



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE PARA FRUTO DE
PALMA AFRICANA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniera en Mecatrónica

AUTOR: JULY ANA MASACHE APOLO

TUTOR: FABIO EDUARDO OBANDO HERRERA

Quito-Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, **July Ana Masache Apolo** con documento de identificación N° 2200229702
manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera
total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de abril del año 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'July Ana Masache Apolo', is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large loop at the beginning.

July Ana Masache Apolo

2200229702

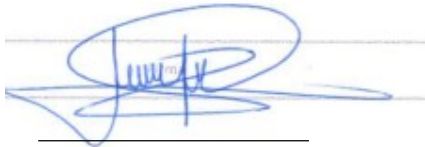
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **July Ana Masache Apolo** con documento de identificación No. 2200229702, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor para el desarrollo de un Dispositivo tecnológico: “Diseño y construcción de un sistema de corte para fruto de Palma Africana”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de abril del año 2022

Atentamente,



July Ana Masache Apolo

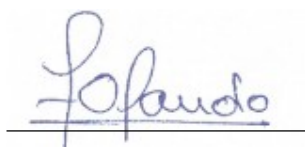
2200229702

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabio Eduardo Obando Herrera con documento de identificación N° 1707982169, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE PARA FRUTO DE PALMA AFRICANA , realizado por **July Ana Masache Apolo** con documento de identificación N° 2200229702, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de un Dispositivo tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de abril del año 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Fabiano", is written over a horizontal line.

Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera, PhD

1707982169

AGRADECIMIENTO

Agradecer primero a Dios, por guiarme y bendecirme estos años con salud y sabiduría a mí como a mis familiares, y permitirme lograr este objetivo. A mis amados Padres Franco Nicolas Masache y Gladys Raquel Apolo por ser mi ejemplo de constancia y esfuerzo, por sus palabras de aliento y su apoyo incondicional en este arduo camino. A mis hermanos Carlos, Alexandra y Jhonny quienes son mis amigos incondicionales y han sido parte de este proceso.

A la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana por haberme acogido en sus instalaciones y ser parte de su proceso de enseñanza profesional y humana.

A mis docentes y en especial a mi tutor de proyecto de titulación Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera MSc. PhD. por su ayuda paciencia y dedicación y ser una guía valiosa para culminar con éxitos este proyecto y por todos sus conocimientos brindados.

A mis compañeros y cómplices de la carrera, por los maravillosos momentos de aprendizaje constante y ser parte de esta grandiosa etapa llamada universidad.

A mis queridos amigos quienes me acompañan desde siempre y fueron parte de este granito de arena.

A todas las personas que me apoyaron y siempre estarán presentes en mí corazón.

GLOSARIO

Ápice: Parte o cantidad muy pequeña e insignificante, punta o extremo de una cosa.

Capitellum: Es una eminencia redondeada y lisa en la porción lateral de la superficie articular distal del húmero se usa para limitar a la faceta articular anteroventral de la costilla.

Deltoidea: Es el músculo del hombro tiene de forma de un semicono hueco, se inserta en el húmero.

Desguazar: Desmontar una estructura, fundamentalmente un aparato, una máquina o un vehículo en las diferentes piezas de que se compone.

Filotaxia: Dirección como nacen las hojas, permite dar el sentido de corte de la hoja al momento de la cosecha del fruto de la palma africana.

Glenohumeral: o del hombro es una articulación sinovial que combina la extremidad superior al esqueleto axial, entre la cabeza humeral y la cavidad del omóplato.

Percentil: Es una medida de posición usada en estadística, después de ordenar los datos de menor a mayor, muestra el valor de la variable bajo la cual hay un determinado porcentaje de observaciones en el grupo estudiado.

Pericarpio: Es la superficie exterior de la fruta que incluye las semillas.

Tendinitis: Es la inflamación o irritación de los tendones, los cordones fibrosos que conectan los músculos a los huesos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	I
Problema de Estudio	III
JUSTIFICACIÓN	IV
GRUPO OBJETIVO	V
OBJETIVOS	V
Objetivo General	V
Objetivos Específicos.....	V
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	1
1.1 Antecedentes de la Palma Africana.....	1
1.2 Racimos y Frutos.....	2
1.3 Palma Africana en la Amazonía.....	3
1.4 Variedad de Palma africana.....	5
1.4.1 Palma africana Pisífera (P x P).....	5
1.4.2 Palma africana Dura (D x D).....	5
1.4.3 Palma africana Tenera (D x P)	5
1.4.4 Racimos nigrescens	6
1.4.5 Racimos virescens	6
1.5 Cosecha y manejo en postcosecha	6
1.5.1 Planificación.....	6
1.5.2 Cosecha	7
1.5.3 Parámetros de Cosecha.....	7

1.6 Equipos, utensilios y herramientas.....	9
1.7 Máquina semiautomatizada.....	9
1.8 Método Tradicional.....	9
1.9 Producción de cosecha.....	9
1.9.1 Riesgos ergonómicos en la cosecha de Palma Africana.....	10
1.10 Los exoesqueletos industriales.....	11
1.10.1 Aplicación de los exoesqueletos.....	12
1.10.2 Tipos de exoesqueletos industriales.....	12
1.11 Antropometría.....	14
1.11.1 Generalidades.....	14
1.11.2 Medidas antropométricas implementadas en el exoesqueleto.....	14
1.11.3 Datos Antropométricos de la Población.....	16
1.11.4 Masa fragmentar con referencia a la masa total del cuerpo.....	17
1.12 Biomecánica.....	17
1.12.1 Biomecánica del hombro.....	18
1.12.2 Biomecánica del Codo.....	18
1.12.3 La abducción.....	19
1.12.4 Efectos de manipulación manual de cargas.....	20
1.13 Normativas técnicas para manejo de cargas y antropometría.....	20
CAPÍTULO 2.....	22
Análisis de alternativas.....	22
2.1 Sistema de corte.....	22
2.1.1 Alternativa 1 (Sistema de Corte).....	22

2.1.2 Alternativa 2 (Sistema de Corte).....	23
2.1.3 Alternativa 3 (Sistema de Corte).....	23
2.1.4 Alternativa 4 (Sistema de Corte).....	24
2.2 Mecanismo para diseño del sistema de corte	24
2.2.1 Alternativa 1 (Mecanismo).....	25
2.2.2 Alternativa 2 (Mecanismo).....	25
2.2.3 Alternativa 3 (Mecanismo).....	26
2.2.4 Alternativa 4 (Mecanismo).....	26
2.3 Identificación de necesidades.....	27
2.3.1 Jerarquización de Necesidades.....	27
2.3.2 Establecer la importancia relativa de las necesidades	28
2.3.3 Módulos para el Diseño.....	29
2.3.4 Módulo 1 (Peso, Construcción).....	29
2.3.5 Módulo 2 (Potencia).....	30
2.3.6 Módulo 3 (Mecanismo de montaje)	30
2.3.7 Módulo 4 (Sistema de transmisión)	30
2.4 Análisis de materiales.....	31
2.4.1 Acero ASTM 36.....	31
2.4.2 Resina Tough 2000.....	32
2.5 Formulación	33
2.5.1 Factor de Seguridad.....	33
2.5.2 Esfuerzos	34
2.5.3 Momento de Inercia	34

2.6 Sistema de Control y eléctrico	35
2.6.1 Servomotor MG 996R.....	35
2.6.2 Arduino nano.....	35
2.6.3 Acelerómetro ADXL345.....	36
2.6.4 Solar Charger	37
CAPÍTULO 3.....	38
ANÁLISIS DE CARGAS	38
3.1 Eslabón hombro-codo	43
3.1.1 Fuerzas Cortantes	46
3.1.2 Momentos flectores	46
3.2 Eslabón antebrazo	47
3.2.1 Fuerzas Cortantes	47
3.2.2 Momentos flectores	48
3.3 Dimensionamiento de los servomotores.....	48
3.3.1 Cálculo del torque del codo.....	48
3.3.2 Cálculo del torque del hombro	49
3.3.3 Selección Servomotores	50
3.4 Selección de los rodamientos	51
3.5 Simulación Eslabones	54
3.6 Cálculo de fuerza de corte.....	59
3.7 Cálculos diseño piñón-corredera.....	62
3.8 Identificación de Sistemas.....	68
3.8.1 Adquisición de Datos	68

3.8.2 Diseño eléctrico y electrónico	69
3.8.3 Conexión de Sensores y actuadores	70
3.8.5 Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento.....	71
CAPÍTULO 4.....	73
IMPLEMENTACIÓN.....	73
4.1 Manufactura y Ensamble.....	73
4.2 Secuencia para la construcción del exoesqueleto.....	73
4.2.1 Proceso de Obtención de materia prima.....	74
4.2.2 Proceso de Estereolitografía de piezas	74
4.2.3 Proceso de Doblado de perfil redondo	77
4.2.4 Proceso de LBC (Corte por haz de laser).....	78
4.2.5 Proceso de Recubrimiento.....	79
4.2.6 Proceso de Soldadura	80
b.Operaciones	de
Ensamble	82
4.3 Ensamble Mecánico	82
4.4 Ensamble Eléctrico.....	83
4.5 Desarrollo del sistema de control	83
4.5.1 Percepción del Entorno.	83
CAPÍTULO 5.....	92
Prueba y Análisis de Resultados	92
5.1 Rango de Movimientos	92
5.2 Prueba de Precisión.....	94

5.3 Tiempo de ejecución de corte.....	100
5.4 Análisis Económico.....	103
5.5 Valor actual neto (VAN).....	106
5.6 Tasa interna de retorno (TIR).....	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
Conclusiones	108
Recomendaciones.....	109
REFERENCIAS	110
ANEXOS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura (1-1). Exoesqueleto Titan Arm [21].....	13
Figura (1-2). Exoesqueleto Titan Arm [27].....	13
Figura (1-3). Exoesqueleto Titan Arm [23].....	14
Figura (1-4). Medidas antropométricas [31].....	15
Figura (1-5). Movimientos del Hombro Flexo-Extensión [38]	18
Figura (1-6). Movimientos del Codo Flexo-Extensión [38].....	19
Figura (1-7). Movimientos del hombro abducción [38]	19
Figura (2-1). Vástago Telescópico	22
Figura (2-2).Máquina Biela-Manivela basado en el mecanismo máquina de coser [43].....	23
Figura (2-3). Máquina Mecanismo Yugo Escoses	23
Figura (2-4). Máquina Cilindro Neumático [44]	24
Figura (2-5). Corte tradicional con malayo [45].....	24
Figura (2-6). Corte con brazo mecanico [46]	25
Figura (2-7). Exoesqueleto industriales.....	25
Figura (2-8). Cortadora Sthill pc 70 [47].....	26
Figura (2-9). Sistema con ruedas para corte de fruto de palma africana [46]	26
Figura (2-10). Curva Esfuerzo – Deformación Materiales Dúctiles [50].....	33
Figura (2-11). Momentos de Inercia de un Rectángulo y Triangulo [52]	34
Figura (2-12). Servomotor MG 996R [53]	35
Figura (2-13). Arduino nano [54]	35
Figura (2-14). Acelerómetro ADXL345 [55]	36

Figura (2-15). Diagrama de conexión Arduino nano y Acelerómetro ADXL345 [56] ..	37
Figura (2-16). Solar Charger [57]	37
Figura (3-1). Diagrama de cargas del exoesqueleto	38
Figura (3-2). Diagrama de Cargas del Eslabón base-motor simulado como viga empotrada ...	39
Figura (3-3). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón base-motor	39
Figura (3-4). Diagrama de momentos del eslabón base-motor	39
Figura (3-5). Catálogo Acero Center perfil redondo [59].	41
Figura (3-6). Simulación Esfuerzo Von Mises estructura mochila	41
Figura (3-7). Simulación Desplazamientos estructura mochila	42
En la figura (3-7) se tiene un desplazamiento máximo de 0,84351mm con respecto a sus dimensiones reales.....	42
Figura (3-8). Simulación Factor de Seguridad estructura mochila.....	42
Figura (3-9). Eslabón hombro-codo	44
Figura (3-10). Diagrama de Cargas del eslabón hombro-codo simulado como viga empotrada	46
Figura (3-11). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón hombro-codo	46
Figura (3-12). Diagrama de momentos del eslabón hombro-motor	46
Figura (3-13). Diagrama de Cargas del eslabón antebrazo	47
Figura (3-14). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón antebrazo	47
Figura (3-15). Diagrama de momentos del eslabón antebrazo.....	48
Figura (3-16). Fuerza y peso que actúa en el hombro	48
Figura (3-17). Fuerza y peso que actúa en el hombro	49

Figura (3-18). Opciones de rodamientos SKF para el eje del motor [63]	51
Figura (3-19). Selección del rodamiento y sus datos técnicos [63].....	52
Figura (3-20). Opciones de rodamientos SKF para los brazos del exoesqueleto [63]	53
Figura (3-21). Selección del rodamiento brazo exoesqueleto y sus datos técnicos [63].	53
Figura (3-22). Simulación Esfuerzo Von Mises Eslabón Hombro.....	54
Figura (3-23). Simulación Desplazamientos Eslabón Hombro	54
Figura (3-24). Simulación Factor de Seguridad Eslabón Hombro	55
Figura (3-25). Simulación Base motor	57
Figura (3-26). Eje flexible [66].....	62
Figura (3-27). Diagrama Piñón-corredera	62
Figura (3-28). Diagrama Piñón-corredera vista lateral.....	62
Figura (3-29). Diagrama Diámetro primitivo del diente	62
Figura (3-30). Trazado para determinar el ángulo de hélice [67].....	64
Figura (3-31). Engranaje Cónico helicoidal [68].....	65
Figura (3-32). PLX DAQ_R2 EXCEL	69
Figura (3-33). Diagrama de conexiones de fases: De percepción y procesos de datos...	70
Figura (3-34). Diagrama de flujo funcionamiento Parte 1.	71
Figura (3-35). Diagrama de flujo funcionamiento Parte 2.	72
Figura (4-1). Proceso de Estereolitografía de piezas	74
Figura (4-2). Estereolitografía de base principal x	75
Figura (4-3). Estereolitografía soportes para rodamientos	75
Figura (4-4). Estereolitografía soporte bisagra.....	75

Figura (4-5). Estereolitografía soporte cabeza	76
Figura (4-6). Estereolitografía soporte servomotor	76
Figura (4-7). Estereolitografía base caja reductora	76
Figura (4-8). Estereolitografía caja caja reductora	77
Figura (4-9). Doblado estructura de mochila exoesqueleto.....	77
Figura (4-10). LBC de piezas	78
Figura (4-11). LBC de piezas (Base Espalda, Eslabones brazo).....	78
Figura (4-12). LBC de Cuchilla.....	79
Figura (4-13). Recubrimiento Eslabón Hombro.....	79
Figura (4-14). Recubrimiento Eslabón Codo	80
Figura (4-15). Recubrimiento Espaldar mochila	80
Figura (4-16). Soldadura puntos estructura de mochila	81
Figura (4-17). Soldadura base motor.....	81
Figura (4-18). Soldadura eje motor	81
Figura (4-19). Ensamble conjunto base exoesqueleto	82
Figura (4-20). Ensamble conjunto brazos exoesqueleto.....	82
Figura (4-21). Ensamble conjunto circuito eléctrico	83
Figura (4-22). Adquisición de datos de entrada y salida del sistema	84
Figura (4-23). PLX-DAQ_R2 de Excel.....	85
Figura (4-24). Gráfica señal controlada del hombro	87
Figura (4-25). Gráfica señal tiempo de establecimiento del hombro	87
Figura (4-26). Ecuación del Compensador del hombro	88

Figura (4-27). Gráfica señal controlada del codo	89
Figura (4-28). Gráfica señal tiempo de establecimiento del codo.....	90
Figura (5-1). Flexión del Codo	93
Figura (5-2). Flexión del Hombro	93
Figura (5-3). Extensión del codo y del hombro.....	94
Figura (5-4). Movimiento de flexión del codo 30°	96
Figura (5-5). Movimiento de flexión del codo 60°	96
Figura (5-6). Movimiento de flexión del codo 90°	97
Figura (5-7). Movimiento de flexión del codo 110°	97
Figura (5-8). Movimiento de flexión del hombro 30°	99
Figura (5-9). Movimiento de flexión del hombro 50°	99
Figura (5-10). Movimiento de flexión del hombro 75°	99
Figura (5-11). Movimiento de flexión del hombro 120°	100
Figura (5-12). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado.....	101
Figura (5-13). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista posterior	101
Figura (5-14). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista lateral izquierda.....	102
Figura (5-15). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista lateral derecha	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medidas antropométricas de la población ecuatoriana (2017) [33]	16
Tabla 2 Masa fragmentar con referencia a la masa total del cuerpo para usuario de 90 [kg].	17
Tabla 3 Identificación de necesidades	27
Tabla 4 Jerarquización de Necesidades	27
Tabla 5 Grado de Importancia respecto a las necesidades	28
Tabla 6 Importancia relativa respecto a las necesidades	28
Tabla 7 Necesidades del cliente y su importancia relativa	28
Tabla 8 Módulos para el diseño.....	29
Tabla 9 Módulo 1 (Peso, Construcción).....	29
Tabla 10 Módulo 2 (Potencia).....	30
Tabla 11 Módulo 3 (Mecanismo de montaje)	30
Tabla 12 Módulo 4 (Sistema de transmisión).....	30
Tabla 13 Propiedades químicas Acero estructural ASTM A-36 [48]	31
Tabla 14 Propiedades mecánicas Acero estructural ASTM A-36 [48]	32
Tabla 15 Propiedades resina Tough 2000 [49]	32
Tabla 15 Medidas antropométricas en posición de pie trabajadores industriales sexo masculino 18 a 65 años con percentil 5 [60].	43
Tabla 16 Características técnicas del servomotor MG9964R [62].....	51
Tabla 17 Resultados de la simulación datos técnicos.....	55
Tabla 18 Resultados de la simulación	56

Tabla 19_Simulación Resultados base motor.....	58
Tabla 20_Porcentaje de levantamiento de cargas del cuerpo humano.	59
Tabla 21_Muestra radios del tallo del fruto de la africana [mm]	60
Tabla 22_Datos técnicos del motor marca élite [65].....	61
Tabla 23_Características técnicas selección de cables	69
Tabla 24_Sensor y Actuador por implementar.....	70
Tabla 25_Secuencia de construcción del exoesqueleto.....	73
Tabla 26_Rango de Movimiento Flexión.....	92
Tabla 27_Rango de Movimiento Extensión	94
Tabla 28_Rango de Movimiento Flexo-extensión codo	95
Tabla 29_Rango de Movimiento Flexo-extensión hombre	98
Tabla 30_Datos Experimentales del sistema de corte del fruto de palma africana	100
Tabla 31_Datos Experimentales del tiempo de ejecución del corte.....	101
Tabla 32_Materiales Comerciales Ferreteros	104
Tabla 32_Materiales Normalizados.....	104
Tabla 34_Materiales sistema eléctrico	105
Tabla 35_Costos de mecanizado y recubrimiento de piezas	105
Tabla 36_Costos Otros	105
Tabla 37_Costos totales.....	106
Tabla 38_Flujo de caja.....	106

RESUMEN

El presente desarrollo de un dispositivo tecnológico intitulada “Diseño y construcción de un sistema de corte de fruto de Palma Africana”, está destinado al campo técnico, social y palmicultural. Es un sistema conformado por un exoesqueleto pasivo para extremidades superiores con dos grados de libertad. El cual ayuda al usuario a mantener la posición y tiene la capacidad de reducir una cierta fracción de actividad muscular de los brazos al momento de realizar el corte. Para el diseño del exoesqueleto se tomó en cuenta la normativa de el instituto ecuatoriano de normalización NTE INEN-ISO 7250-1, como también el Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo.

El prototipo fue elaborado con componentes y materiales tanto mecánicos como eléctricos que son de fácil adquisición en el mercado ecuatoriano enfocado en las medidas antropométricas latinoamericana y la biomecánica humana, para el diseño mecánico se realizó simulaciones de elementos finitos para análisis estáticos de los elementos en Inventor. Para el diseño del sistema eléctrico de control se implementó la identificación de la planta con apoyo del software Matlab para determinar la función de transferencia que describe el comportamiento del sistema y además determinar los parámetros del controlador PID que se implementa en Arduino. Con los parámetros de diseño se determina la posición y orientación del exoesqueleto que permita que el operario realice la actividad de cosecha de palma africana en un entorno ergonómico respecto a su postura de corte, además que es un prototipo de fácil montaje que permita el movimiento agradable del operario.

Palabras Clave: Exoesqueleto, Palma Africana, Antropometría, Biomecánica, Ergonomía.

ABSTRACT

The present development of a technological device entitled "Design and construction of a system for cutting African Palm fruit", is intended for the technical, social and palm cultivation field. It is a system made up of a passive exoskeleton for upper limbs with two degrees of freedom. Which helps the user to maintain the position and has the ability to reduce a certain fraction of muscular activity of the arms when making the cut. For the design of the exoskeleton, the regulations of the Ecuadorian standardization institute NTE INEN-ISO 7250-1 were taken into account, as well as the Regulations on safety and health of workers and improvement of the work environment.

The prototype was made with both mechanical and electrical components and materials that are easily available in the Ecuadorian market focused on Latin American anthropometric measurements and human biomechanics. For the mechanical design, finite element simulations were performed for static analysis of the elements in Inventor. For the design of the electrical control system, the identification of the plant was implemented with the support of Matlab software to determine the transfer function that describes the behavior of the system and also determine the parameters of the PID controller that is implemented in Arduino. With the design parameters, the position and orientation of the exoskeleton are determined, which allow the operator to carry out the African palm harvesting activity in an ergonomic environment with respect to its cutting posture, in addition to being an easy-to-assemble prototype that allows pleasant movement. of the operator.

Keywords: Exoskeleton, African Palm, Anthropometry, Biomechanics, Ergonomics.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problema de Estudio

El cultivo de palma aceitera progresa de forma continua, y se convierte en el segundo producto perenne más próspero del Ecuador es parte del sector económico del país así como del sector empleador, esto gracias a su demanda de fabricación y sus derivados, en la área de cosecha de este producto casi siempre, los trabajadores olvidan frutos en la palma por la conflicto de lograr un corte limpio y no dañar a la plantación lo que representa un formidable esfuerzo, ya que la maniobra es dirigida por el cosechador, mas no de la máquina [1] . Las herramientas existentes son una cuerda para trepar la palma, y un cuchillo para cortar las ramas y frutos; o una hoz al final de un palo largo. Actualmente el mercado ofrece una cosechadora de palma a motor de 2 tiempos de 1.2 HP con un poste de amplificación de 3 metros.

Debido a este problema se realizará el diseño y construcción de un sistema de corte para fruto de palma africana que será dirigido a proteger la vida del usuario, aumentar la producción de cosecha y alargar la duración de consumo, donde el operario efectúe menos esfuerzo en la actividad con un producto con mayor versatilidad.

JUSTIFICACIÓN

Según [2], en el Ecuador, el rubro de la palma aceitera es de alta relevancia de valor económico para el sector agropecuario, su peso específico en el PIB Sectorial (agrícola) es de 4,53% y en el PIB total 0,79% de acuerdo con [3], a la actividad de palmicultura se dedican 7.000 agropecuarios (UPAs), 87% quienes la mayoría posee superficies inferiores a 50 hectáreas.

Se compara el impacto de la producción de aceite de palma en las exportaciones no tradicionales, demostrando la gran relevancia de estas exportaciones sobre PIB como generadora de plazas de empleo.

Es por ello por lo que es muy importante incrementar herramientas automatizadas en esta área de cosecha, que permitan un incremento en la producción, mientras se reducen costos laborales en la industria de la Palma aceitera y lo más importante brindar una mejor calidad de vida al operario reduciendo su esfuerzo y aumentando su producción en una máquina menos costosa que puedan adquirir pequeñas, medianas y grandes industrias para el mejoramiento de este proceso de cosecha.

GRUPO OBJETIVO

Las personas que intervienen en la cosecha, así como las empresas dirigidas al sector palma de aceite y sus empleados en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de corte para fruto de palma africana.

Objetivos Específicos

- Analizar la información obtenida a través de las encuestas y las referencias bibliográficas para la selección de los materiales a utilizar en la máquina y sus costos.
- Calcular los elementos del sistema mecánico y electrónico de la máquina apoyado con software inventor y Arduino.
- Construir la máquina que cumpla con las especificaciones definidas en el diseño para la realización de las pruebas in-situ y la verificación de su funcionamiento.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se estudiará al entorno palma africana, normativas y desarrollo de los exoesqueletos industriales en el mercado, así como el estudio de la biomecánica respecto a la flexo-extensión del codo y del hombro, al igual que las medidas antropométricas para el diseño y construcción del exoesqueleto.

1.1 Antecedentes de la Palma Africana

El origen de la palma aceitera según documentos históricos son plantaciones de origen africano, se ha descubierto polen fósil en la misma cantidad del Mocuénio como el Delta del río Níger, que tiene propiedades análogas al polen de la palma africana. Esta realidad concibe suponer que las plantaciones han existido en África Occidental desde épocas antes de Cristo.

En algunos otros documentos históricos establecen que la palma aceitera es oriunda de América, no obstante, no se descarta que haya sido introducida a este continente en épocas precolombinas, otras documentaciones describen un árbol que produce nueces rojas de tamaño pequeño en época del descubrimiento de Nueva Guinea, entre los años 1400-1600 después de Cristo afirman orígenes africanos mencionando huertos de palma aceitera al Norte de la costa de Liberia y en Nigeria [4].

Según [5], en el Ecuador las primeras plantaciones de cultivos de palma aceitera se originan en el año 1953, con plantaciones en el Km. 37 de la vía Santo Domingo-Quinindé. En 1970, algunos palmicultores visionarios pudieron formar ANCUPA, una asociación cuyo objetivo principal era servir a los palmicultores.

“En febrero de 1994 el Ecuador ejecuta sus primeras exportaciones de aceite de palma, concretando un volumen de 6.400 toneladas anuales exportadas, marcando de esta forma, un inmediato en la contribución de la cadena productiva del aceite de palma a la economía del país” [5].

La producción de la palma aceitera se convierte en el segundo cultivo más grande del Ecuador encontró fenomenales condiciones para prosperar, los maravillosos beneficios ambientales, sociales y económicos de este cultivo oleaginoso.

1.2 Racimos y Frutos

El racimo tiene varias formas. Frecuentemente tiene medidas de 35 cm de grosor por 50 cm de longitud. La cantidad de frutos procedentes en cada racimo se modifica con la edad y con el material hereditario. Su peso varía de 2 a 3 kg en palmas jóvenes y puede alcanzar hasta 100 kg por racimo en plantaciones adultas [6] .

Los elementos que se relacionan con la producción de cada periodo anual y esto es respecto al peso promedio total y a la cantidad de racimos cosechados. El porcentaje de extracción de aceite componen la utilidad total por hectárea. La cosecha en la palma es durante todo el año, es recomendable manejar cierta información vital acerca de: frecuencia de cosecha, maduración correcta y controles de cosecha [7] .

Normalmente no siempre los frutos de palma maduran al mismo tiempo, por eso, es importante crear criterios precisos para determinar la época de cosecha, está en relación con la edad de la planta y condiciones de clima de acuerdo con el siguiente repertorio:

- En plantaciones de 3 a 4 años en estación lluviosa se tiene 5 días de cosecha y en época seca 7 días de cosecha.
- En plantaciones de 5 a 8 años 7 días de cosechas en estación lluviosa y 10 días en época seca.

- En plantaciones de 9 a 15 años en la época lluviosa se cosecha 9 días y 13 días en la época seca.
- Para plantaciones mayores a 15 años 15 días de cosecha en época lluviosa y 20 días en época seca.

Estas plantaciones tienen períodos de cosecha de diez a doce días, con diversas variaciones extendiendo este período hasta veinte días en unas parcelas. El número de operadores que integran a un lote está definido por variables tal como la temporada, lote próximo, antigüedad del fragmento, período de cosecha, conjunto de frutas disponibles, etc. Los operadores comunican a un supervisor de tripulación. En las palmeras jóvenes, el instrumento para el corte de la uva es el Podón o Palín.

1.3 Palma Africana en la Amazonía

En el estudio [8], publicado en mayo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que, después de examinar datos de 46 países tropicales que generan actividad agrícola productiva a gran escala, así también el cultivo de soya y de palma aceitera induce el 40 % de la tala de bosques en determinadas regiones.

Esto quiere decir que existe una gran variedad de hectáreas de plantaciones de palma africana muy considerables en la Región Amazónica, por lo tanto, se trata de aumentar la producción sin incrementar la deforestación.

En los últimos años, los pueblos Cofán, Siona-Secoya y Quichua se han sentido amenazados por la existencia de plantaciones de palma y están preocupados por las plantaciones de palma y por los planes para expandir enormemente esta agroindustria en su región.

Según la revista Cultura Suvival [9], los pueblos indígenas, apoyados por varias organizaciones indígenas, acusan de etnocidio a la creciente industria del aceite de palma.

En este sentido, refiriéndose a los diferentes pesticidas que utilizan en las plantaciones que son extremadamente tóxicos y entran fácilmente en los arroyos y ríos cercanos a través de la escorrentía de una vasta red de zanjas a lo largo de estas plantaciones, entre los más peligrosos incluyen endrin, aldrin, dieldrin [9] . La calidad de ríos cercanos a estas plantaciones se deteriorará aún más siendo no apto para el consumo humano debido a los desechos esparcidos por los extractores de aceite de palma.

Cuando se talan los bosques para estas plantaciones, las poblaciones de vida silvestre disminuyen debido a la pérdida de hábitat. Aunque esto no se encuentra estadísticamente documentado, existen fuertes razones para sospechar la extinción de algunas especies debido al alto grado de endemismo de plantas y animales en el área y sus alrededores [10]. Concluyendo que aumenta el deterioro del medio ambiente una vez que se han plantado las plántulas de aceite de palma.

Por otro lado, a nivel mundial las mujeres de África Occidental resguardan el aceite de palma africana tradicional según FAOSTAT [11]:

Una ventana al entorno de la elaboración artesanal de aceite de palma liderada por mujeres, una realidad que a menudo se vuelve invisible en las narrativas del aceite de palma industrial global. Este modelo está atentando por el rápido adelanto de los plantíos industriales, los acuerdos de autónomo comercio y los vínculos de valor vigilados por las empresas a costa de los sistemas alimenticio-sindicales.

Esta metodología que practican los campesinos conocida como agroecología, sobre la elaboración de aceite de palma tradicional no dirigida a una inversión lucrativa local basado en forma vital de la cultura. Afirman que el problema está liderado en el desarrollo de palmas de aceite de alto beneficio y las nuevas metodologías de procesamiento, que convirtieron el líquido rojo tradicionalmente viscoso en un aceite incoloro e inodoro apto

para los mercados mundiales, forjaron que las plantaciones de palma de aceite sea una transformación lucrativa. En los últimos años, el esparcimiento se ha dirigido a África con fuerza [11]. Numerosas empresas y entes de promoción han destacado sus marcas negativas, incluso la deforestación, el deslizamiento de comunidades, las circunstancias de trabajo deplorables, la diversión de los monocultivos, el deterioro de la biodiversidad y la alteración del clima.

1.4 Variedad de Palma africana

El coco (*Cocos nucifera*), la palma africana (*Elaeis guineensis*) y la palmera datilera (*Phoenix dactylifera*) son las tres principales especies de cultivos de la familia Arecaceae para las que recientemente se dispone de secuencias genómicas [12]. Tienen mayor rendimiento de aceite/ha. La primera siembra fue en San Salvador en el estado de Bahía, donde se ha mantenido silvestre hasta nuestros días. Existen diversas tipologías según el espesor del fruto:

1.4.1 Palma africana Pisífera (P x P)

Palmas cuyos frutos usualmente tienen cartílago blando, no posee interés comercial, se define por la distancia de endocarpio y en momentos presenta una almendra [13]. Pisífera generalmente se describe como hembras estériles, los cruces de duramadre de tipos pisífera originan un tercer tipo tierno [14].

1.4.2 Palma africana Dura (D x D)

Se plantó hasta la década de los 60, se define por tener un enorme cuesco de 2 a 8 milímetros de espesor, no son rentables y competitivas [14].

1.4.3 Palma africana Tenera (D x P)

Es una plantación híbrida procedente del cruce artificial controlado de palmas de la variedad de Dura por Pisífera, el tallo del fruto es más delgado y el porcentaje de fruta es

mayor. Por ende, el componente de aceite es abundante por lo que ofrece una materia prima comercial de 30 % del peso del racimo en plantaciones de 20 - 30 años [15] .

Tipo según el color de fruto:

1.4.4 Racimos nigrescens

Son racimos jóvenes de color morado oscuro a negro y rojo baldosa en estado de madurez.

1.4.5 Racimos virescens

Son racimos jóvenes de color verde aceituna y cuando fructifican son anaranjado-rojizo claro.

1.5 Cosecha y manejo en postcosecha

1.5.1 Planificación

La cosecha y la carga de racimos y frutos se debe mantener los cercos limpios de malezas para facilitar la cosecha de racimos y frutos lo que se traduce en ahorros de mano de obra, a su vez, se debe transportar alrededor de las 24 horas posteriores del corte del racimo evitando estropear los racimos y para minimizar el incremento del porcentaje de acidez del aceite y pérdida de peso para ofrecer al mercado un mejor producto de calidad.

La persona encargada de la cosecha y la postcosecha debe tener excelentes condiciones sanitarias, al igual que el número de personas para llevar a cabo esta acción. Los elementos de cosecha como cestos, utillajes, entre otras. Las infraestructuras manipuladas para cosecha y postcosecha deben estar sin malezas y asépticas. El transporte debe ser adecuado dependiendo el volumen de los frutos.

Según [16] , generalmente, las plantas se siembran en parcelas de palma aceitera separadas a 9 m (escalonadas), creando un triángulo equilátero con la idea de dispersar 143 palmas por hectárea. Es decir, tiene un ángulo de 60 grados entre palmas y cuando

se traza sobre una palma una línea centinela perpendicular a la línea de palmas, no se localiza palma.

1.5.2 Cosecha

Las metodologías de recolección deben ser adecuados, siempre y cuando se conserve las tipologías del producto y evitando perjuicios superficiales, la cosecha figura el 25 al 30 % de los costos de operación del cultivo, está muy afín con el control de calidad [14].

Se realiza entre 8-12 días esto depende de la diversidad y edad de la plantación.

1.5.3 Parámetros de Cosecha

Se verifica la zona de cosecha, considerando los tendidos eléctricos. Se busca la fruta palma a palma. Se observa una escapatoria en caso de emergencia y se ubica lejos de la caída del racimo o de la hoja [17] . Para realizar el corte del fruto, se tiene en cuenta los parámetros de cosecha, los frutos deben sufrir un corte natural y el color sea como los detallados, no corte fruta verde. Si existe un titubeo, se desiste. Prontamente del corte, se engancha la herramienta “malayo” a la palma.

Se arrincona el peine salvaguardando las manos con protección adecuada para evadir espinarse. Se distribuye las hojas en las calles de recolección y conductos. Se poda la “pata” al ras del racimo preferible en forma de v.

Para realizar el corte depende mucho de las edades de la plantación para establecer la ubicación y posición del operario con respecto a la planta se debe realizar ciertas observaciones.

En el caso de plantaciones menores de 4 años el operario siempre debe ubicar los racimos maduros observando en los platos de las palmas si se encuentra fruto suelto al ubicar el racimo maduro donde establezca en las plantaciones la filotaxia de la palma, es la dirección en que van saliendo las hojas, hay palmas que son de filotaxia derecha e izquierda, con este término se encarga de dar el sentido de corte de la hoja al momento

de la cosecha o de la poda, siempre se debe ubicar al contrario de la filotaxia y lateralmente respecto al racimo maduro [17].

En el caso de plantaciones entre 4 años a 8 años el operario de corte debe ubicar los racimos maduros de igual manera establece la filotaxia de la planta, y se ubica al contrario de la misma y lateralmente del racimo, en este caso, son plantaciones mucho más altas por lo que se debe cortar las hojas que estén sosteniendo el racimo a cortar, y en caso que sean plantaciones menores a 3 metros, siempre se cortará la última hoja con respecto al suelo de la planta dejando el pedúnculo lo más corto posible sin cortar otros tejidos de la palma [17].

Para plantaciones mayores de 8 años se realiza el mismo proceso, pero se debe tener en cuenta la dirección de caída del racimo para ello debe ubicarse fuera del plato de la planta y buscar un ángulo adecuado de corte siguiendo los mismos lineamientos antes mencionados, siempre estar con precaución para impedir posibles sucesos en el proceso de corte del fruto [17].

En todos los puntos se debe realizar el encallado de hojas y alistamiento de racimos, el operario de cosecha luego de realizar el corte debe realizar el inflado de las hojas y alistamiento de los racimos de la siguiente manera diríjase a las hojas cortadas anteriormente y córtelas a la mitad, levante las hojas arqueando las piernas y conservando la espalda recta ubique la base de la hoja parte espinosa entre las palmas y la parte de la hoja restante ubique las de forma cruzada en la calle de cosecha, en caso que la hoja caiga en la calle de calera ubicarla allí evite pasar sobre las hojas que estén mal ubicadas [17].

1.6 Equipos, utensilios y herramientas

Las herramientas son diseñadas considerando la edad y altura de la plantación, es recomendable el uso de una estructura (podón o palín) conformada por una lámina cortadora de 7 a 10 cm de ancho por 20 cm de largo, adheridas a un mango de hierro [18].

Deben estar en excelentes condiciones, correctamente evaluados para su fin determinado; luego de realizar una conveniente limpieza y esterilización para certificar la calidad en los procesos las cosechas se realizan entre los 32-34 meses de edad de sembrada la palma aceitera [19].

1.7 Máquina semiautomatizada

Actualmente el mercado ofrece una cosechadora de palma con un motor de 2 tiempos de 1.2 HP con un poste de amplificación de 3 metros. Aun así, existe un esfuerzo para el cosechador que la maniobra al igual que el método tradicional [20] .

1.8 Método Tradicional

Uno de los métodos de la cosecha de su fruto, donde el cosechador encuentra un fruto maduro, manipula la hoz en torno al racimo y lo corta de un golpazo hacia abajo con la hoz. A menudo, olvidan fruto en la palma porque es difícil de lograr un corte limpio o por no realizar un daño a la palma.

1.9 Producción de cosecha

Un cosechador promedio puede recolectar en las plantaciones de palma alrededor de 80 a 100 palmas diarias, dependiendo de la altitud, topografía, época y cosecha de palma, la eficacia de cada sistema, en general, depende de la plantación a otra respecto a su subestructura física y de la habilidad del cosechador [21] .

1.9.1 Riesgos ergonómicos en la cosecha de Palma Africana

La Ergonomía como “el estudio científico de los elementos humanos en relación con el ambiente de trabajo y el boceto de los equipos (máquinas, sitios de trabajo, etc.)” [22].

El esfuerzo físico es un fragmento esencial de la acción laboral, en la cosecha de Palma Aceitera, en la mayoría de las áreas se encuentra este sobreesfuerzo laboral, especialmente en el proceso de corte del fruto que afecta especialmente Espalda-Cuello produciendo síntomas como dolencia por contractura muscular, malestar radicular por presión nerviosa, parálisis, atrofia muscular. Se producen dos tipos de lesiones, unas agudas-fuertes y otras crónicas de alta duración [22].

Las iniciales están producidas por un esfuerzo rápido que puede producir una fractura estructural y eficaz (fisura de tendón...). Las secundarias son resultado de un esfuerzo seguido, provocando falencias y disfunciones progresiva (tendinitis...) [22] .

Por otro lado, el esfuerzo de los hombros-codos son problemas que surgen específicamente cuando el esfuerzo mecánico destaca la capacidad de carga de los elementos del sistema músculo esqueléticos (huesos, coyunturas, músculos, tendones, nervios, vasos). Esto es muy notorio en el sistema de corte tradicional conocido como “Amalayo”, el cosechador ocupa su fuerza humana para poder realizar el corte del fruto, muchas de las veces en una mala postura afectando directamente a la columna vertebral.

Valoración de criterios de peligro ergonómico en plantaciones de palma aceitera según [23] , indica que la acción agrícola en los países en progreso muestra una sucesión de problemas de los criterios con relación a riesgos ergonómicos que perturban a los cosechadores, en los cuales 97,5 puntos de trabajo representan condiciones de riesgo para la aparición de los trastornos de músculo esqueléticos; La principal causa de tratamiento médico en los centros de salud se debe a la presencia de mialgias, dolores de espalda,

dolores musculares, articulares y de espalda, principalmente en mano de obra que ejecutan actividades de cosecha y mantenimiento.

Esto indica que las diligencias afines con la pamicultura son una ardua ocupación física y esto ubica a los cosechadores en peligros potenciales como osteoartritis de cadera, rodilla, lumbalgia, dolencia de cuello y miembros superiores debido a trabajos pesados, repetitivos y forzados, dolorosos e incómodos posturas, estos cambios pueden simbolizar una de las principales raíces de ausencias laborales e implican costos considerables para el trabajador durante su vida laboral. Por ende, las posturas en el desarrollo de las actividades son de gran importancia en la ergonomía y salud ocupacional.

El trabajo de cosechar envuelve pesos posturales en las áreas estimadas por los métodos de REBA, ya sea para posturas o inclinaciones, manejo de cargas, fuerzas de diferentes tamaños y agarre; descubrir que los brazos están sometidos a un máximo estrés físico, influenciado por la loma de la palma, lo que quebranta negativamente en la presentación de TME a ras del tronco en las zonas lumbar y dorsal [24] .

Las personas que, durante el desarrollo de su labor, realizan la recolección del fruto de la palma aceitera, patrocinan heterogéneas posturas y realizan movimientos repetitivos, e inclusive realizan operaciones de manejo de cargas que se modifican según las tipologías del lugar y la naturaleza del trabajo. Cortar la fruta, podar cada planta o recoger y almacenar el producto puede provocar trastornos musculares y / o esqueléticos.

1.10 Los exoesqueletos industriales

El impacto de los robots cooperativos en la rehabilitación de extremidades y/o la asistencia permanente con exoesqueletos robóticos es un sistema mecatrónico que involucra una combinación de varias disciplinas. Una de las áreas de aplicación más conocidas de los robots colaborativos es en el sector industrial, está promoviendo interés

por su aplicación en el diseño de prótesis para personas que han perdido una extremidad, la tele manipulación con destreza es una aplicación de tecnología muy deseable en la actualidad. Estas investigaciones tienen como objetivo extender el impacto de los robots colaborativos en la rehabilitación de extremidades y/o soportes permanentes a través de la interacción paciente-exoesqueleto.

Se puede definir que un exoesqueleto es esencialmente como un prototipo para ser implementada sobre el cuerpo humano a modo de vestimenta, como se traduce del término inglés “wearable robots”, que se usa como soporte y sirve para apoyar las inclinaciones y/o potenciar las capacidades del cuerpo humano [25].

1.10.1 Aplicación de los exoesqueletos

Los exoesqueletos pueden implementarse para diferentes aplicaciones: Amplificadores de potencia, dispositivo para realimentación hepática y fuerzas, rehabilitación y entrenamiento motor; estudio e investigación [26] .

1.10.2 Tipos de exoesqueletos industriales

a. Titan Arm (2013)

Se trata de un exoesqueleto desarrollado por la Universidad de Pennsylvania, para el levantamiento de pesas, esta extremidad robótica es eficiente y liviana, de ocho kilogramos y capaz de levantar hasta 18 kilogramos de peso sin mucho esfuerzo este se muestra en la Figura (1-1). [21].



Figura (1-1). Exoesqueleto Titan Arm [21].

b. Exoesqueleto EksoVest de Ford (2017)

Es un exoesqueleto auxiliar del cuerpo humano que ofrece asistencia a la mano de obra en una línea de montaje al realizar su trabajo de manera más eficaz y tiene como base disminuir la fatiga y las lesiones del trabajo, es un equipo muy liviano que por medio de actuadores se eleva y mantiene los brazos del usuario que miden entre 1,52 a 1,95 metros y tiene una cantidad de asistencia alrededor de 3 a 7 kilogramos por brazo lo que ayudo a reducir el valor físico [27] como se muestra en la Figura (1-2).



Figura (1-2). Exoesqueleto Titan Arm [27]

c. Robo Mate (2017)

Es un exoesqueleto creado en la empresa francesa de reciclaje Indra con el patrocinio de Fiat y organismos oficiales de la Unión Europea, este exoesqueleto fue destinado a desguazar vehículos en el sector de reciclaje automovilístico para aumentar al operario fuerza muy superior y que pueda multiplicarse por diez. El usuario puede manipular

cargas de 15 kilogramos sin el mínimo esfuerzo muscular y articular. Este prototipo mejora las condiciones laborales del trabajador [22] como se muestra en la Figura (1-3).



Figura (1-3). Exoesqueleto Titan Arm [23].

1.11 Antropometría

1.11.1 Generalidades

De acuerdo con las necesidades de diseño ergonómico y a los estándares de la población a la que se aplicará el exoesqueleto es fundamental contar con datos antropométricos.

La antropometría es la norma que representa medidas cuantitativas del cuerpo humano y analiza las dimensiones tomando en cuenta la referencia de las arreglos anatómicas, es decir, asiste a las características físicas de una persona o grupo, y se utiliza como instrumento para que la ergonomía se adapte al medio ambiente para el ser humano [30].

1.11.2 Medidas antropométricas implementadas en el exoesqueleto

a. Longitud de Espalda

Distancia horizontal de los sitios más laterales del brazo (proyección máxima deltoidea) con el miembro superior extendido hacia adelante es la distancia B que se muestra en la Figura (1-4) [31] .

b. Longitud hombro-codo

Esta es la longitud del brazo superior, también se conoce como longitud radial y es la distancia o medida obtenida desde la marca acromial 15 (hombro) hasta la marca radial (codo) distancia C de la Figura (1-4) [26].

c. Longitud codo a las puntas de los dedos

Distancia horizontal desde el dorso del tercer dedo (medio) de la mano. Antebrazo flexionado en ángulo recto (90°) mano y dedo extendidos distancia D que se muestra en la Figura (1-4) [25].

d. Estatura total o longitud normal

Es la distancia longitudinal entre el horizontal (zona de sustentación) y el ápice (superior y más destacado de la cabeza). Esta medida se determina con la persona en postura erguida, con las extremidades superiores a cada parte del cuerpo humano, palmas y dedos rectos y extensos hacia abajo, mirando hacia adelante, erguida, con el peso uniformemente repartido en ambos pies, distancia A tal se muestra en la Figura (1-4) [31].

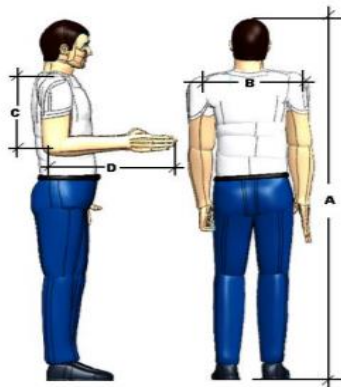


Figura (1-4). Medidas antropométricas [31]

1.11.3 Datos Antropométricos de la Población

En el boceto de un exoesqueleto se debe tomar en cuenta las dimensiones antropométricas de la población, debido a que este es un equipo que se monta como una prenda de vestir en las extremidades superiores del cuerpo humano.

Para su diseño se usaron medidas estándares promedios, sin embargo, Ecuador no cuenta con datos oficiales sobre estas dimensiones antropométricas del trabajador, pero se cuenta con investigaciones científicas de varias Universidades del país de las medidas antropométricas del trabajador y las cuales se usaron para guiar al diseño del exoesqueleto.

En las medidas antropométricas de la población ecuatoriana del trabajador donde se encuentra especificado las medidas convenientes para el desarrollo del exoesqueleto como se muestra la Tabla 1

Tabla 1

Medidas antropométricas de la población ecuatoriana (2017) [33] .

N.º	Medidas	5º	50º	95º
1	Altura Normal	1,6225	1,7239	1,825
2	Altura Posición sentado normal	0,8472	0,8991	0,949
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	0,0132	0,0164
8	Longitud de Glúteo-rodilla	0,5119	0,5711	0,6302
9	Longitud glúteo-rodilla	0,4001	0,4636	0,5271
10	Longitud codo-codo posición sentado	0,3802	0,447	0,5138
11	Ancho de caderas posición sentado	0,315	0,3562	0,3975
12	Longitud Hombro-codo	0,3353	0,3632	0,3912
13	Longitud Codo-mano	0,4215	0,4608	0,5

Para el boceto se usaron la fila del percentil P95 ya que esto representa el porcentaje de personas de una muestra dada con un tamaño corporal igual o menor a una cifra definida,

en este caso el percentil P5 y P95 son más empleados para diseños ergonómicos, es decir, que se proyecta para un 90% de los usuarios. Los datos medidos están en unidades de metros [33].

1.11.4 Masa fragmentar con referencia a la masa total del cuerpo

Estos datos permiten estimar con precisión más de dimensiones antropométricas del cuerpo humano. Basado en los parámetros para cada segmento del cuerpo y la relación que determina la masa de cada segmento en correspondencia con la masa corporal total [34] como se muestra en la Tabla 2

Tabla 2

Masa fragmentar con referencia a la masa total del cuerpo para usuario de 90 [kg].

Segmento	Masa	CG
Cabeza y Cuello	10,95%	69,60%
Tronco	76,05%	57,05%
Brazo	3,90%	76,95%
Antebrazo y mano	3,45%	~
Antebrazo y mano	2,40%	58,44%
Brazo Completo	7,50%	~
Mano	1,05%	123,00%
Muslo	15,45%	55,79%
Pie	2,25%	67,35%

1.12 Biomecánica

La biomecánica estudia la mecánica aplicada al cuerpo humano, dogmatismo que estudia las fuerzas y los efectos de la aplicación [35]. Para el desarrollo del diseño del exoesqueleto a través de la biomecánica se define que para el esfuerzo de cargas es necesario que el exoesqueleto tenga dos grados de libertad las cuales emulan las articulaciones principales que son: hombro y codo en los movimientos del trabajador para el corte de palma africana actúan la flexo-extensión.

1.12.1 Biomecánica del hombro

El esqueleto del complejo de la articulación del hombro está formado por tres huesos primordiales: la clavícula, la escápula y el fémur. El omóplato forma parte de la clavícula, esta forma la articulación principal del dedo. El húmero es el brazo oscilante proximal del segmento superior [29]. El hombro posee 3 (GDL) lo que le permite situar el miembro superior en correspondencia con los tres planos del espacio, en base a tres ejes principales [37].

a. Flexo-extensión

Estos movimientos se verifican en el plano sagital, en torno al eje perpendicular [38] como se muestra en la Figura (1-5).

- Flexión: Movimiento de gran amplitud 180° también se puede definir como aducción de 180° que está cerca de la rotación longitudinal [31].
- Extensión: Movimiento de escasa amplitud, 45 a 50° .

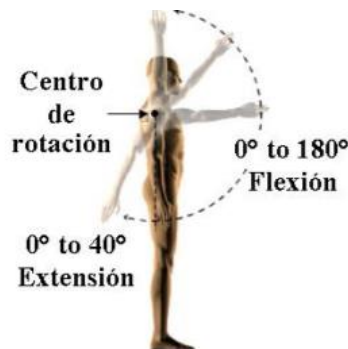


Figura (1-5). Movimientos del Hombro Flexo-Extensión [38]

1.12.2 Biomecánica del Codo

El movimiento de flexo-extensión del codo se efectúa por medio de un eje que pasa en el centro de la tróclea y del capitellum. El codo posee un valgo cercano a los 15° , es indudable en extensión y se corrige con la flexión [39] como se muestra en la Figura (1-6)

- Flexión: Amplitud de 145°, partiendo de la postura anatómica. El ángulo que se representa entre el brazo superior y el antebrazo al ejecutar la flexión es de 35° ($145^\circ+35^\circ=180^\circ$) [38] .
- Extensión: La extensión viaja nuevamente a 145° para alcanzar a la extensión completa. El ángulo desarrollado entre el brazo superior y el antebrazo en este caso es de 180° [40] .



Figura (1-6). Movimientos del Codo Flexo-Extensión [38]

1.12.3 La abducción

La abducción es el acto de separar la extremidad superior del cuerpo; se ejecuta en el plano frontal, alrededor de los ejes delantero y trasero [31].

La abducción presenta acciones musculares para el exoesqueleto las cuales se tiene: Posición anatómica y la abducción de 0° a 60° que se puede efectuarse únicamente en la coyuntura glenohumeral se muestra en la Figura (1-7) a continuación:

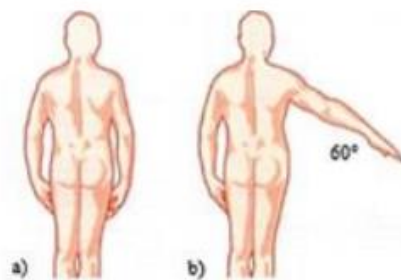


Figura (1-7). Movimientos del hombro abducción [38]

1.12.4 Efectos de manipulación manual de cargas

La manipulación manual de cargas muestra un riesgo potencial para la salud de los obreros. Aproximadamente el 20% de todas las lesiones de los obreros son causadas por un manejo incorrecto o excesivo de la carga habiendo particularmente habituales los trastornos musculoesqueléticos que perturban a la espalda [41] .

A continuación, se menciona los efectos más ilustres:

- Trastornos acumulativos debido al sistema musculoesquelético degradado gradualmente debido a las actividades continuas de levantar y bajar, por ejemplo, dolor de espalda [35].
- Traumatismos agudos como muescas o fracturas debidos a accidentes [42]

1.13 Normativas técnicas para manejo de cargas y antropometría

- **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. 20.
- **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**
(2017). Basic human body measurements for technological design -- part 1: body measurement definitions and landmarks. ISO 7250-1:2017.

CAPÍTULO 2

Análisis de alternativas

En este capítulo se desarrolla el análisis de alternativas y los diferentes módulos de diseño, se presenta la formulación a utilizar en los cálculos, así como los elementos a implementar en el sistema de control eléctrico.

2.1 Sistema de corte

Las necesidades que se toma en cuenta para el análisis de alternativas son: Tiempo del proceso de corte, costo de construcción, ergonomía de cargas de trabajo y postura para ello se realiza la selección de alternativas para lograr los objetivos deseados.

2.1.1 Alternativa 1 (Sistema de Corte).

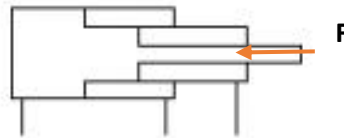


Figura (2-1). Vástago Telescópico

Ventajas: Duplicar o triplicar la carrera de elevación para la longitud del cilindro. Se pueden instalar sistemas de acción directa eliminando poleas, cables y paracaídas.

Espacio reducido, ideal para movimientos precisos.

Desventajas: La operación a baja velocidad no es suave porque existe el riesgo de pérdida de deposición debido al bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse cuando trabajan a niveles altos y tienen un límite en el tamaño con el que pueden trabajar.

2.1.2 Alternativa 2 (Sistema de Corte).

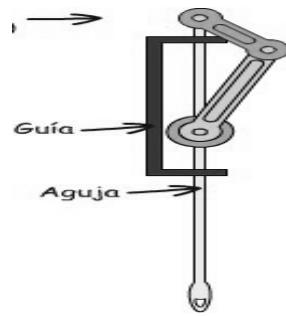


Figura (2-2). Máquina Biela-Manivela basado en el mecanismo de una máquina de coser [43].

Ventajas: Sistema e implementación sencilla. Corte preciso y con velocidad rápida, ocupa poco espacio.

Desventajas: La relación Biela-Manivela acerca del rendimiento y los elementos del motor, se concluye que la elección de este parámetro debe ser escrupulosa y se debe tener en cuenta la aplicación concreta del motor. Si busca la estabilidad de los elementos, necesita una relación biela-manivela alta para garantizar una baja demanda y fricción, sacrificando la eficacia térmica o no dependiendo del sistema de suministro de combustible.

2.1.3 Alternativa 3 (Sistema de Corte).

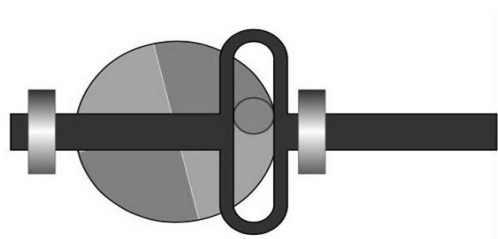


Figura (2-3). Máquina Mecanismo Yugo Escoses

Ventajas: Menos piezas móviles; operación más suave. Menor velocidad en los extremos y, por tanto, mayor tiempo de viaje cerca de los puntos (en el sentido de aceleraciones más pequeñas). Ocupa poco espacio y es un sistema económico.

Desventajas: El rápido desgaste de la ranura del yugo provoca fricción de deslizamiento y presiones de contacto. Pérdida de calor en el P.M.S.

2.1.4 Alternativa 4 (Sistema de Corte).

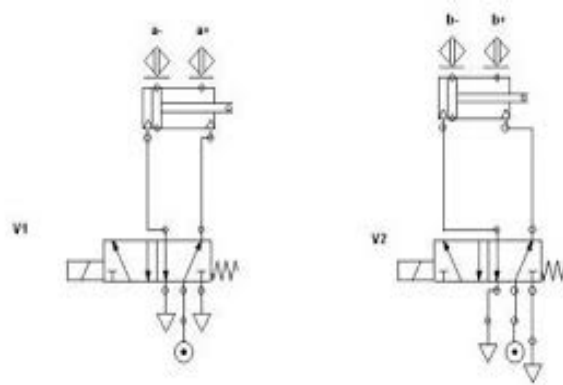


Figura (2-4). Máquina Cilindro Neumático [44]

Ventajas y Desventajas: Componente sencillo, de bajo coste y fácil de instalar; es correcto para producir movimientos lineales. La velocidad tiene un extenso margen de ajuste. Toleran condiciones desfavorables como alta humedad y ambientes polvorientos, y son de fácil limpieza. Una de las desventajas es que aumenta el sistema de aire comprimido.

2.2 Mecanismo para diseño del sistema de corte



Figura (2-5). Corte tradicional con malayo [45]

Según la Figura (2-5) el corte tradicional o con malayo es muy usual en la cosecha del fruto de la palma africana, y aún las utilizan en plantaciones muy viejas que tienen una altura mayor a los 8 metros, además la palilla que es un tipo diferente de cuchilla para plantaciones menores de 3 años.

2.2.1 Alternativa 1 (Mecanismo).

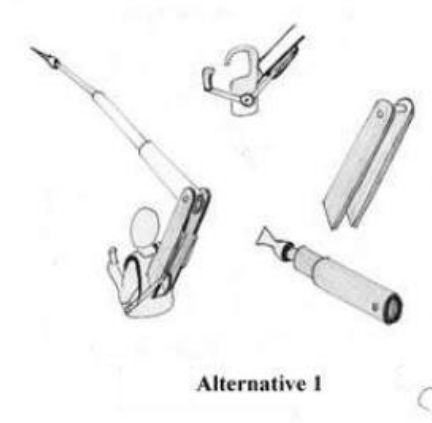


Figura (2-6). Corte con brazo mecánico [46]

Es un tipo de sistema desarrollado en un proyecto para el corte de fruto de palma africana como se muestra en la Figura (2-6).

2.2.2 Alternativa 2 (Mecanismo).

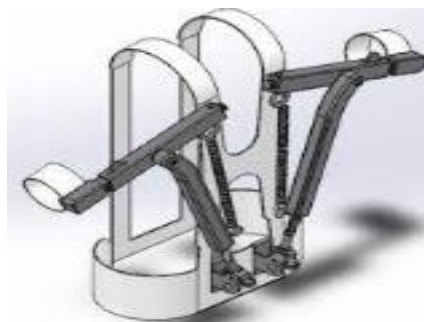


Figura (2-7). Exoesqueleto industriales

En la Figura (2-7) es un sistema muy innovador, la robótica en la aplicación de la biomecatrónica en los exoesqueletos para la automatización de los movimientos del cuerpo para reemplazar a los humanos de las repetitivas tareas y reducir esos esfuerzos y aumentar la resistencia a cargas.

2.2.3 Alternativa 3 (Mecanismo).



Figura (2-8). Cortadora Sthill pc 70 [47]

Es una máquina producida por la empresa Sthill y es un sistema de corte automatizado para el fruto de palma africana con un motor de 2 tiempos a gasolina como se muestra en la Figura (2-8).

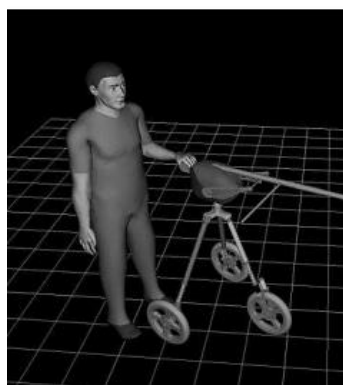


Figura (2-9). Sistema con ruedas para corte de fruto de palma africana [46]

En la Figura (2-9) es un diseño planteado por un proyecto para el mejoramiento de la manipulación del corte para el fruto.

2.3 Identificación de necesidades

Tabla 3

Identificación de necesidades

NECESIDADES	INTERPRETACIÓN
Que sea un equipo liviano	Materiales y elementos (Motor y sistema de transmisión)
Buena técnica para cosechar, corte limpio al racimo y hojas.	Diseño del mecanismo fácil movimiento. Considerar el mecanismo a implementar ya sea (Biela-manivela-cuchillas mochila exoesqueleto con motor espaldar) o (Cabezal de corte, poste y transmisión por cilindros)
Que sea de bajo costo	Motor más ligero y sistema de transmisión.
Que sea flexible ergonómico	Implementación de exoesqueleto de cargas y eje flexible
Que mejore la producción	Considerar mecanismo y técnica de corte. Mecanismo corte cuchillas.
Seguridad del operador	Considerar mecanismo y técnica de corte un sistema que no sea rígido.
De fácil operación y mantenimiento	Hoja Técnica

2.3.1 Jerarquización de Necesidades

Tabla 4

Jerarquización de necesidades

Necesidad más importante	Necesidad menos importante
1	8

Tabla 5

Grado de Importancia respecto a las necesidades

Grado de Importancia	Necesidad
1	Que sea de bajo costo
2	Buena técnica para cosechar, corte limpio al racimo y hojas.
3	Que mejore la producción
4	Que sea un equipo liviano
5	Seguridad del operador
6	Que sea flexible ergonómico
7	De fácil operación y mantenimiento
8	Agradable a la vista

2.3.2 Establecer la importancia relativa de las necesidades

Tabla 6

Importancia relativa respecto a las necesidades

Nota más baja	Nota más alta
1	5

Tabla 7

Necesidades del cliente y su importancia relativa

Necesidades del cliente	Encuestados		
	1	2	3
Que sea de bajo costo	5	5	5
Buena técnica para cosechar, corte limpio al racimo y hojas.	5	4	5
Que mejore la producción	5	5	5
Que sea un equipo liviano	4	3	4
Seguridad del operador	5	4	3
Que sea flexible ergonómico	4	3	3
De fácil operación y mantenimiento	4	4	3
Agradable a la vista	4	3	4

Según el análisis del grado de importancia de las necesidades y su interpretación, se deduce que las necesidades propuestas son relevantes para el diseño y construcción de la máquina que estará destinada a un sistema para fruto de palma africana, y tanto el costo, la ergonomía del operario y la técnica de corte son procesos que están aún por mejorar en actuales herramientas del mercado. Para el análisis del Diseño se tiene:

2.3.3 Módulos para el Diseño

Tabla 8

Módulos para el diseño

Módulo	Característica	Función
1	Peso, Construcción	Determinar los materiales a utilizar
2	Potencia	Qué se utilizará para mover el mecanismo
3	Mecanismo de Montaje	Que mecanismo se implementará para hacer ergonómico el sistema de corte.
4	Sistema de Transmisión	Qué sistema de engrane se utilizará

2.3.4 Módulo 1 (Peso, Construcción)

Tabla 9

Módulo 1 (Peso, Construcción)

Opciones	Apariencias	Costo	Orden de Selección
Aluminio Fundido	Buena	Medio	4
Acero ASTM 36	Muy Buena	Económico	2
Acrílico	Buena	Económico	3
Acero galvanizado negro	Muy Buena	Económico	1

2.3.5 Módulo 2 (Potencia)

Tabla 10

Módulo 2 (Potencia)

Opciones	Apariencias	Costo	Orden de Selección
Motor 2 tiempos	Muy Buena	Medio	1
Motor eléctrico	Buena	Económico	2
Batería	Baja	Económico	3

2.3.6 Módulo 3 (Mecanismo de montaje)

Tabla 11

Módulo 3 (Mecanismo de montaje)

Opciones	Apariencias	Costo	Orden de Selección
Mochila-Exoesqueleto	Muy Buena	Medio	1
Sistema unido motor-corte	Buena	Medio	2
Sistema con ruedas	Buena	Económico	3

2.3.7 Módulo 4 (Sistema de transmisión)

Tabla 12

Módulo 4 (Sistema de transmisión)

Opciones	Apariencias	Costo	Orden de Selección
Biela-Manivela	Muy Buena	Económico	3
Yugo Escoses	Buena	Económico	2
Cilindros Neumáticos	Buena	Medio	1

- En base a los módulos anteriormente analizados se utilizará un material de Acero ASTM 36 debido a su alta fuerza y durabilidad ante daños mecánicos, muy accesible en el mercado, su peso es liviano y tiene alto límite elástico en relación con las otras posibilidades.
- Se utilizará un motor de 2 tiempos debido a que posee alto torque y alta velocidad.
- El mecanismo de montaje será una mochila-exoesqueleto que ayudará a brindar mejor ergonomía y a equilibrar las cargas de trabajo del operario.
- El sistema de transmisión será por el mecanismo biela manivela implementada en la caja reductora para el corte del fruto de palma africana.

2.4 Análisis de materiales

Para la construcción del sistema de corte se utilizar diferentes materiales bajo el criterio de evaluación y la disponibilidad de materiales dentro del país. En la estructura se utilizará perfiles redondos y cuadrados para el exoesqueleto y además se hará uso de las instalaciones de las impresoras 3D para piezas de difícil mecanizado.

2.4.1 Acero ASTM 36

El acero ASTM 36, tiene buena soldabilidad, excelentes propiedades mecánicas y muy buena resistencia, como muestra la Tabla 13

Tabla 13

Propiedades químicas Acero estructural ASTM A-36 [48]

Acero estructural ASTM A-36					
C	S	Mn	S	P	Cu
≤ 0,26	≤ 0,40	~	≤ 0,05	≤ 0,04	≤ 0,20

Tabla 14

Propiedades mecánicas Acero estructural ASTM A-36 [48]

Acero estructural ASTM A-36		
Límite elástico mínimo, MPA	Límite de resistencia, MPA	Alargamiento relativo mínimo % (probeta de 200mm)
250	400-550	20

2.4.2 Resina Tough 2000

Para las piezas de difícil mecanización se implementó impresión 3d con la resina Tough 2000 es el material más fuerte y rígido de la familia funcional de resinas resistentes y duraderas para crear prototipos de piezas fuertes y resistentes que no deben doblarse fácilmente [49]. Las propiedades de la resina tough 2000 se muestran en la Tabla 15

Tabla 15

Propiedades resina Tough 2000 [49].

Propiedades	Durable Resin V2	Tough 1500
	Postcurada (60 °C)	Postcurada (70 °C)
Resistencia a la rotura por tracción (MPa)	31.8	33
Módulo de tracción (GPa)	1.26	1.50
Alargamiento de rotura (%)	49.0	51.0
Módulo de flexión (GPa)	0.82	1.40
Resistencia al impacto Izod (J/m)	109	67
Temperatura de flexión bajo carga a 1.8 MPa (°C)	-	45
Temperatura de flexión bajo carga a 0.45 MPa (°C)	43.3	52.0

2.5 Formulación

2.5.1 Factor de Seguridad

Es un valor numérico que se obtiene a través de la correspondencia entre un esfuerzo permitido y el esfuerzo generado por cargas [50] .

Falla \neq Fractura

Una falla ocurre cuando un miembro cesa de realizar satisfactoriamente la función para la cual estaba destinado como muestra en la Figura (2-10).

$$FS = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{admisible}}$$

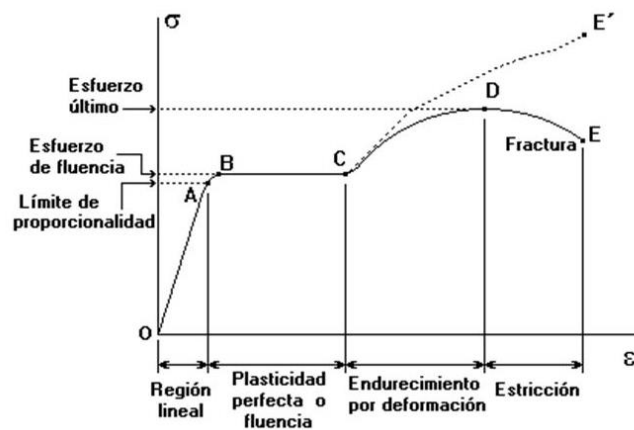


Figura (2-10). Curva Esfuerzo – Deformación Materiales Dúctiles [50]

El esfuerzo último o esfuerzo máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ es aquel esfuerzo que se produce después de la zona elástica-plástica y es el momento máximo antes de la fractura de un material.

El esfuerzo límite elástico σ_y es el límite de la zona elástica-plástica donde se produce la fractura del material.

El esfuerzo admisible $\sigma_{admisible}$ es aquel que no debe ser excedido en el diseño y por lo general se lo encuentra en tablas de los materiales a utilizar.

$$F_s = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{admisible}}} = \frac{\text{Esfuerzo del Material}}{\text{Esfuerzo del Diseño}}$$

$$F_s = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{admisible}}} = \frac{\text{límite elástico}}{\text{Esfuerzo del Diseño}}$$

2.5.2 Esfuerzos

$$\tau = \frac{V}{A} [51]$$

En dónde: σ = Esfuerzo (MPa); V= Fuerza Cortante (N); A= Área (mm^2).

2.5.3 Momento de Inercia

Es la distribución de masas puntuales dentro de un cuerpo. En la Figura (2-11) se muestra ejemplos de momentos de inercia de un rectángulo.

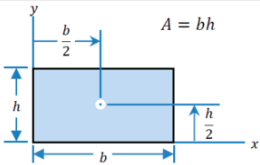
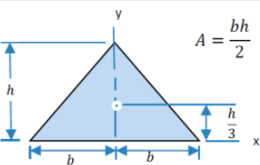
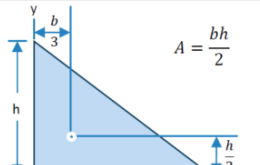
Rectángulo	Triángulo Isósceles	Triángulo Rectángulo
 <p>$A = bh$</p>	 <p>$A = \frac{bh}{2}$</p>	 <p>$A = \frac{bh}{2}$</p>
$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{12}$ $\bar{I}_y = \frac{b^3h}{12}$ $\bar{I}_{xy} = 0$ $I_x = \frac{bh^3}{3}$ $I_y = \frac{b^3h}{3}$ $I_{xy} = \frac{b^2h^2}{4}$	$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36}$ $\bar{I}_y = \frac{b^3h}{48}$ $\bar{I}_{xy} = 0$ $I_x = \frac{bh^3}{12}$ $I_y = \frac{b^3h}{48}$ $I_{xy} = 0$	$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36}$ $\bar{I}_y = \frac{b^3h}{36}$ $\bar{I}_{xy} = -\frac{b^2h^2}{72}$ $I_x = \frac{bh^3}{12}$ $I_y = \frac{b^3h}{12}$ $I_{xy} = \frac{b^2h^2}{24}$

Figura (2-11). Momentos de Inercia de un Rectángulo y Triángulo [52]

$$I = \frac{1}{12} b * h^3 \quad \text{Ecuación. [51]}$$

Donde: I= Momento de Inercia [mm^4]; b= base [mm]; h= altura [mm].

2.6 Sistema de Control y eléctrico

2.6.1 Servomotor MG 996R

El servomotor es un motor de corriente continua que permite controlar la velocidad como la posición del eje en la que esta gira, la mayoría solo tienen 180° de rotación y este puede ser en sentido horario y antihorario. Este servomotor es el más usual para aplicaciones de gran torque ya que poseen una piñonería metálica como se muestra en la Figura (2-12).



Figura (2-12). Servomotor MG 996R [53] .

2.6.2 Arduino nano

Según [54], es una tarjeta pequeña y completa que se relaciona con la ATmega328, tiene una memoria de 16 KB o 32 KB flash además una EEPROM de (512 bytes o 1 KB según el MCU, esta se encarga de encargarse todas las entradas, salidas y cálculos necesarios). Es una placa con un microcontrolador reprogramable para tratar entradas y salidas de datos como se muestra en la Figura (2-13).



Figura (2-13). Arduino nano [54] .

2.6.3 Acelerómetro ADXL345

Es un acelerómetro de tres ejes, es muy apropiado para medir la aceleración de la gravedad estática y son aplicables para detección de inclinación con una medición de alta resolución. A continuación, en la Figura (2-14) se muestra las características técnicas.

Acelerómetro ADXL345	
Especificaciones técnicas	
Sensor	ADXL345
Voltaje de operación	3V - 5V
Consumo de corriente	23 μ en medición y 0.1 μ A en standby
Rango Acelerómetro	+/- 3g , 4g , 8g y 16 g
Resolución	hasta 13 bits a \pm 16g (manteniendo 4 mg/ LSB)
Grados de libertad	3 ejes
Regulador de voltaje	Integrado

Figura (2-14). Acelerómetro ADXL345 [55] .

Como se puede observar en la tabla anterior el consumo de corriente es muy baja, por esta razón ayuda ahorrar energía, además tiene una alta resolución para poder determinar datos mucho más reales respecto al movimiento.

Para el control de esta tarjeta se tiene dos señales la SCL y SDA que serán conectadas en la tarjeta Arduino para la adquisición de datos se muestra en la Figura (2-15) el diagrama de conexión.

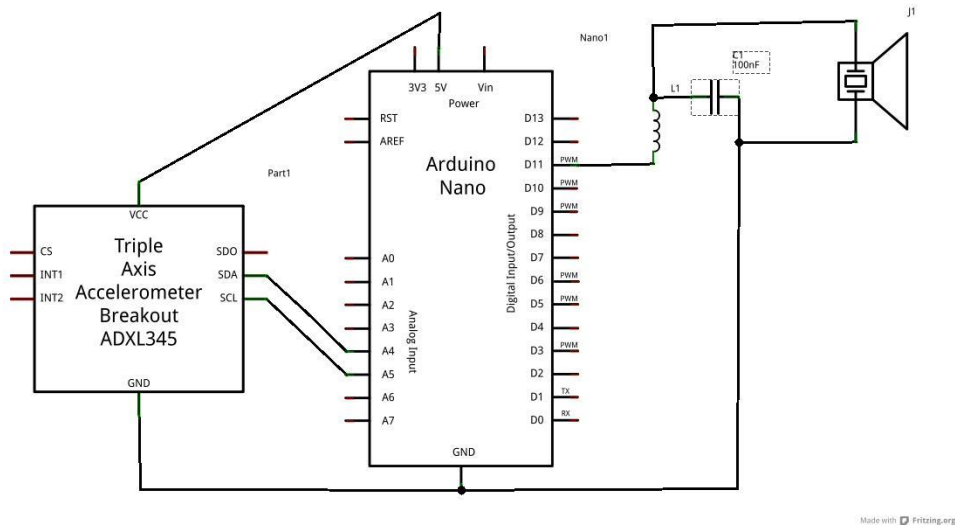


Figura (2-15). Diagrama de conexión Arduino nano y Acelerómetro ADXL345 [56] .

2.6.4 Solar Charger

Es un cargador portátil con celdas solares, tiene dos puertos USB con salidas de 5V/1A, posee una batería Li-polymer de 58000mAh, es muy fácil de adaptarla y poder llevarlas a cualquier parte ya que también es a prueba de agua. Como se muestra la siguiente Figura (2-16).



Figura (2-16). Solar Charger [57] .

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE CARGAS

Para el análisis de las cargas en la estructura del exoesqueleto se analiza los eslabones bases para identificar la flexión y fuerzas cortantes, donde se toma en cuenta el peso del motor (W) y la longitud del eslabón como se muestra en la siguiente Figura (3-1).

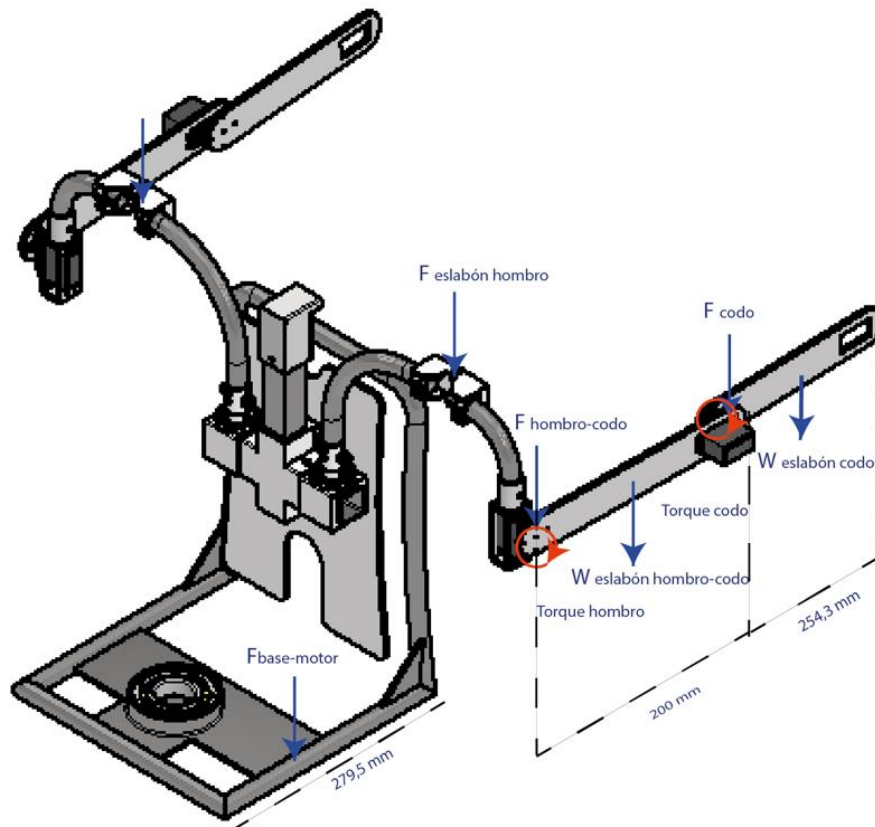


Figura (3-1). Diagrama de cargas del exoesqueleto

Datos:

$W_{motor} = 6\text{ Kg} = 13,22\text{ lb}$

Longitud Eslabón base = $279,5\text{ mm}$

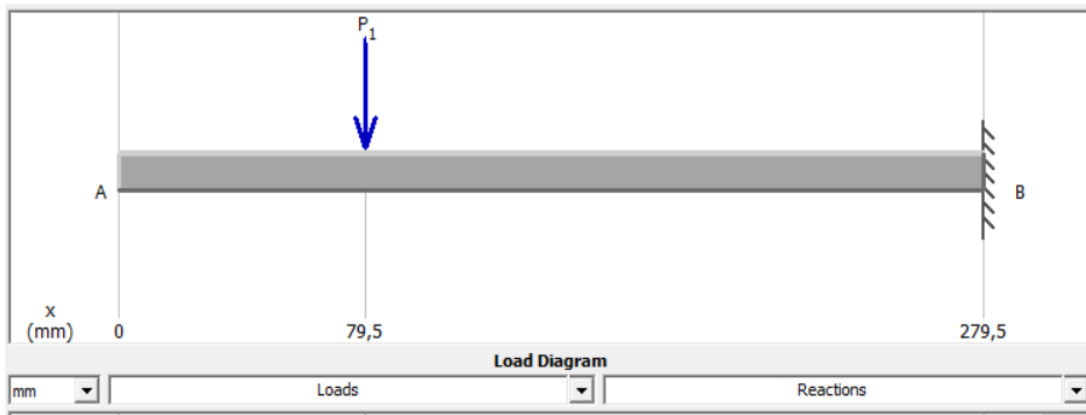


Figura (3-2). Diagrama de Cargas del Eslabón base-motor simulado como viga empotrada

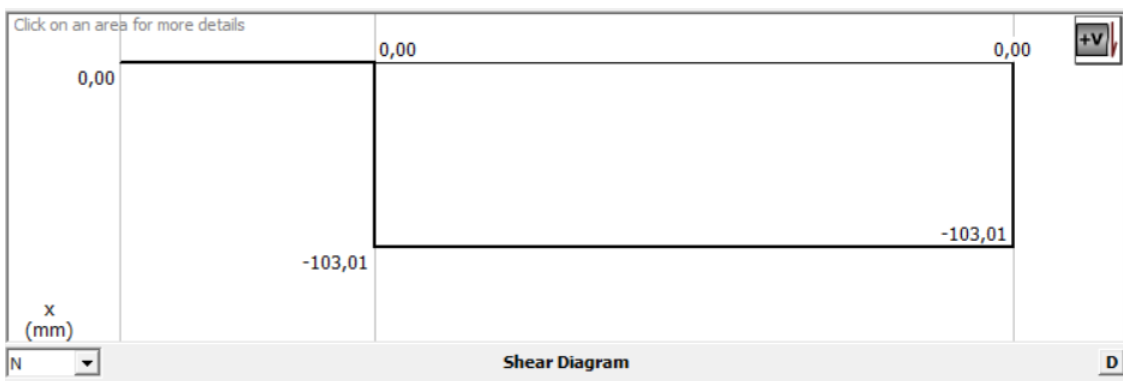


Figura (3-3). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón base-motor

$$\text{Fuerza cortante máxima} = 103,01 \text{ N}$$

Esta fuerza es la carga ejercida por el peso del motor, la cual está a una distancia de 79,5mm desde el punto A.

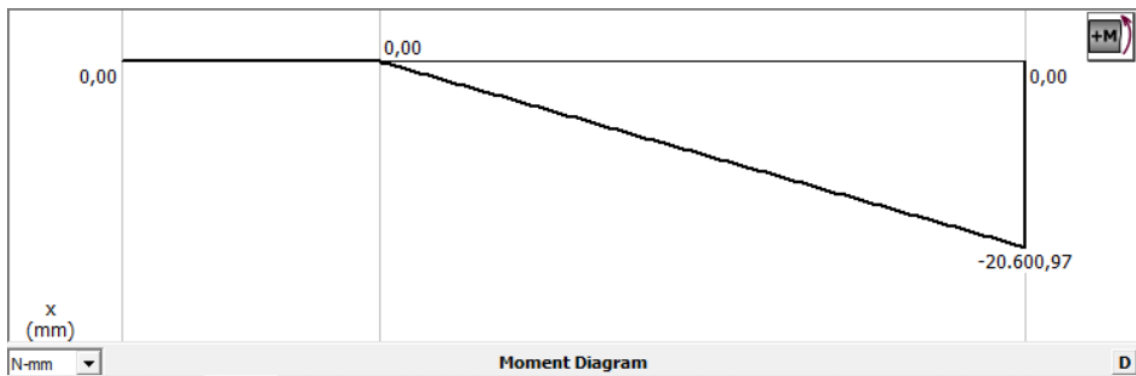


Figura (3-4). Diagrama de momentos del eslabón base-motor

$$\text{Momento torsor máximo} = 20.600,97 \text{ N-mm}$$

Para la estructura base donde estará montado el motor se tiene un momento torsor máximo que está relacionado con el peso que ejerce el motor.

Para determinar el diámetro mínimo de la estructura del acero ASTM36 se tiene:

Datos: $S_y = 250 \text{ MPa}$ por cuestiones de diseño se usa un esfuerzo admisible equivalente a $0,6 S_y$ [58].

$$0,6S_y = \frac{M_{m\acute{a}x}}{S}$$

$$S = \frac{M_{m\acute{a}x}}{0,6S_y}$$

$$S = \frac{20,600 \text{ Nmm}}{0,6(250 \text{ Mpa})} = \mathbf{0,1373 \text{ mm}}$$

Donde: S_y = Esfuerzo admisible; $M_{m\acute{a}x}$ = Momento máximo; S = Diámetro mínimo de diseño.

EL diámetro mínimo de construcción es de 0,1373 mm por ello para tener una estructura con dimensionamientos normalizados y que no falle se selecciona el diámetro de tubo de un perfil redondo de acero ASTM 36 con un diámetro exterior de 19,05 con un espesor de 1,10 mm según la Figura (3-5) presentada a continuación:



Espesos			Peso		Propiedades		
	Diámetro Exterior (D)	e	P	A	I	W	I
Pulg	mm	mm	Kg/6m	cm	cm4	cm3	cm
1/2	12.70	0.95	1.86	0.35	0.06	0.09	0.41
		1.10	2.10	0.40	0.07	0.11	0.41
		1.50	2.82	0.53	0.08	0.13	0.39
5/8	15.88	0.95	2.28	0.44	0.12	0.15	0.51
		1.10	2.64	0.51	0.14	0.18	0.52
		1.50	3.54	0.68	0.18	0.22	0.51
		0.95	2.70	0.54	0.22	0.23	0.64
3/4	19.05	1.10	3.18	0.62	0.25	0.26	0.63
		1.50	4.20	0.83	0.32	0.34	0.62
7/8	22.22	0.95	3.18	0.63	0.36	0.32	0.75
		1.10	3.66	0.73	0.41	0.37	0.75
		1.50	4.92	0.98	0.53	0.47	0.74

Figura (3-5). Catálogo Acero Center perfil redondo [59].

Entonces se simula la estructura conjunta de la mochila del exoesqueleto con los parámetros antes seleccionados.

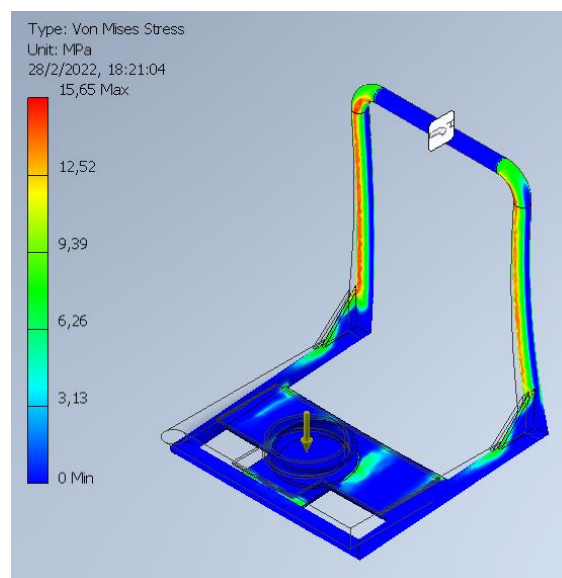


Figura (3-6). Simulación Esfuerzo Von Mises estructura mochila

Con estos resultados mostrados en la Figura (3-6) se puede concluir que el esfuerzo máximo de la estructura es de 15,6465 Mpa este valor es menor 250 Mpa (Sy ASTM 36) cumpliendo con la teoría de Von Mises para que la estructura no falle.

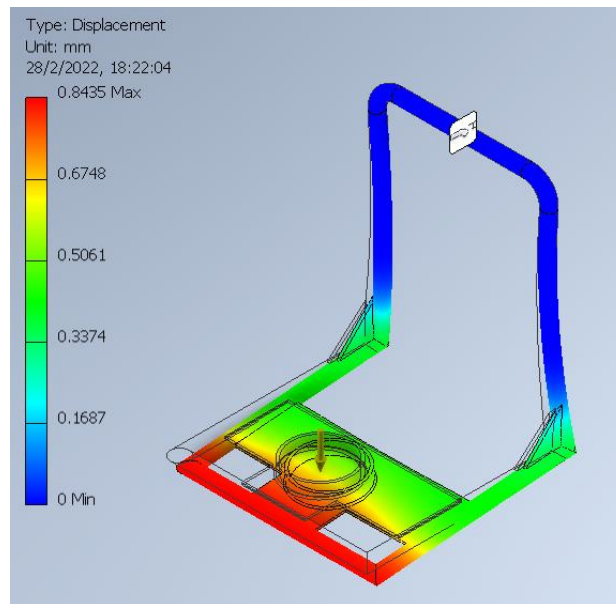


Figura (3-7). Simulación Desplazamientos estructura mochila

En la Figura (3-7) se tiene un desplazamiento máximo de 0,84351mm con respecto a sus dimensiones reales.

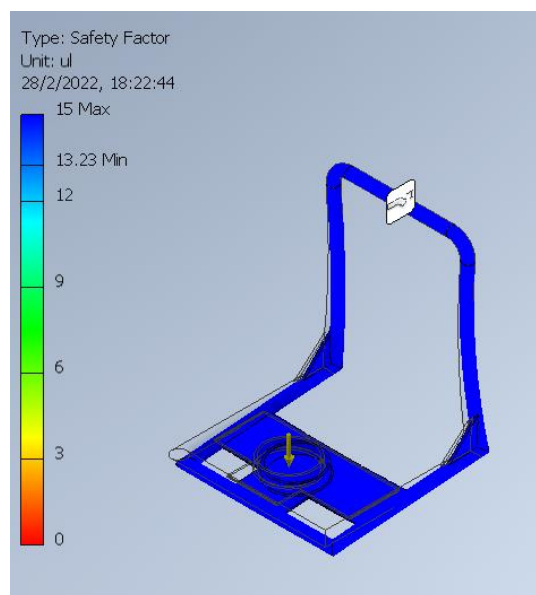


Figura (3-8). Simulación Factor de Seguridad estructura mochila

En la Figura (3-8) se obtiene un factor de seguridad máximo de 15 por lo tanto, el modelo esta sobredimensionado para que cumpla eficazmente y no falle. Esta estructura tiene una masa de 4,6184 kg, este peso será tomado en cuenta en los cálculos finales del exoesqueleto.

3.1 Eslabón hombro-codo

Para el análisis de fuerzas que se aplica en el eslabón hombro-codo se debe tomar en cuenta todas las cargas aplicadas a ese eslabón, las medidas antropométricas tomadas para el diseño de las dimensiones del eslabón fueron obtenidas de la siguiente Tabla 15

Tabla 15

Medidas antropométricas en posición de pie trabajadores industriales sexo masculino 18 a 65 años con percentil 5 [60].

Dimensiones		10-65 años (n=396)				
		χ	D.E	5	50	95
Peso (Kg)		73	12,33	55,31	72,1	97,3
Estatura		1675	62,8	1576	1668	1780
Altura de ojos		1550	61,8	1447	1546	1651
Altura de oídos		1538	63,7	1439	1534	1635
Altura de hombros		1380	58,49	1281	1377	1477
Altura codo		1068	55,02	988	1065	1145
Altura codo flexionado		969	40,81	906	969	1046
Altura muñeca		825	39,49	757	822	919
Altura nudillo		740	43,56	680	740	800
Altura dedo medio		639	35,31	584	638	697
Diámetro a-p cabeza		198	8,98	182	194	205
Altura mentón		1442	61,2	1337	1440	1544
Altura trocánter may.		873	44,61	810	872	940

Para calcular las dimensiones del eslabón se toma en cuenta las medidas de altura de hombro y la altura de codo respecto a la posición base del suelo del operario entonces se tiene:

Altura del eslabón hombro= 1281 mm

Altura del eslabón codo= 988 mm

$$\text{Eslabón hombro} - \text{codo} = 1281 - 988 = 293\text{mm}$$

Realizando las pruebas suficientes, una vez implementado el cuerpo del exoesqueleto se resta la distancia entre el eslabón del brazo del exoesqueleto y el eslabón hombro codo determinando una diferencia de 38,7 mm dando como medidas finales como se tiene a continuación en la Figura (3-9).

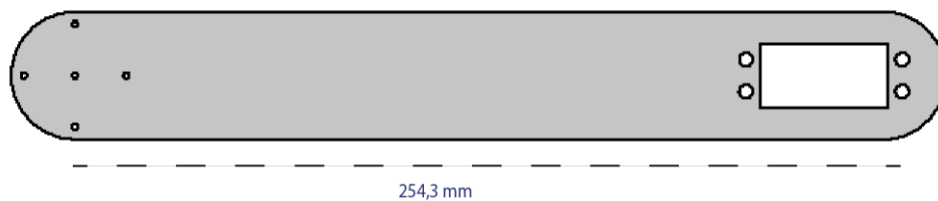


Figura (3-9). Eslabón hombro-codo

Datos:

Longitud eslabón hombro-brazo= 254.3 mm

Para obtener el peso aproximado se toma en cuenta los parámetros del porcentaje de cada masa del segmento del cuerpo con respecto a la masa total ver Tabla 2

Los pesos de la estructura del exoesqueleto se toman en cuenta al final del diseño, estos estarán determinados al cálculo de la potencia del motor al igual que el peso del sistema de corte.

$$\text{Masa estructural brazo}=0,040 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa estructural antebrazo}=0,030 \text{ Kg}$$

Para calcular la masa corporal del brazo y antebrazo con los datos de la tabla 2, se tiene el porcentaje de la masa en los segmentos a considerar para una persona promedio de 63 kg se tienen los siguientes valores:

$$\text{Masa}_{\text{corporal del brazo}} = 0,039 \text{ Kg} \times 90 = \mathbf{3,51 \text{ Kg}}$$

$$\text{Masa}_{\text{corporal del antebrazo}} = 0,024 \text{ Kg} \times 90 = \mathbf{2,16 \text{ Kg}}$$

La masa total de los eslabones se obtiene a través de la suma entre la masa corporal y estructural.

$$\text{Masa total} = \text{Masa estructural} + \text{Masa corporal}$$

$$\text{Masa}_{\text{total brazo}} = 3,51 \text{ Kg} + 0,040 \text{ Kg} = \mathbf{3,55 \text{ Kg}}$$

$$\text{Masa}_{\text{total antebrazo}} = 2,16 \text{ Kg} + 0,030 \text{ Kg} = \mathbf{2,19 \text{ Kg}}$$

Para encontrar el peso total se transforma la masa obtenida al peso.

$$\text{Peso total} = m \times g$$

$$\text{Peso total del brazo} = 3,55 \text{ Kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{34,83 \text{ N}}$$

$$\text{Peso total del antebrazo} = 2,19 \text{ Kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{21,48 \text{ N}}$$

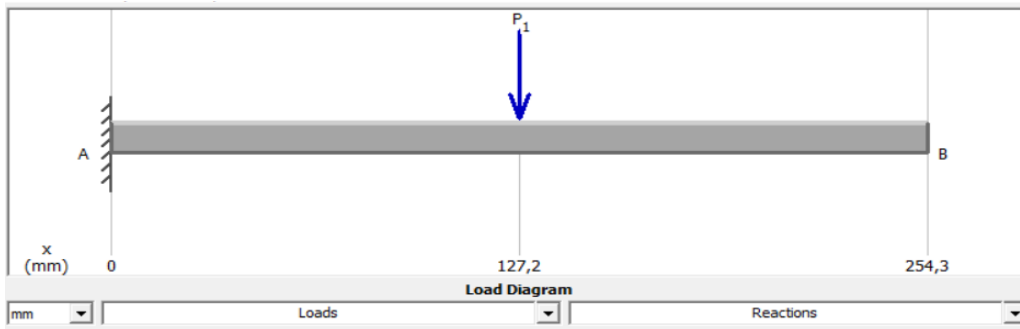


Figura (3-10). Diagrama de Cargas del eslabón hombro-codo simulado como viga empotrada

3.1.1 Fuerzas Cortantes

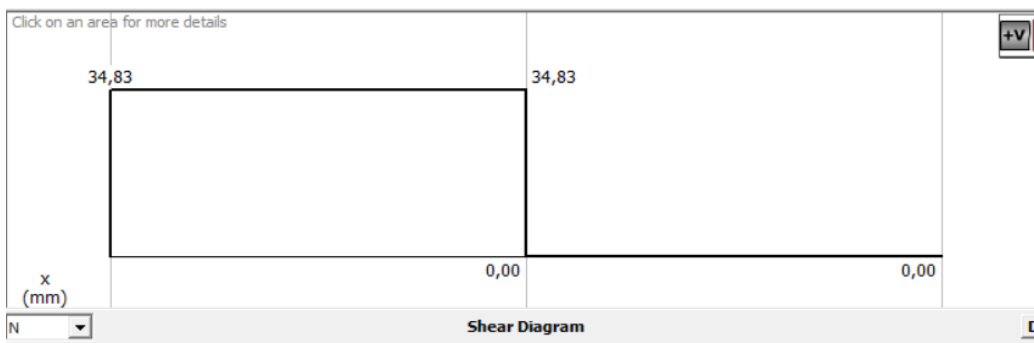


Figura (3-11). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón hombro-codo

$$Fuerza\ cortante\ máxima = 34,83\ N$$

La fuerza que actúa en el eslabón hombro-codo es el peso del brazo con carga central a la viga.

3.1.2 Momentos flectores

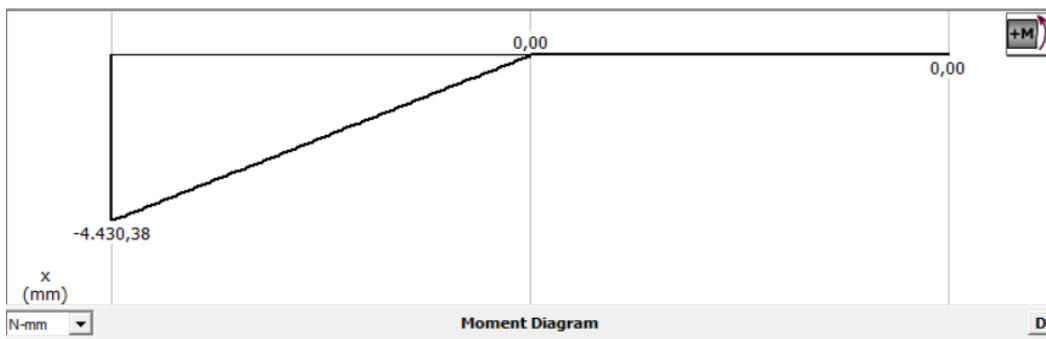


Figura (3-12). Diagrama de momentos del eslabón hombro-motor

$$Momento\ torsor\ máximo = 4430,38\ [N\cdot mm]$$

Para el eslabón hombro-codo se debe tomar en cuenta más adelante las cargas adicionales del exoesqueleto final para ello también se obtendrá valores de momentos respecto al conjunto del brazo exoesqueleto.

3.2 *Eslabón antebrazo*

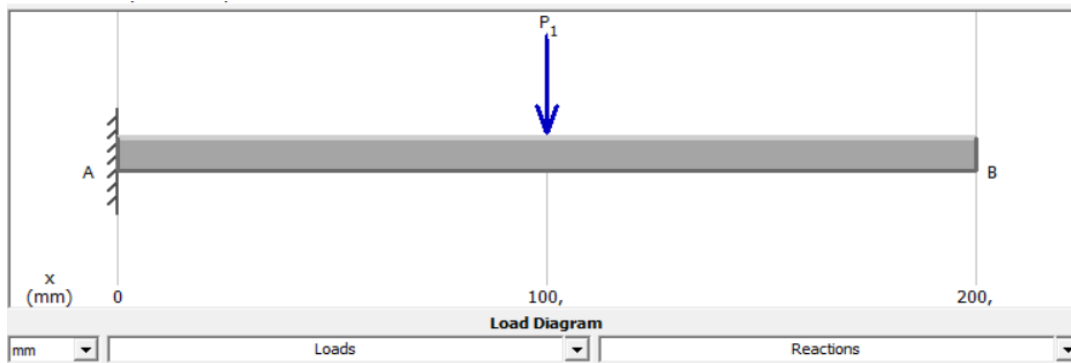


Figura (3-13). Diagrama de Cargas del eslabón antebrazo

3.2.1 *Fuerzas Cortantes*

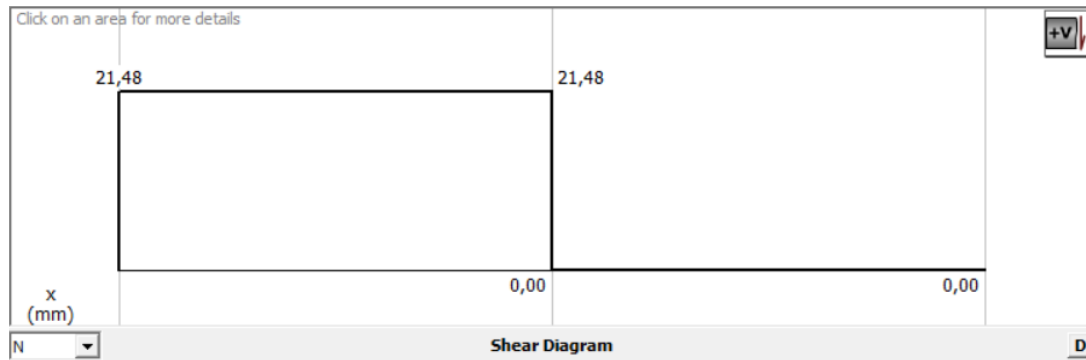


Figura (3-14). Diagrama fuerzas cortantes del eslabón antebrazo

$$Fuerza\ cortante\ máxima = 21,48\ N$$

La fuerza que actúa en el eslabón antebrazo es el peso del antebrazo con carga central a la viga.

3.2.2 Momentos flectores

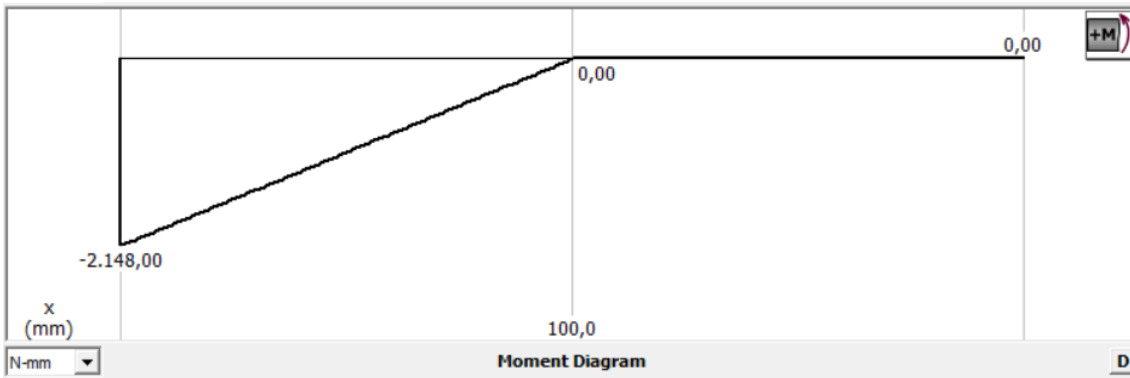


Figura (3-15). Diagrama de momentos del eslabón antebrazo

$$\text{Momento torsor máximo} = 2148 \text{ [N-mm]}$$

3.3 Dimensionamiento de los servomotores

3.3.1 Cálculo del torque del codo

Para el diseño confiable se debe analizar los eslabones para que sean lo suficientemente rígidos y puedan soportar todas las cargas a las que estarán sometidos, para ello se debe tomar en cuentas las condiciones más críticas de cada elemento y así determinar el máximo torque en la Figura (3-16) se muestran los datos de dimensionamiento.

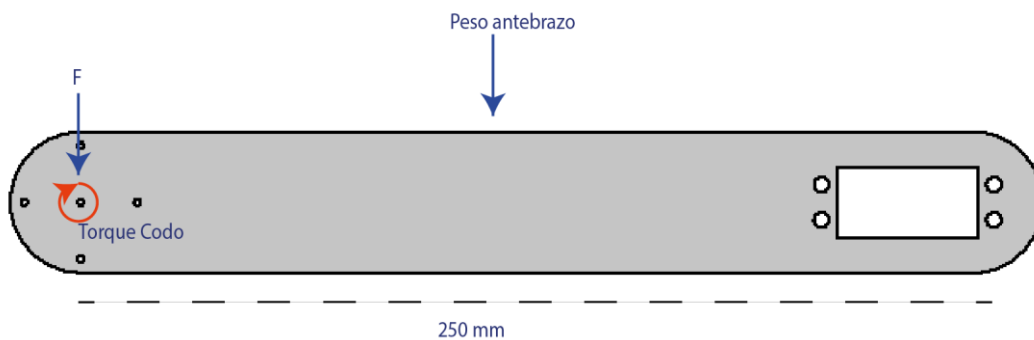


Figura (3-16). Fuerza y peso que actúa en el hombro

Para el cálculo se considera las fuerzas a estar involucradas en el movimiento del codo, el peso a levantar del objeto es la principal fuerza a la que está sometida el eslabón del

codo este está determinado por el peso del sistema de corte de la máquina y el peso que se desea levantar que es un total de 10 kg las cuales 3 kg pertenecen al peso del sistema de corte. Entonces en la posición más crítica del eslabón hombro que es horizontalmente se realiza los cálculos a determinar.

$$F = \text{Peso a levantar} = 2 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s} = 98,1 \text{ N}$$

$$W1 = \text{Peso antebrazo} = 21,48 \text{ N}$$

$$\text{Torque}_{\text{codo}} = (98,1)(0,200) + (21,48)(0,100)$$

$$\text{Torque}_{\text{codo}} = 21,77 \text{ Nm}$$

3.3.2 Cálculo del torque del hombro

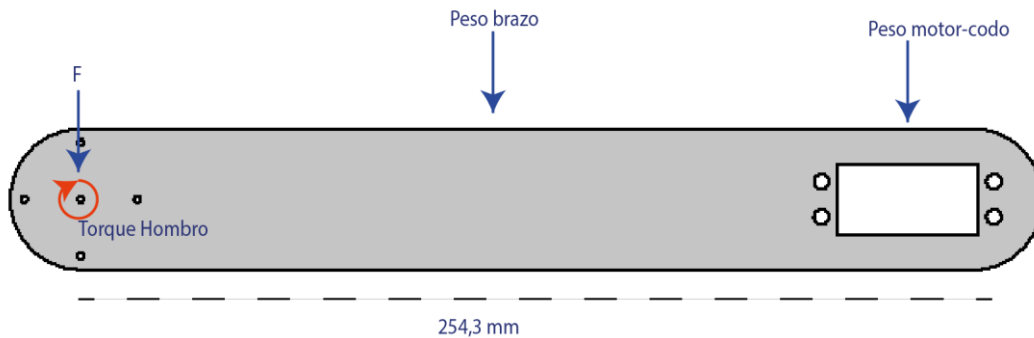


Figura (3-17). Fuerza y peso que actúa en el hombro

Para el análisis del eslabón hombro en la Figura (3-17) se realiza el mismo procedimiento de cálculo anterior, en este caso se toma en cuenta las fuerzas y distancias adicionales a considerar en el sistema de todo el brazo, en este caso el peso del eslabón del brazo completo y el peso del servomotor del codo en la posición más crítica para tener confiabilidad que este se encuentre seguro y soporte las cargas destinadas.

$$F = \text{Peso a levantar} = 10 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s} = 98,1 \text{ N}$$

$$W1 = \text{Peso del motor codo} = 0,055 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s} = 0,54 \text{ N}$$

$$W2 = \text{Peso brazo} = 34,83 \text{ N}$$

$$W3 = \text{Peso antebrazo} = 21,48 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Torque}_{hombro} &= (98,1N)(0,430m) + (34,83N)(0,330m) + (0,54N)(0,230m) \\ &+ (21,48)(0,115) \end{aligned}$$

$$\mathbf{Torque}_{hombro} = 56,27 Nm$$

Con estos torques se selecciona el servomotor adecuado que cumpla con los parámetros y funcionalidad adecuado para el exoesqueleto pasivo según el estudio basado en beneficios y limitaciones del uso del exoesqueleto ocupacionales, los exoesqueletos pasivos soportan un criterio de porcentaje respecto a la carga de la fracción de la masa muscular [61].

Para ello este exoesqueleto se concentra en la reducción de carga muscular según el modelo PLAD, BDRN y Laevo V2 que considera el 11% al 23% de las cargas de las tareas de manipulación [61].

Entonces se considera el 23% de torque máximo en el codo y el 11% en el hombro aplicado a cada eslabón.

$$\mathbf{Torque}_{codo} = 21,77 Nm$$

$$\mathbf{Torque}_{codo} = 21,77 Nm \times 0,23 = 5 Nm$$

$$\mathbf{Torque}_{hombro} = 56,27 Nm$$

$$\mathbf{Torque}_{hombro} = 56,27 Nm \times 0,11 = 6,189 Nm$$

3.3.3 Selección Servomotores

Los servomotores más usados en aplicaciones de robótica en la actualidad son los Brushless no poseen escobillas. De acuerdo con los parámetros de diseño se requiere un servomotor que cumpla con el torque necesario para su funcionamiento correcto para ello se implementó el servomotor MG996R 12 kg con una capacidad de torque de 107,9 Nm las características técnicas se detallan a continuación en la Tabla 16

Tabla 16

Características técnicas del servomotor MG9964R [62]

Servomotor	
MG996R HIGH TORQUE	
Peso	55g
Dimensiones	40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
Torque	9.4 kgf-cm (4.8 V), 11 kgf-cm (6V)
Velocidad de operación	0.17 S/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6V)

3.4 Selección de los rodamientos

Para el diseño del movimiento del mecanismo del exoesqueleto se tiene la implementación de rodamientos para la base del motor y para los brazos de este, para ello se realiza el siguiente estudio.

Para la selección del rodamiento del eje del motor se tiene un diámetro del eje de 17 mm por ende se tiene las siguientes opciones como se muestra en la Figura (3-18) y Figura (3-19).

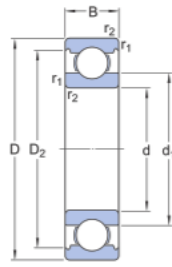
Dimensiones principales			Capacidades de carga básicas		Designación
D (milímetro)	D (milímetro)	B (milímetro)	C (kN)	C_0 (kN)	
17	35	8	6.37	3.25	☆ ■ 16003
17	35	8	6.37	3.25	☆ ■ 16003-2Z
17	40	dieciséis	14.8	9.5	4203 ATN9
17	47	19	19.5	13.2	4303 ATN9
17	35	10	6.37	3.25	☆ ■ 6003
17	35	10	6.37	3.25	☆ ■ 6003-2RSH
17	35	10	6.37	3.25	■ 6003-2RSH/VA947

= Artículo popular: alto nivel de disponibilidad y, en general, una solución rentable
 = SKF Explorer - Mayores niveles de carga y mayor vida útil con beneficios asociados

0 de 0 < >

Figura (3-18). Opciones de rodamientos SKF para el eje del motor [63]

2.1. Bearing data



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Clearance class
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	Dynamic C (kN)	Static C ₀ (kN)		Reference n _{ref} (r/min)	Limiting n _{lim} (r/min)	
☆ ■ 16003	Deep groove ball bearing	17.0	35.0	8.0	6.37	3.25	0.137	45000.0	28000.0	Normal

2.2. Loads, Speed and Temperature

Shaft orientation	Horizontal				
Rotating ring	Inner ring rotation				
Forces		Speed	Temperature		Case weight
Radial (F _r) (kN)	Axial (F _a) (kN)	(r/min)	Inner ring (°C)	Outer ring (°C)	
LC1	0.059		70	65	1

Figura (3-19). Selección del rodamiento y sus datos técnicos [63]

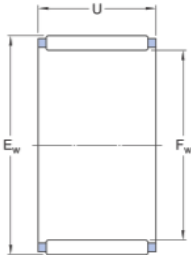
Se selecciona un rodamiento de bolas de diámetro interno de 17 mm y un diámetro exterior de 35 mm, estos rodamientos son capaces de distribuir las fuerzas axiales y radiales en este caso una fuerza axial de 0.059 kN teniendo como carga de fatiga límite de 0,137 kN siendo capaz de soportar la fuerza que ejerce el motor y distribuir sus cargas sin problema alguno.

Para el diseño de los brazos del exoesqueleto también se tiene rodamientos en el eje principal de su movimiento que es rotatorio para ello se usó los siguientes rodamientos a fines del diámetro del perfil redondo y su soporte como se muestra en la Figura (3-20) y Figura (3-21).

Principal dimensions			Basic load ratings		Designation
d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	
19	23	13	9.13	13.7	K 19X23X13
19	23	17	12.1	19.3	K 19X23X17
19	27	16	13.4	19	☆ NK 19/16
19	27	20	16.5	25.5	NK 19/20

Figura (3-20). Opciones de rodamientos SKF para los brazos del exoesqueleto [63]

2.1. Bearing data



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit P _u (kN)	Speed ratings	
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	Dynamic C (kN)	Static C ₀ (kN)		Reference n _{ref} (r/min)	Limiting n _{lim} (r/min)
K 19X23X13	Needle roller bearing	19.0	23.0	13.0	9.13	13.7	1.6	20000.0	24000.0

2.2. Loads, Speed and Temperature

Forces	Speed	Temperature		Case weight
		Inner ring (°C)	Outer ring (°C)	
Radial (F _r) (kN)	(r/min)			
LC1	0.056	70	65	1

Figura (3-21). Selección del rodamiento brazo exoesqueleto y sus datos técnicos [63]

Para el sistema de movimientos de los brazos del exoesqueleto se tomó en cuenta el diámetro interior, a partir de ello se diseñó una pieza soporte de 19 mm, en base a las opciones que brinda el SKF (Fabrica de rodamientos de bola sueca), se selecciona un rodamiento de bolas de diámetro interior de 19 mm y un diámetro exterior de 23 mm, este caso su carga límite de fatiga es de 1.6 kN, siendo capaz de dar movilidad sin falla a los brazos del exoesqueleto.

3.5 Simulación Eslabones

Debido a que el elemento tiene una geometría complicada se opta por la simulación en autodesk inventor, donde se aplican las cargas reales, con la validez de este método se puede determinar el comportamiento de la estructura en función al punto donde se genera el mayor esfuerzo y determinar su factor de seguridad.

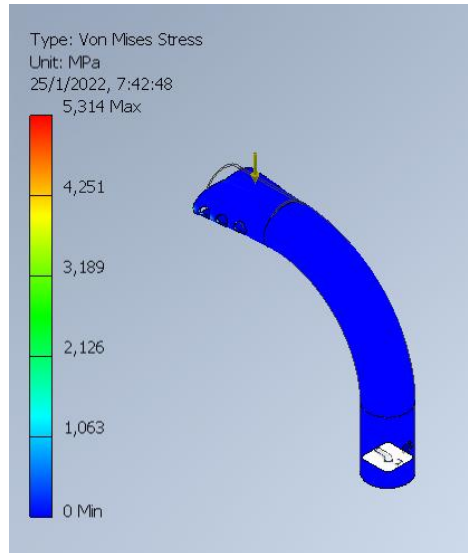


Figura (3-22). Simulación Esfuerzo Von Mises Eslabón Hombro

En la Figura (3-22) en el esfuerzo máximo en el elemento es de 5,314 Mpa, según la simulación el eslabón se encuentra dentro del esfuerzo mínimo.

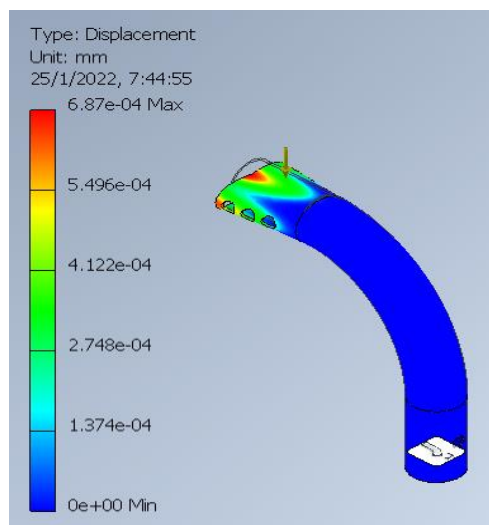


Figura (3-23). Simulación Desplazamientos Eslabón Hombro

En la Figura (3-23) el desplazamiento del eslabón del hombro es de 0,000687 mm, por ende, es imperceptible y no falla.

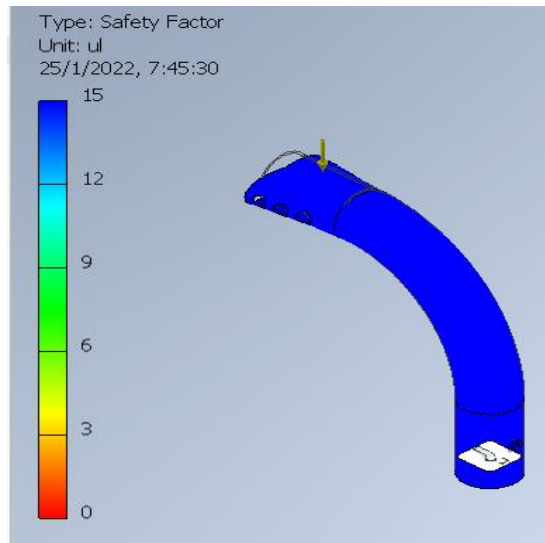


Figura (3-24). Simulación Factor de Seguridad Eslabón Hombro

En la Figura (3-24) el factor de seguridad del eslabón del hombro es de 15 con esto se concluye que cumple con los parámetros establecidos donde se muestra la simulación de los datos técnicos en la Tabla 17

Tabla 17

Resultados de la simulación datos técnicos

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm ³
	Límite elástico	248,225 MPa
	Resistencia a la tracción	399,9 MPa
Esfuerzo	Módulo de Young	199,959 GPa
	Coeficiente de Poisson	0,3 ul
	Módulo de corte	76,9073 GPa
Parte Nombre(s)	Eslabón Hombro	

Tabla 18

Resultados de la simulación

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	5855,8 mm ³	
Masa	0,045968 kg	
Esfuerzo Von Mises	0,0000000241465 MPa	5,31437 MPa
1ro Esfuerzo principal	-0,426092 MPa	2,4033 MPa
3ro Esfuerzo principal	-5,54255 MPa	0,374537 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000687038 mm
Factor de seguridad	15 ul	15 ul
Esfuerzo XX	-0,897836 MPa	0,74304 MPa
Esfuerzo XY	-0,617099 MPa	0,589819 MPa
Esfuerzo XZ	-0,71503 MPa	0,259283 MPa
Esfuerzo YY	-5,51348 MPa	2,4032 MPa
Esfuerzo YZ	-0,594579 MPa	0,579451 MPa
Esfuerzo ZZ	-1,71695 MPa	1,14896 MPa
Desplazamiento X	-0,0000728549 mm	0,0000479338 mm
Desplazamiento Y	-0,000683908 mm	0,000515221 mm
Desplazamiento Z	-0,000616738 mm	0,000619316 mm
Deformación equivalente	0,00000000000010691 ul	0,0000235888 ul
1ro Deformación principal	-0,0000000461166 ul	0,0000110447 ul
3ro Deformación principal	-0,0000266405 ul	0,000000121816 ul
Deformación XX	-0,00000189404 ul	0,00000753687 ul
Deformación XY	-0,00000401197 ul	0,00000383461 ul
Deformación XZ	-0,00000464865 ul	0,00000168569 ul
Deformación YY	-0,0000266145 ul	0,0000110447 ul
Deformación YZ	-0,00000386555 ul	0,0000037672 ul
Deformación ZZ	-0,00000814948 ul	0,00000954795 ul

Con estos resultados mostrados en la Tabla 18

Se puede concluir que el esfuerzo máximo en el eslabón hombro es de 5,31 MPa, teniendo un desplazamiento máximo de 0,000687 mm con respecto a sus dimensiones reales. Obteniendo así un factor de seguridad de 15 por lo tanto, el modelo se encuentra sobredimensionado por cuestiones estéticas.

Para la base rectangular del motor se tiene la siguiente simulación donde se presenta el perfil rectangular base que estará soldado en la estructura del exoesqueleto y en donde se calcula el momento de inercia de la base como se muestra en la Figura (3-25).

Datos:

b= 246,58 mm

h= 90 mm

$$I_y = \frac{1}{12} * b * h^3$$

$$I_y = \frac{1}{12} * 246,58 * (90)^3$$

$$I_y = \frac{1}{12} * (246,58) * (90)^3$$

$$I_y = 14979735 \text{ mm}^4$$

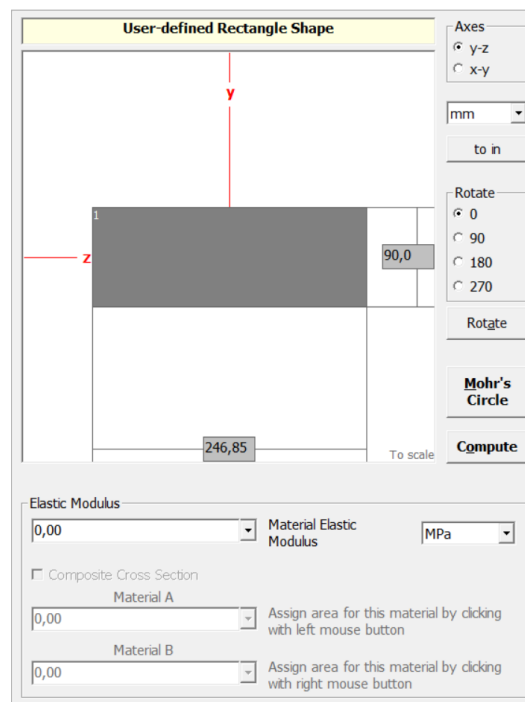


Figura (3-25). Simulación Base motor

Se muestran los resultados base motor y las propiedades En la Tabla 19

Tabla 19

Simulación Resultados base motor

Propiedades del eje Z			
Desde abajo al centroide	y (abajo)	45	mm
Desde el centroide hacia arriba	y (arriba)	45	mm
Área de figura	A	22216,5	mm ²
Momento de Inercia	Iz	14996137,5	mm ⁴
Módulo de sección	Sz	333247,5	mm ³
Módulo de sección (abajo)	S (abajo)	333247,5	mm ³
Módulo de sección (arriba)	S (arriba)	333247,5	mm ³
Radio de giro	rz	25,98076211	mm
Módulo plástico	Zz	499871,25	mm ³
Factor de seguridad		1,5	
Desde abajo al plástico n.a.	yp (abajo)	45	mm
Desde plástico n.a. arriba	yp (arriba)	45	mm
Propiedades del eje Y			
De izquierda a centroide	z (izquierda)	123,425	mm
Del centroide a la derecha	z (derecha)	123,425	mm
Área de figura	A	22216,5	mm ²
Moment of Inertia	Iy	112813392,1	mm ⁴
Módulo de sección	Sy	914023,8375	mm ³
Módulo de sección (izquierda)	S (izquierda)	914023,8375	mm ³
Módulo de sección (derecha)	S (derecha)	914023,8375	mm ³
Radio de giro	ry	71,25945697	mm
Módulo plástico	Zy	1371035,756	mm ³
Factor de seguridad		1,5	
De izquierda a plástico n.a.	zp (izquierda)	123,425	mm
De plástico n.d. a derecha	zp (derecha)	123,425	mm
Otras propiedades			
Modulos elasticos	E	1	psi
Momento polar de inercia	J	127809529,6	mm ⁴
Producto de inercia	Iyz	0	mm ⁴
Momento máximo de inercia	I _{max}	112813392,1	mm ⁴
Momento mínimo de inercia	I _{min}	14996137,5	mm ⁴
Ángulo del eje z al eje I _{max}	β	0	grados en sentido contrario a las agujas del reloj
Ángulo del eje y al eje I _{max}	β	90	grados en el sentido de las agujas del reloj

Teniendo en cuenta los datos teóricos con la comprobación de la simulación se tiene un momento de inercia mínimo de $14,996 \times 10^6 \text{ mm}^4$, obteniendo un factor de seguridad

de 1,5 evidenciando que el eje de giro del motor refleja una distribución de masa sobredimensionada lo que implica que este sistema no fallará.

3.6 Cálculo de fuerza de corte

El corte manual en la cosecha de palma es muy normal, la mayoría de las personas que lo hacen son de género masculino y desde siempre se ha ejercido esta actividad, para determinar la fuerza que realiza una persona se toma en cuenta una evaluación donde se relaciona el peso corporal con el porcentaje de levantamiento para ello se realizó una toma de datos para calcular la respectiva fuerza en múltiples variables de peso corporal [64].

Tabla 20

Porcentaje de levantamiento de cargas del cuerpo humano.

Peso corporal [kg]	Peso corporal [N]	Porcentajes de levantamiento						Promedio
		47,50%	60%	70%	80%	90%	100%	
50	490,33	232,908	294,2	343	392,3	441,3	490,33	365,71
55	539,37	256,198	323,6	378	431,5	485,4	539,37	402,28
60	588,40	279,489	353	412	470,7	529,6	588,4	438,85
65	637,43	302,78	382,5	446	509,9	573,7	637,43	475,42
70	686,46	326,071	411,9	481	549,2	617,8	686,46	511,99
75	735,50	349,361	441,3	515	588,4	661,9	735,5	548,56
80	784,53	372,652	470,7	549	627,6	706,1	784,53	585,13
85	833,56	395,943	500,1	583	666,9	750,2	833,56	621,70
90	882,60	419,234	529,6	618	706,1	794,3	882,6	658,27

Analizando los datos obtenidos en el rango del peso corporal el promedio de personas que trabajan en el sistema de corte promedio es de 70 kg que representa un peso 686,46 N resultando un porcentaje de levantamiento promedio d 511,99 N esta fuerza es la necesaria para poder realizar el corte del fruto de la palma africana según la Tabla 20

Tabla 21

Muestra radios del tallo del fruto de la africana [mm]

Muestras radios de tallo de palma africana [mm]			
Plantación entre 1-3 años	Plantación entre 3-5 años	Plantación entre 5-8 años	Plantación entre 8 a 12 años
25	34,4	39,5	43,2
26,4	36,2	37,6	43,6
27,2	40,2	39,6	45,6
25,2	29,7	42,5	44,8
28,6	38,7	38,7	44,7
29,4	37,7	36,7	48,5
32,1	40,1	35,1	48,6
27,8	35,7	38,4	44,5
30,1	40,3	34,2	48
26,8	38	39,3	44,3
27,86	37,1	38,16	45,58

Para calcular el esfuerzo que se realiza en el corte se tiene la donde se calcula el área del tallo total en el rango de la plantación de 1-5 años respecto a los datos de la Tabla 21

$$A = \pi * r^2$$

Primero se calcula el promedio de los radios del tallo del fruto de la africana

$$r_{promedio} = \frac{27,86mm + 37,1mm}{2} = 32,48 mm$$

$$A = \pi * (32,48mm)^2$$

$$A = 3314,22 mm^2$$

Datos:

F= 511,99 N

Área del tallo del fruto= 3314,22 mm²

El cálculo del esfuerzo es igual:

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

$$\tau = \frac{511,99 \text{ N}}{3314,22 \text{ mm}^2} = 0,1535 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

A continuación, se presenta la alternativa ganadora del módulo de potencia y datos técnicos del motor élite en la Tabla 22

Tabla 22

Datos técnicos del motor marca élite [65].

Motor	2 tiempos
tipo	1E40F-5
Potencia	43 cc
Desplazamiento	42,7 cc
Máxima Potencia	1,47 kW / 7000 rpm
Peso Neto	10,5 kg
combustible del tanque	1,2 L

A partir de estos datos que serán tomados en cuenta para poder diseñar la caja reductora de la cuchilla, como es el tipo de engranajes que serán determinados para el sistema de movimiento de corredera-piñón.

Además, para el mecanismo de corte de fruto de palma africana se implementa un eje flexible que transmite la misma potencia del motor y permite al operario ubicar el motor en el espaldar para una mejor distribución de cargas de pesos de los elementos que conforman el sistema de corte.



Figura (3-26). Eje flexible [66]

3.7 Cálculos diseño piñón-corredera

En base al diagrama de la Figura (3-27) se toma en cuenta las variables a considerar para el cálculo del módulo de la corredera.

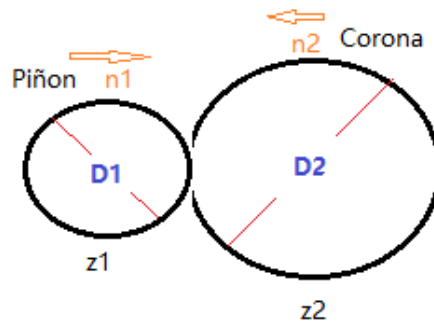


Figura (3-27). Diagrama Piñón-corredera

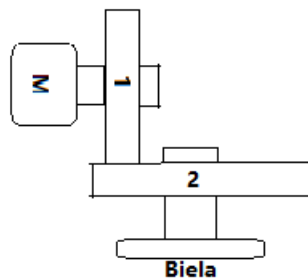


Figura (3-28). Diagrama Piñón-corredera vista lateral

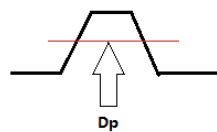


Figura (3-29). Diagrama Diámetro primitivo del diente

Para el diseño de la caja reductora se seleccionó una corredera-piñón las cuales se tiene los siguientes datos:

Para la corredera:

$$D_e = 72 \text{ [mm]}$$

$$D_i = 40 \text{ [mm]}$$

$$Z = 56 \text{ dientes}$$

$$h = 3 \text{ [mm]}$$

Donde:

D_e = Diámetro exterior de la corredera [mm]

D_i = Diámetro interior de la corredera [mm]

Z = Número de dientes de la corredera

Para el piñón:

$$D_{ep} = 20 \text{ [mm]}$$

$$D_{ip} = 0,8 \text{ [mm]}$$

$$Z_p = 14 \text{ dientes}$$

Donde:

D_{ep} = Diámetro exterior del piñón [mm]

D_{ip} = Diámetro interior del piñón [mm]

Z_p = Número de dientes del piñón

Fórmulas

$$M_a = \frac{M}{\cos \alpha} = \frac{D_p}{N}$$

$$M_a = \frac{D_p}{N} = \frac{57 \text{ mm}}{56 \text{ dientes}} = \mathbf{1,02 \text{ mm/dientes}}$$

$$P_a = \frac{Pr}{\cos \alpha} = \frac{D_p * 3,1416}{N}$$

$$P_a = \frac{D_p * 3,1416}{N} = \frac{1,02 * 3,1416}{56} = 0,057 \text{ [mm]}$$

$$Pr = \frac{Pa}{\cos \alpha} = 3,1416 * M$$

$$Pr = 3,1416 * M = 3,1416 * 1,38 = 4,3354$$

$$h = 2,167 * M$$

$$3 \text{ mm} = 2,167 * M$$

$$M = 1,38 = 1$$

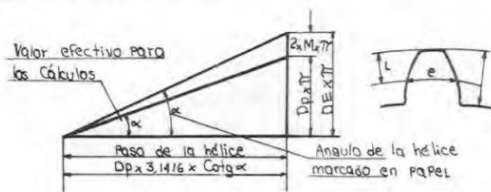


Figura (3-30). Trazado para determinar el ángulo de hélice [67]

M= Módulo normal o real

Ma= Módulo del paso circunferencial aparente $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dientes}} \right]$

Pr= Paso real o normal [mm]

Pa= Paso aparente [mm]

Dp= Diámetro primitivo [mm]

De= Diámetro exterior [mm]

h= Altura del diente [mm]

P= Paso de la hélice [mm]

N= Número de dientes

NF= Número de dientes ficticio para elegir la fresa (si se talla en fresadora universal)

Para la transmisión entre los ejes paralelos con engranajes helicoidales se tiene un ángulo

normal de presión de 30° según la Figura (3-31) se tiene:

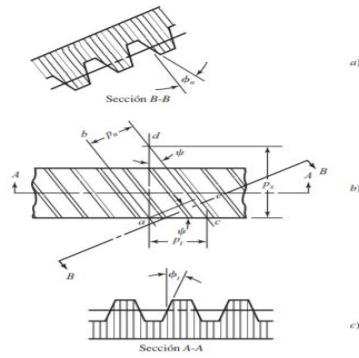


Figura (3-31). Engranaje Cónico helicoidal [68].

Para calcular el ángulo de hélice (α) donde se despeja la siguiente fórmula:

$$d = \frac{N}{Pt} = \frac{56}{6 \text{ mm}} = 9,33 \text{ mm}$$

$$pt = \frac{\pi}{Pt} = \frac{\pi}{6 \text{ mm}} = 0,52 \text{ mm}$$

$$Px = \frac{pt}{\tan \omega}$$

$$2,167 = \frac{0,52}{\tan \omega}$$

$$\omega = \tan^{-1} \frac{0,52}{2,167}$$

$$\omega = 13,49^\circ$$

$$Pn = \frac{Pt}{\cos \omega} = \frac{6}{\cos (13,49)} = 6,17$$

$$\phi t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi n}{\cos \omega} \right)$$

$$\phi t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 30^\circ}{\cos(13,49)} \right)$$

$$\phi t = 30,7^\circ$$

Donde:

d = Diámetro de paso [mm]

p_t = Paso circular transversal [mm]

P_t = Paso diametral transversal [mm]

P_x = Paso axial [mm]

ω = Ángulo de la hélice [grados]

ϕ_n = Ángulo normal presión [grados]

ϕ_t = Ángulo de presión transversal [grados]

Para relacionar la velocidad y potencia con la que estarán sometidos se tiene un piñón helicoidal con un ángulo de paso normal de 30° , de 14 dientes y con un ángulo de la hélice de $13,49^\circ$ a la derecha que gira a 1200 rpm transmite 1 hp a una corona helicoidal de 56 dientes. El paso diametral es de 6 dientes/mm el ancho de la cara es 57 mm a partir de estos datos se determinará los factores de seguridad de los engranes en flexión, la velocidad en la línea de paso y la fuerza transmitida.

Para los engranes helicoidales, el paso diametral se calcula:

$$P_t = P_n \cos \omega = 6 \cos 30 = 5,196 \text{ dientes/mm}$$

En este caso, los diámetros de paso son:

$$D_p = \frac{N_p}{P_t} = \frac{14}{5,196} = 2,69 \text{ mm}$$

$$D_G = \frac{N_p}{P_t} = \frac{56}{5,196} = 10,77 \text{ mm}$$

Para la velocidad en la línea de paso y la fuerza transmitida se tiene:

$$V = \frac{\pi * d_p * N_p}{12} = \frac{\pi * 2,69 \text{ mm} * 1200 \text{ rpm}}{12}$$

$$V = 845,08 \text{ mm/min}$$

$$Vg = \frac{\pi * dg * Np}{12} = \frac{\pi * 10,77mm * 1200rpm}{12}$$

$$V = 3383.49 \text{ mm/min}$$

$$Wf' = \frac{33000(Hp)}{V} = \frac{33000(1)}{845,08} = 39,05 \text{ kgf}$$

$$Wg' = \frac{33000(Hp)}{V} = \frac{33000(1)}{3383.49} = 9,75 \text{ kgf}$$

Entonces con estos datos obtenidos la potencia que transmitirá la caja reductora en la cuchilla de corte.

$$Hf = \frac{|Wf'| * Vf}{33000} = \frac{|39,05| * 845,08}{33000}$$

$$Hf = 1 \text{ hp}$$

Donde:

Dp= Diámetro de paso piñon [mm]

Dg= Diámetro de paso corona [mm]

V= Velocidad en la línea de paso $\left[\frac{mm}{min}\right]$

W'= Carga transmitida [kgf]

Wf= Carga transmitida en el piñón [kgf]

Wg= Carga transmitida en la corona [kgf]

Hf= Potencia [hp]

3.8 Identificación de Sistemas

Cuando no se conoce la parte física, los componentes internos y los parámetros de la planta lo que se hace es una identificación del sistema también conocido como caja negra para este proceso los datos que se necesita conocer cuáles son las señales de entradas y las señales de salidas, esta puede ser generada en una tabla de datos obteniendo valores reales del funcionamiento del comportamiento del proceso. Para la realización de esto se tiene dos métodos en Matlab: Identificación de sistemas y mínimos cuadrados [69].

Para la caracterización del sistema del exoesqueleto se emplea la identificación a través de Matlab ya que el enfoque no es sacar el modelo matemático sino realizar el control del sistema con los datos de entrada y salida que se adquiere, pero si se puede adquirir este modelo si lo desea.

3.8.1 Adquisición de Datos

Para la adquisición de datos se realiza a través de la conexión del Arduino y el PLX-DAQ_R2 de Excel, esta herramienta lo que hace es llamar las variables de entradas y salidas que se obtiene en el momento de funcionamiento del sistema y crear una tabla de datos, con esto se logra la identificación del sistema con la herramienta de Matlab y se genera la función de transferencia para ser controlada como se muestra a continuación en la Figura (3-32).

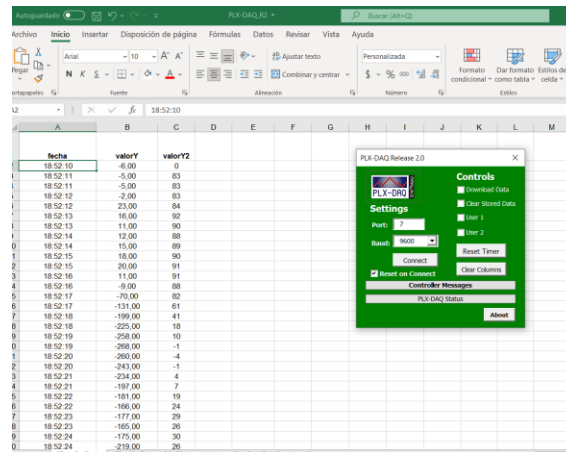


Figura (3-32). PLX DAQ_R2 EXCEL

3.8.2 Diseño eléctrico y electrónico

Dentro del diseño se utilizará cable AWG22- AWG20 tipo estándar UL1007 y el cable UTP los parámetros están definidos a continuación en la Tabla 23

Tabla 23

Características técnicas selección de cables

Tipo de cable	Voltaje	Corriente	Temperatura
22 AWG PVC	12-24 VDC	1A	80°C
24 AWG PVC	12-24 VDC	2.2 A	80°C

Para la alimentación tanto para el módulo del control de los servomotores es necesario el uso de una fuente externa, para ello se implementará un cargador con celdas solares que tiene dos salidas de 5v y corriente de un 1A, según se detalla el circuito siguiente de la Figura (3-33), este estará siendo parte de la fuente de alimentación externa.

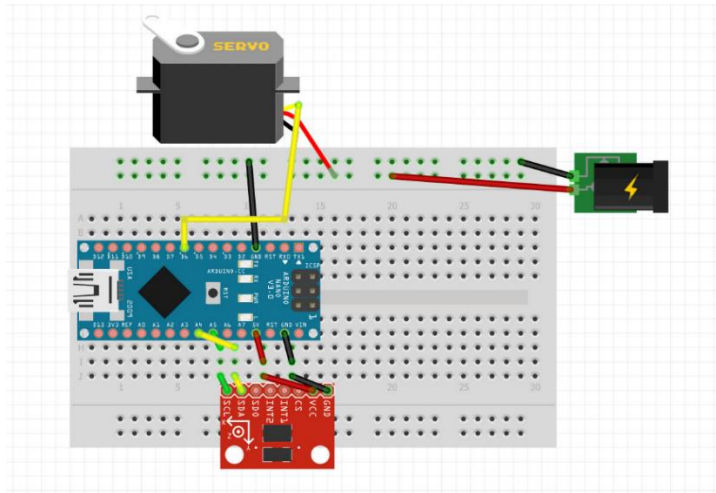


Figura (3-33). Diagrama de conexiones de fases: De percepción y procesos de datos

3.8.3 Conexión de Sensores y actuadores

Los sensores y actuadores por utilizar se enlistan en la siguiente Tabla 24

Tabla 24

Sensor y Actuador por implementar

Nombre	Tipo de Señal	Pin de Arduino	Señal a Detectar
Acelerómetro ADXL345	interfaz digital I2C.	A4, A5	Posición [grados]
Servomotor MG996R 12kg	Salidas PWM y digital	4,5,6,7	Grados

Estos sensores y actuadores se controlan por el microcontrolador que se encuentra implementado en la PCB diseñada mostrada en la sección de anexos.

Los diagramas están definidos por cada eslabón del movimiento del exoesqueleto, las cuales tienen los mismos elementos a implementar, es decir su sistema eléctrico no cambia no cambia, por cada brazo se diseña dos sistemas idénticos uno para el hombro y el otro para el codo, las conexiones están mostradas en el diagrama eléctrico PCB, es de fácil montaje e implementación.

3.8.5 Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento

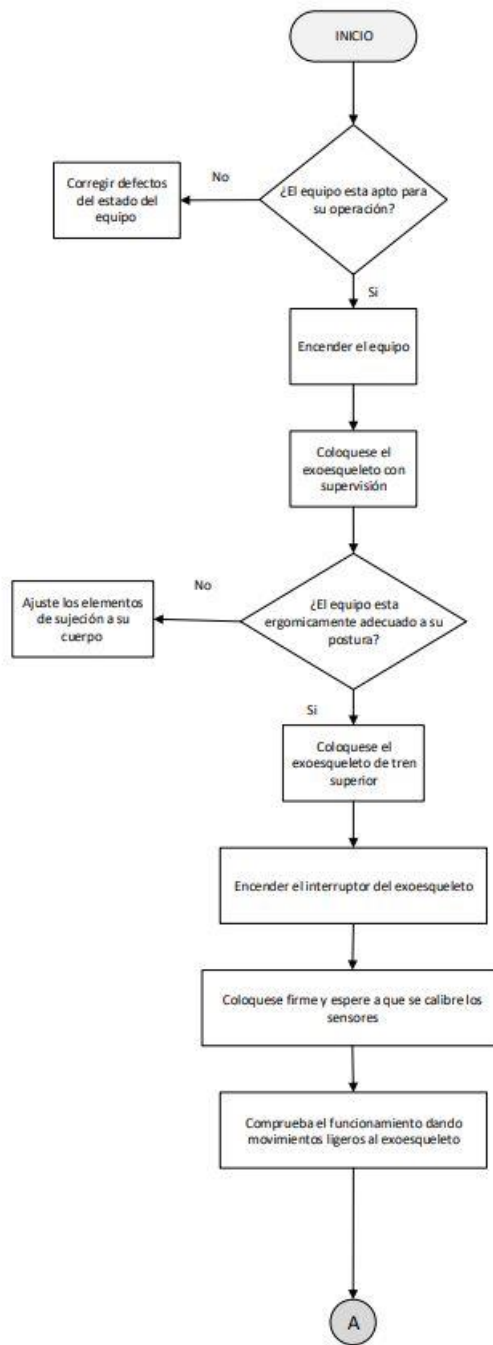


Figura (3-34). Diagrama de flujo funcionamiento Parte 1.

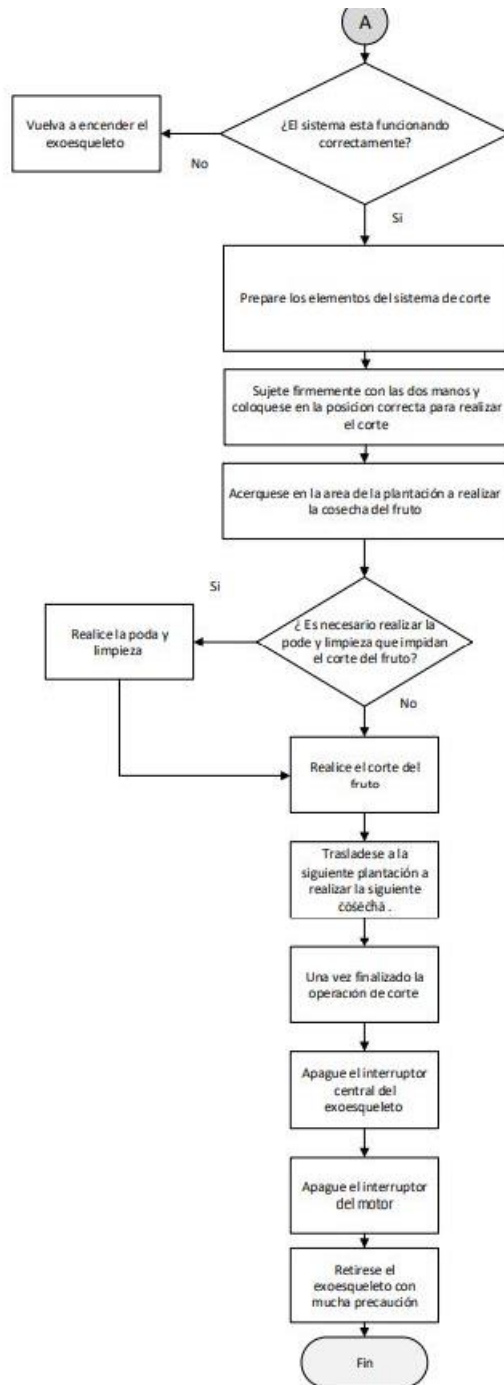


Figura (3-35). Diagrama de flujo funcionamiento Parte 2.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

El objetivo de este capítulo es obtener el exoesqueleto en físico que cumpla con los requisitos funcionales de la biomecánica, dimensiones características, antropometría y que cumpla con las funciones principales que se han descrito en los anteriores capítulos.

4.1 Manufactura y Ensamble

4.2 Secuencia para la construcción del exoesqueleto.

Tabla 25

Secuencia de construcción del exoesqueleto

SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN		
<i>Proceso</i>	<i>Tareas</i>	
O P E R A C I O N E S D E P R O C E D I M I E N T O	Obtención de materia prima	2.28 m de Perfil redondo 3/4"*1,10 ASTM-36 0,34 m de Perfil cuadrado 30mm*0,75 ASTM-36
	Estereolitografía de piezas	Impresión resina 3D base principal x
		Impresión resina 3D soportes para rodamientos
		Impresión resina 3D abrazadera tubo
		Impresión resina 3D soporte cabeza
		Impresión resina 3D soporte servomotor
		Impresión resina 3D soporte bisagra
		Impresión de filamentos cara caja reductora
	Impresión de filamentos base caja reductora	
	Doblado de perfil redondo	Brazo Espalda-hombro
		Brazo hombro
		Estructura mochila
	LBC (Corte por haz láser)	Eslabón hombro espaldar
		Eslabón codo
		Cuchilla
		Base motor
	Recubrimiento	Tapizado de piezas
	Soldadura	Perfil triangular en estructura mochila
		Base motor-base estructura mochila

E N S A M B L E	Ensamble mecánico	Perfil cuadrado- base principal x
		soporte para rodamientos -soporte bisagra
		Soporte cabeza-perfil cuadrado
		Perfil redondo Hombro Espaldar- codo
		Eslabón Hombro Espaldar-codo
	Ensamble eléctrico	Servomotores-soportes hombro espaldar
		Servomotores -eslabones codo
		Cargador Solar-soporte cabeza

a. Operaciones de Procedimientos

4.2.1 Proceso de Obtención de materia prima

Los materiales utilizados para la estructura del exoesqueleto son perfiles normalizados, su dimensionamiento fueron determinados a partir de un análisis de esfuerzos para establecer su espesor y diámetro, se implementa perfiles de material de acero ASTM-36 redondos y rectangulares destinados a la construcción.

4.2.2 Proceso de Estereolitografía de piezas

Se realizo impresión en 3D de las piezas soportes de los perfiles en una impresora 3D SLA con cartucho resina Tough 2000 este material está dirigida a prototipos robustos y resistentes, por la complicación de las piezas por mecanizado se obtuvo por este proceso.



Figura (4-1). Proceso de Estereolitografía de piezas



Figura (4-2). Estereolitografía de base principal x

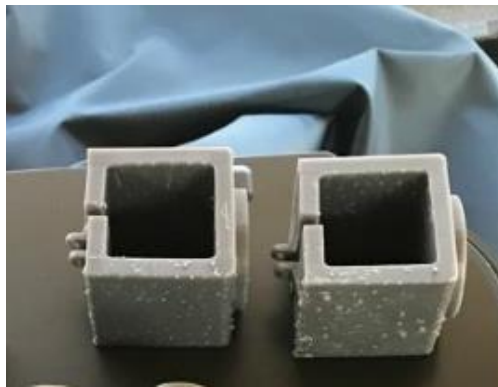


Figura (4-3). Estereolitografía soportes para rodamientos



Figura (4-4). Estereolitografía soporte bisagra



Figura (4-5). Estereolitografía soporte cabeza



Figura (4-6). Estereolitografía soporte servomotor

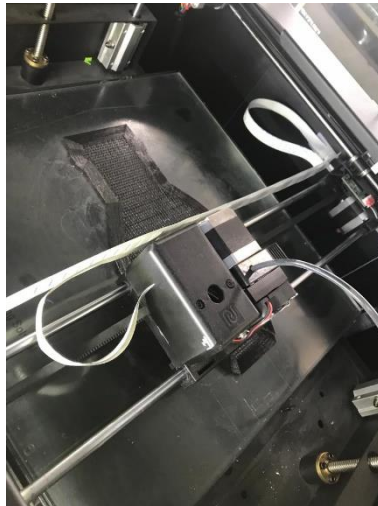


Figura (4-7). Estereolitografía base caja reductora

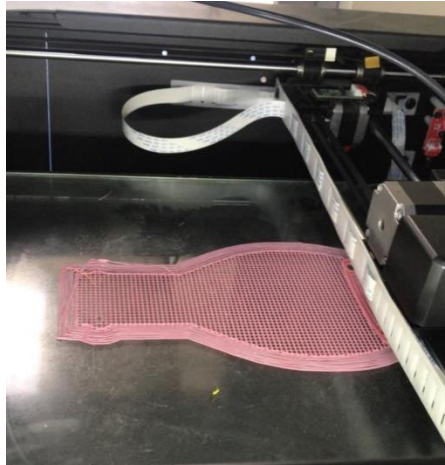


Figura (4-8). Estereolitografía caja reductora

4.2.3 Proceso de Doblado de perfil redondo

En los brazos del exoesqueleto se tiene piezas con ángulos 90° de doblez para ello se utilizó una herramienta dirige a doblar tubería, donde se tomó en cuenta las dimensiones correspondientes.



Figura (4-9). Doblado estructura de mochila exoesqueleto

4.2.4 Proceso de LBC (Corte por haz de laser)

Se realizo el corte por haz de laser para los eslabones de hombro codo y antebrazo en material acrílico con un espesor de 4mm para ello se tomó en cuenta los parámetros de corte para lograr un corte limpio. Además, se realizó el corte de la cuchilla se tomó una plancha de acero ASTM-36 de 3mm.

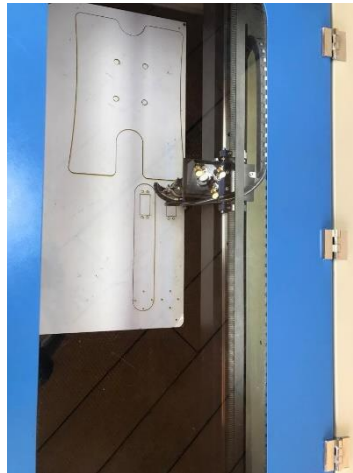


Figura (4-10). LBC de piezas



Figura (4-11). LBC de piezas (Base Espalda, Eslabones brazo)



Figura (4-12). LBC de Cuchilla

4.2.5 Proceso de Recubrimiento

Para el proceso de recubrimiento se lo realizo en la mochila del exoesqueleto y los eslabones del brazo, estas piezas deben ofrecer ergonomía al operario para ello se tomó en cuenta el material y el tipo de recubrimiento dependiendo en la parte del cuerpo a ser utilizada.



Figura (4-13). Recubrimiento Eslabón Hombro



Figura (4-14). Recubrimiento Eslabón Codo



Figura (4-15). Recubrimiento Espaldar mochila

4.2.6 Proceso de Soldadura

En la estructura de la mochila del exoesqueleto se tiene dos puntos de soldadura, y además se agrega un nervio en estos puntos para mejorar la resistencia de la base donde va ubicado el motor.



Figura (4-16). Soldadura puntos estructura de mochila



Figura (4-17). Soldadura base motor



Figura (4-18). Soldadura eje motor

b. Operaciones de Ensamble

4.3 Ensamble Mecánico

El ensamble final está compuesto por piezas de acero ASTM-36, piezas con material acrílico y las piezas de impresión en 3D y los servomotores con sus respectivas tarjetas de control y su fuente de alimentación que será destinada a un cargador portátil con celdas solares.

Los elementos utilizados para la fijación de las piezas son pernos, anillos de seguridad y rodamientos SKF.



Figura (4-19). Ensamble conjunto base exoesqueleto



Figura (4-20). Ensamble conjunto brazos exoesqueleto

4.4 Ensamble Eléctrico

Para el montaje de los servomotores en el brazo hombro-espaldar se diseñó un soporte en impresión 3D, además en las sujeciones de los eslabones se realizó el respectivo diseño para su montaje.

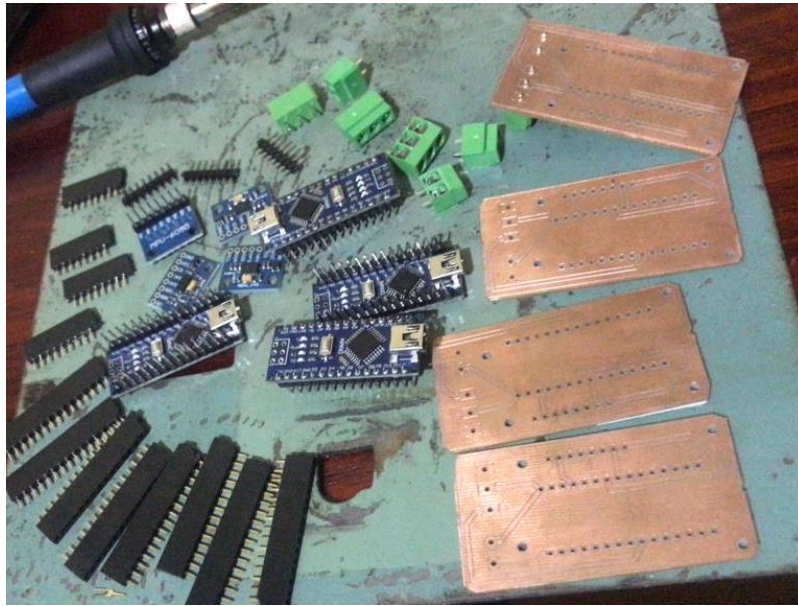


Figura (4-21). Ensamble conjunto circuito eléctrico

4.5 Desarrollo del sistema de control

En este apartado se desarrolla el sistema de control para la ejecución del movimiento del exoesqueleto por medio de adquisición de datos y control de señales con Matlab y Arduino y la implementación de los componentes mencionados en el capítulo 3.

4.5.1 Percepción del Entorno.

- a. Adquisición de señal del acelerómetro ADXL345

Para la adquisición de las señales para el movimiento del exoesqueleto se utilizó un acelerómetro ADXL345 individual para cada eslabón del exoesqueleto su funcionamiento está basado en el movimiento de tres ejes independientes que detecta la aceleración en los ejes X, Y, y Z, y además permite obtener la orientación del sensor,

obteniendo señales en relación con la fuerza de la gravedad, permitiendo el control del desplazamiento de los ejes del eslabón brazo y antebrazo. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

1. Realizar la conexión entre la tarjeta Arduino uno y el acelerómetro ADXL345 por comunicación I2C.
2. Para la adquisición de datos de giro en grados entorno al eje y, se realiza un escalonamiento de señal, la variable de entrada son valores entre el intervalo de $[\pm 255]$, esto depende de la posición de colocación del acelerómetro como se muestra en la Figura (4-22).

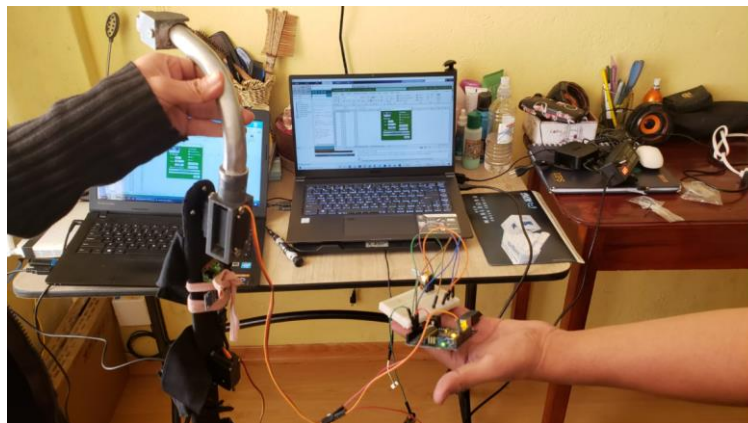


Figura (4-22). Adquisición de datos de entrada y salida del sistema

3. Con los valores obtenidos en la toma de datos por medio de la herramienta de Excel se genera una tabla de los valores de entrada y salida del comportamiento del acelerómetro para ello se tomó datos en diferentes computadoras ya que este programa no puede recibir dos señales al mismo tiempo.

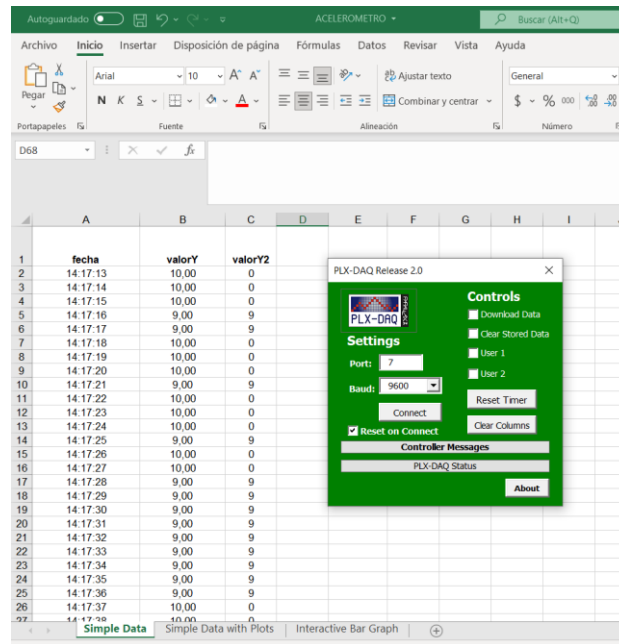


Figura (4-23). PLX-DAQ_R2 de Excel

4. Como muestra la Figura (4-23) de los datos del comportamiento del acelerómetro, se ingresa las columnas en forma de vector fila en Matlab para generar una identificación del sistema y encontrar la función de transferencia.
5. Una vez se tiene los valores de entrada y salida se manda a llamar a la función “ident” en Matlab para generar la gráfica e identificar una aproximación de la función de transferencia del sistema. Se importa los datos con un tiempo de inicio de 0s y un tiempo de muestreo de 0.1s este valor definido entre el tiempo de muestreo y el número de muestras.

Para la obtención de esta gráfica se utilizó una estimación de 2 números de Polos y 2 número de ceros, dando el progreso de identificación de planta con un 88,41% de aproximación, con estos se genera la función de transferencia que se la importa como dato a Matlab para poder ser controlada la señal del hombro.

En la identificación de la planta se obtiene la siguiente función de transferencia referente al comportamiento del hombro.

$$Ft_{hombro} = \frac{0.6547 s + 0.22}{s^2 + 0.5244 s + 0.2167}$$

Con esta función de transferencia se realiza el cálculo de los parámetros de control en la herramienta de Matlab.

6. Se programa la función de transferencia con el código de “sisotool” esto crea compensadores, muestra el diagrama de bode y como están ubicados los polos en la gráfica de la función de transferencia.

En esta herramienta se tiene la opción de poder diseñar un método de control, además muestra el estado de la señal en los diagramas de bode y como se encuentran ubicados los polos y ceros.

En el PID Tunig se realiza el diseño de control dependiendo lo que requiero para el sistema, para el control del movimiento del exoesqueleto se aplica un PID, obteniendo los valores del compensador de la señal que se aplica a la señal de la función de transferencia obtenida para su establecimiento.

7. Se exporta el valor C del compensador que se obtuvo en el diseño a las variables de Matlab, una vez se obtuvo el dato, con el código “feedback” es un procedimiento que ayuda a mejorar el comportamiento de una planta para el diseño de un sistema de control de retroalimentación y así obtener la respuesta deseada en este caso relaciona la función de transferencia con la del compensador con una ganancia de k=1.
8. Con este proceso se obtiene la señal controlada en relación con la señal de la función de transferencia como se muestra en la siguiente figura (4-33).

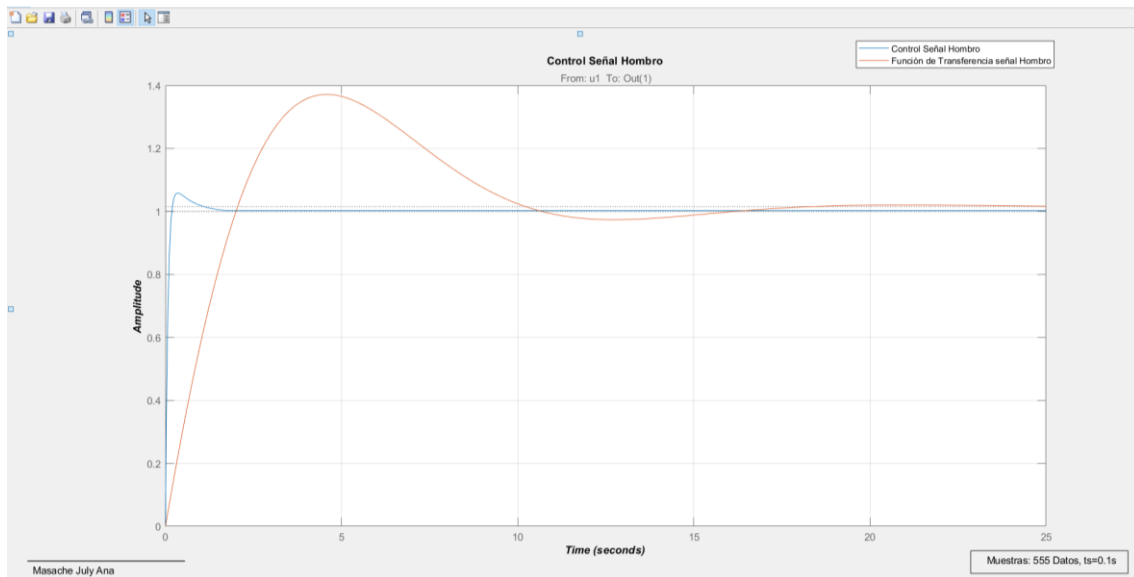


Figura (4-24). Gráfica señal controlada del hombro

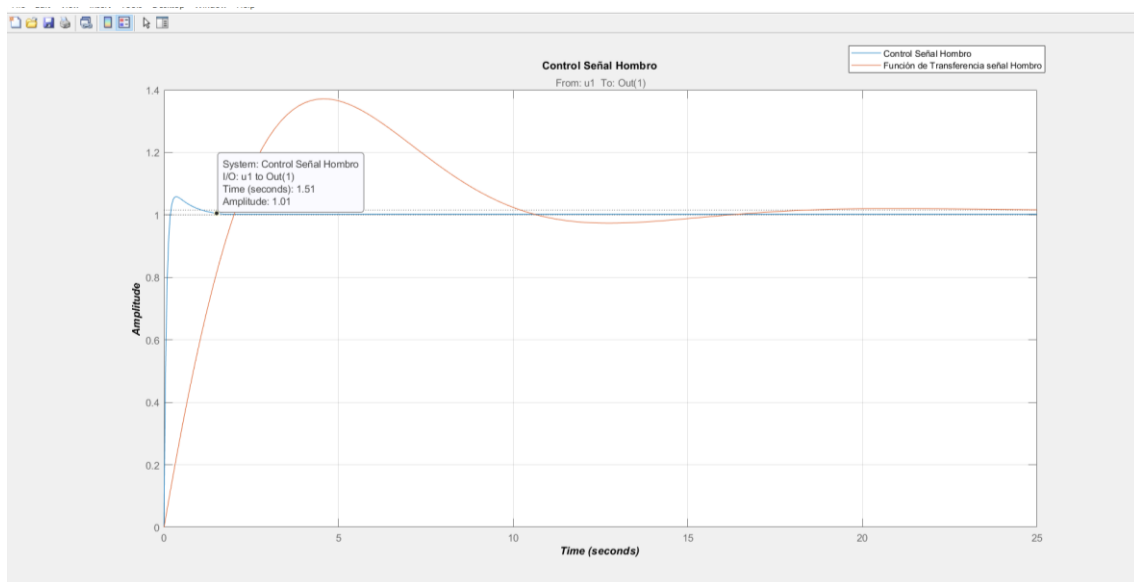


Figura (4-25). Gráfica señal tiempo de establecimiento del hombro

Los resultados obtenidos como muestran la Figura (4-24) y Figura (4-25) en la gráfica de control del hombro, según el análisis transitorio se obtiene un sobrepaso máximo (M_p) de 0,02. Además, un tiempo de asentamiento (T_s) de 1,51s, lo cual hace que el sistema se controle y se establezca rápidamente, el tiempo de retardo (T_d) de 0,130s, así mismo, un tiempo de levantamiento (T_r) de 0,26s y un tiempo pico (T_p) de 0,687s, concluyendo que con estas variables la señal de control es óptima para los parámetros obtenidos de K_d , K_p

y Ki que serán implementados para el controlador, y finalmente la señal controlada es estable en el tiempo.

9. Con la fórmula del compensador generada con el sisotool, se descifra las variables del PID que son KD, Kp y Ki para la aplicación del control en el Arduino.

```
>> C
C =
    23.366 (s+1.536)
    -----
           s
Name: C
Continuous-time zero/pole/gain model.
```

Figura (4-26). Ecuación del Compensador del hombro

Con esta ecuación tenemos la representación de las variables a continuación:

$$C = \frac{KDs^2 + Kps + Ki}{s}$$

$$C = \frac{23.366 (s + 1.536)}{s}$$

$$C = \frac{23.366 s + 35.8902}{s}$$

$$\mathbf{KD= 0; Kp=23.366 ; Ki=35.8902}$$

Una vez obtenidos los parámetros del control PID se implementa en Arduino con la librería correspondiente para el sistema de control.

Asimismo, se realiza la adquisición de datos de la señal del codo realizando los mismos pasos anteriormente mencionados, obteniendo así los siguientes resultados.

Se importa los datos con un tiempo de inicio de 0s y un tiempo de muestreo de 0.1s este valor definido entre el tiempo de muestreo y el número de muestras.

En la identificación de la planta se obtiene la siguiente función de transferencia referente al comportamiento del codo.

$$Ft_{codo} = \frac{0.9368 s^2 + 0.2425 s + 0.06637}{s^2 + 0.1736 s + 0.06543}$$

Con esta función de transferencia se realiza el cálculo de los parámetros de control en la herramienta de Matlab.

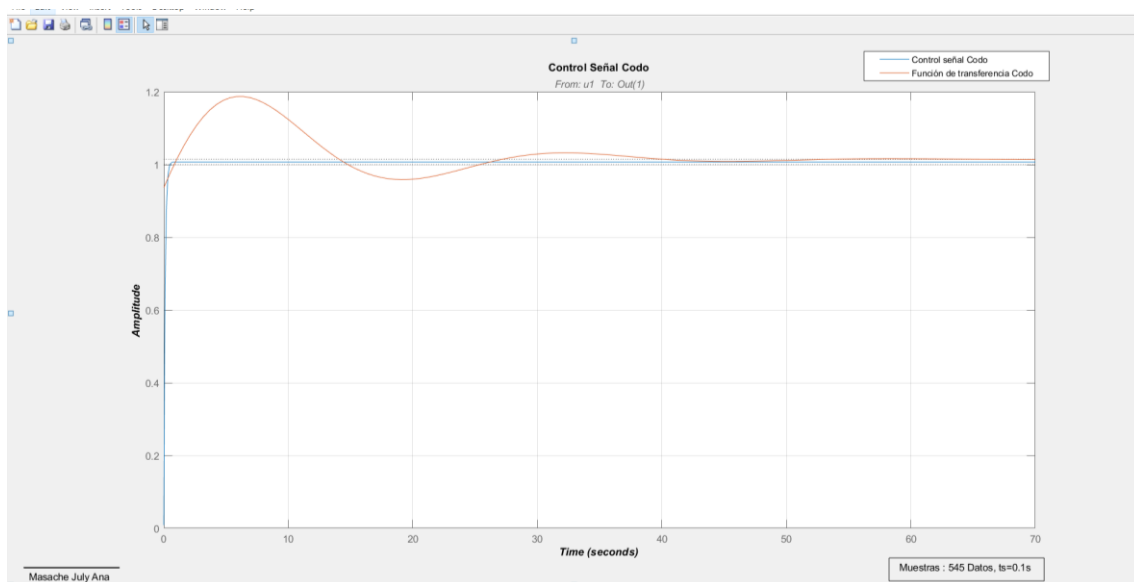


Figura (4-27). Gráfica señal controlada del codo

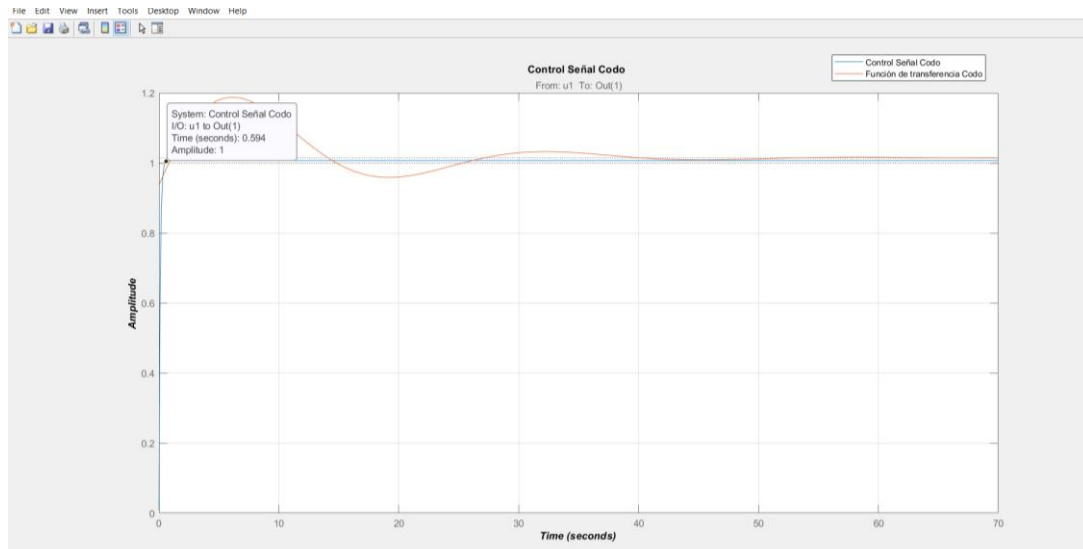


Figura (4-28). Gráfica señal tiempo de establecimiento del codo

Los resultados obtenidos como muestran la Figura (4-27) y Figura (4-28) en la gráfica de control del codo, según el análisis transitorio se obtiene un sobrepaso máximo (M_p) de 0,01. Además, un tiempo de asentamiento (T_s) de 0.594s, lo cual hace que el sistema se controle y se establezca rápidamente, el tiempo de retardo (T_d) de 0,120s, así mismo, un tiempo de levantamiento (T_r) de 0,239s y un tiempo pico (T_p) de 0,734s, concluyendo que con estas variables la señal de control es óptima para los parámetros obtenidos de K_d , K_p y K_i que serán implementados para el controlador, y finalmente la señal controlada es estable en el tiempo.

Con esta ecuación se tiene la representación de las variables a continuación:

$$C = \frac{KDs^2 + Kps + Ki}{s}$$

$$C = \frac{0.0095269 (s + 1070)}{s}$$

$$C = \frac{0.0095269 s + 10.19378}{s}$$

KD= 0; Kp=0. 0095269; Ki=10. 19378

Para la implementación del PID, se lo hace en Arduino donde se implementa la librería PID que ya se cuenta en las herramientas de Arduino, se programa las variables de los parámetros a las señales correspondientes a cada eslabón para obtener un tiempo de establecimiento más inmediato a continuación se muestra los códigos de implementación.

Con estos valores se implementa el control del sistema del exoesqueleto donde se verifica su respectivo funcionamiento en la implementación y comprobación.

Para un mejor entendimiento se adjunta en anexos, el diagrama de flujo de programación.

CAPÍTULO 5

Prueba y Análisis de Resultados

En este capítulo se mostrará las pruebas y resultados para la comprobación del correcto funcionamiento del exoesqueleto y verificar que cumpla los requerimientos de diseño donde se realiza rangos de movimiento en flexo-extensión del hombro y del codo y determinar los porcentajes de precisión y error.

5.1 Rango de Movimientos

En las pruebas de rango de movimiento se va a aplicar los rangos establecidos para cada segmento en el movimiento de flexión y extensión, el rango del hombro es de 0 a 120° y el del codo de 0 a 110° como se muestra en la Tabla 26

Tabla 26

Rango de Movimiento Flexión

ÁNGULO	FLEXIÓN CODO	ANGULO	FLEXIÓN HOMBRO
0-110°	1	109,54	118,48
	2	110,34	120,34
	3	110,53	119,90
	4	110,20	119,89
	5	109,89	120,20
Promedio	110,10		119,76



Figura (5-1). Flexión del Codo

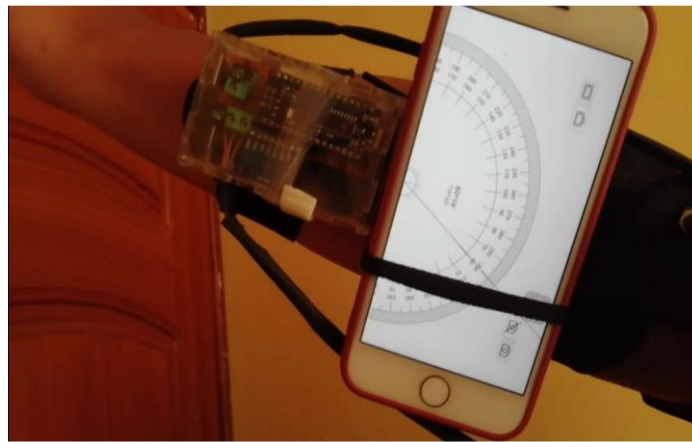


Figura (5-2). Flexión del Hombro

Con los datos obtenidos se concluye que el margen de error en el rango de movimiento de flexión es mínimo con 110, 10° respecto a la flexión del codo y 119, 76° respecto a la flexión del hombro, con estos valores el sistema de movimiento va bien y no se encuentra problemas de altos rangos de porcentaje de error.

Tabla 27

Rango de Movimiento Extensión

ÁNGULO	EXTENSIÓN CODO	ÁNGULO	EXTENSIÓN HOMBRO
110°-0	1	120°- 0	0,80
	2		0,90
	3		0,20
	4		0,70
	5		0,20
Promedio	0,30	0,56	



Figura (5-3). Extensión del codo y del hombro

Los datos obtenidos en el rango de movimiento de extensión del codo con un porcentaje 0, 30° y en la extensión del hombro con un porcentaje de 0, 56° respecto a la posición inicial igual a 0° el valor es mínimo respecto al error.

5.2 Prueba de Precisión

En la prueba de precisión se realiza movimientos de flexo-extensión, se calcula el porcentaje de error de precisión en los rangos detallados a continuación en la Tabla 28

Tabla 28

Rango de Movimiento Flexo-extensión codo

ÁNGULO		FLEXO-EXTENSIÓN CODO [°]
0-30°	1	29,80
	2	30,00
	3	30,20
	4	29,80
	5	30,30
	Promedio	30,02
30°-60°	1	60,40
	2	60,30
	3	60,80
	4	60,59
	5	60,60
	Promedio	60,54
60°-90°	1	90,40
	2	91,20
	3	90,18
	4	90,43
	5	90,54
	Promedio	90,55
90°-100°	1	100,00
	2	101,80
	3	100,20
	4	100,48
	5	99,24
	Promedio	100,34
100°-110°	1	109,54
	2	111,45
	3	110,53
	4	110,00
	5	109,90
	Promedio	110,28



Figura (5-4). Movimiento de flexión del codo 30°



Figura (5-5). Movimiento de flexión del codo 60°



Figura (5-6). Movimiento de flexión del codo 90°



Figura (5-7). Movimiento de flexión del codo 110°

Para la flexión del codo se varía rangos de movimiento de 30° y entre 100° a 110°, debido que en este rango es la flexión máxima del codo y son posiciones más críticas respecto a su movimiento ya que suelen tener una mayor oscilación respecto a las demás posiciones.

Tabla 29

Rango de Movimiento Flexo-extensión hombro

ÁNGULO	FLEXO- EXTENSIÓN HOMBRO [°]	
0-30°	1	30,49
	2	29,80
	3	30,20
	4	30,50
	5	30,70
	Promedio	30,34
30°-50°	1	50,28
	2	50,12
	3	50,80
	4	49,80
	5	49,30
	Promedio	50,06
50°-75°	1	75,23
	2	74,80
	3	75,30
	4	75,80
	5	75,18
	Promedio	75,26
75°-120°	1	121,20
	2	124,00
	3	123,20
	4	121,50
	5	122,00
	Promedio	122,38



Figura (5-8). Movimiento de flexión del hombro 30°

