que permitan construir una estructura mucho más ligera.
- Para optimizar el funcionamiento del exoesqueleto a futuro se debería investigar, diseñar y probar distintas formas de control que se adapte a las condiciones físicas de las personas dentro de un ambiente industrial, para que el exoesqueleto trabaje en paralelo con los movimientos del cuerpo, por ejemplo se podría emplear señales neuromotoras en tiempo real.
- Por motivos de la gran energía que requiere la puesta en marcha del exoesqueleto, se generan inconvenientes como el tiempo de duración y peso de las baterías, por lo cual se recomienda buscar otro tipo de fuentes de voltaje que optimicen su capacidad y peso.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, S. (11 de Agosto de 2015). *Conéctica*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://conectica.com/2015/08/11/exoesqueleto-simula-75-anos/>
- Arduino. (2018). *Arduino store*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Aula Virtual Tecnología. (2015). *Aula Virtual Tecnología*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <http://aulatecnologiaeinformatica.webnode.es/grados/noveno/mecanismos/ruedas-de-friccion/>
- Avello, A. (2014). *Teoría de máquinas*. Pamplona: Universidad de Navarra.
- Ayala, C. (2008). *Propuesta de mejora del mecanismo articulado captador parabólico solar*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de Robótica*. España: Mc Graw Hill.
- Basdogan, C., & Ho, C. (2001). Srinivasan. Virtual environments for medical training: Graphical and haptic simulation of laproscopic common bile duct exploration. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 6:269-285.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2014). *Shigley's Mechanical Engineering Design. Vol. 10*. London: McGraw-Hill.
- Cardona, S., & Clos, D. (2008). *Teoría de máquinas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Carmenate, L., Moncada, F., & Borjas, E. (2014). *Manual de Medidas Antropométricas*. Costa Rica: SALTRA (Programa Salud, Trabajo Y Ambiente en América Central)/IRET-UNA (Instituto Regional en Sustancias Tóxicas).
- Chávez, M., & Spitia, F. (2010). Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. *Ingeniería Biomédica*, 63-70.

- Clauser, C., & Conville, J. (1969). Weight, volume and center of mass of segments of the human body. *Ohio: Wright Patterson Air Force Base Sports Medicine*, 58-59.
- Creus, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Barcelona: 3Q Editorial.
- De Máquinas y Herramientas. (27 de Enero de 2011). *De Máquinas y Herramientas*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/centro-mecanizado>
- DIN EN. (8 de 2013). 485-2 DIN EN 485-2:. *Aluminium und Aluminiumlegierungen-Bänder*. Berlin: Bleche und Platten-Teil 2: Mechanische Eigenschaften.
- Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower extremity exoskeleton and active orthoses, Challenges and state of the art. *IEEE Transaction on Robotics*, 144-158.
- Gómez, A., & Carrillo, M. (2009). Estudio de ayudas técnicas tipo exoesqueleto para apoyo a pacientes con desordenes en el movimiento. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, 55-56.
- González, T. (2011). *Circuitos de fluidos. Suspensión y dirección*. Madrid: Editorial Editex.
- Grosso, J., & Tibaduiza, D. (2009). Diseño Conceptual de un Exoesqueleto para aistir la rehabilitación de miembro inferior. *IEEE*, 1-6.
- Guoyuan, T., & Haoping, W. (2017). Modeling and control of 4-DOF powered upper limb exoskeleton. *Automation (YAC), 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of.*, 304-309.
- Herr, H. (2009). Exoskeleton and orthoses. Classification, design, challenges and rehabilitation. *Journal or Neuro Engineering and Rehabilitation*, 6-21.

- Herrera, L. F. (2010). Medición del momento de inercia de un anillo y un disco implementando un acelerómetro en una mesa rotatoria. *Scientia et Technica Año XVI, No 45*, 180-185.
- HETPRO. (2018). *HETPRO STORE*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de MMA7361 Sensor Acelerometro: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/mma7361-sensor-acelerometro/>
- Hiper. (2016). *TodoSai 2.0*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de Hiper shops: <https://todosai.com/blog/baterias-tipos-y-usos-b50.html>
- IES MARISMAS. (13 de Noviembre de 2015). *Tecnologíaa IES MARISMAS*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <http://iesmarismas.blogspot.com/2015/11/biela-manivela-ciguenal.html>
- IES Villalba Herbás. (2009). *Instituto de Educación Secundaria les Villalba Hervás*. Obtenido de Aprendamos tecnología: <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/04/02-arboles-ejes-ruedas-de-friccion.pdf>
- IESS, I. E. (2002). *Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo*. Quito: Seguro General De Riesgos De Trabajo. Decreto Ejecutivo 2393.
- INSHT, I. N. (1997). *Real decreto 487/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores*. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Jezernik, S., G., C., & Keller, T. (2003). Robotic orthosis lokomat: A rehabilitation and research tool. *Neuromodulation*, 6(2):108-115.
- Kapandji, A. (2012). *Fisiología Articular*. España: Editorial medica Panamericana. Tomo I.
- Kawamoto, H., & Sankai, Y. (2002). Power assist system HAL-3 for gait disorder person. *Computer Helping People Special Needs*, 196-203.

- Kazerooni, H. (1990). Human-robot interaction via the transfer of power and information signals. *IEEE*, 450-463.
- Lema, D. (2013). *Comparación estadística de medidas antropométricas entre mestizos, indígenas y afro ecuatorianos de la Región Sierra del Ecuador*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Martínez, M. (Septiembre de 2011). *Diseño de un banco de pruebas para un exoesqueleto de miembro superior*. Madrid: Universidad Carlos III.
- Martínez, J. (2013). *Diseño de un exoesqueleto para miembro inferior*. Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Matus, D. (22 de Marzo de 2016). *Digital Trends ES*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://es.digitaltrends.com/vestibles/exoesqueleto-robot-panasonic/>
- Matus, D. (10 de Noviembre de 2017). *Digital Trends ES*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://es.digitaltrends.com/autos/exoesqueleto-eksovest-ford-robot/>
- Maxon Motor. (2015). *Maxon Motor*. Obtenido de <https://www.maxonmotor.es>
- Monclova, O. (2013). *VIX*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/5870/titan-arm-un-exoesqueleto-portable-y-accesible>
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2017). *Applied Strength of Materials. Vol. 6*.
- Norton, K., & Olds, T. (1996). *Antropométrica: Un libro de referencia sobre mediciones corporales humanas para la educación en deportes y salud*. Sidney: Southwood Press.
- OIT, O. I. (2012). *Peso máximo en el levantamiento y transporte de cargas*. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo.
- Olaya, A., & Ruíz, F. (2008). *Sistema Robótico Multimodal para Análisis y Estudios en Biomecánica, Movimiento Humano y Control Neuromotor*. Madrid, España: Universidad Carlos III.

- OSHA, A. E. (2007). *Riesgos asociados a la manipulación manual de cargas en el lugar de trabajo*. Bélgica: Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. ISSN 1681-2085.
- Peña, W. (23 de Diciembre de 2016). *PC World*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de *PC World is digital too*: <http://www.pcworldenespanol.com/2016/12/23/conozca-los-exoesqueletos-hyundai/>
- Rosa, A. (2014). Biomecánica del movimiento humano: evolución histórica y aparatos de medida. *EFDeportes.com, Revista Digital.*, 1-1.
- Rosen, J., Brand, M., & Fuchs, M. (2001). A myosignal-based powered exoskeleton system. *IEEE Transaction On Systems, Man and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 210-222.
- Singaña, M. (2015). *Morfología del robot*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas, Ingeniería Mecatrónica.
- Soto, J. (5 de Enero de 2017). *Ecomotor*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <http://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/8065447/01/17/RoboMate-el-exoesqueleto-para-desguazar-coches.html>
- Valero, C. (30 de Diciembre de 2014). *ADSL ZONE*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://www.adslzone.net/2014/12/30/un-exoesqueleto-puede-ser-tuyo-por-3-500-euros/>
- Valero, E. (2017). *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene*. Obtenido de Centro Nacional de Nuevas Tecnologías: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/?VAPCOOKIE=W9MPhpJTPfBhlyfL24KrmShSWHvLGQQInY9LG9xmVTHGhymPpzmK!-1284214806!-652337195>
- Xataka. (18 de Marzo de 2016). *Xataka*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/panasonic-nos-ensena-sus-exoesqueletos-de-todos-los-tamanos-power-loader-ninja-y-awn-03>

Xataka. (30 de Octubre de 2017). *Xataka*. Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/estos-tres-exoesqueletos-te-permitiran-levantar-hasta-450-kg-de-peso-y-estaran-a-la-venta-en-2020>

Zoss, A. B. (2006). Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transaction on Mechatronic*, 128-138.

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **ALEXIS GONZALO LAMINGO CAIZALUISA** y **LEOPOLDO JAVIER LOOR CEBALLOS**.

En la ciudad de Latacunga, a los 19 días del mes de febrero del 2018.

Ing. Oscar Arteaga

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE LA CARRERA

Aprobado por:



Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO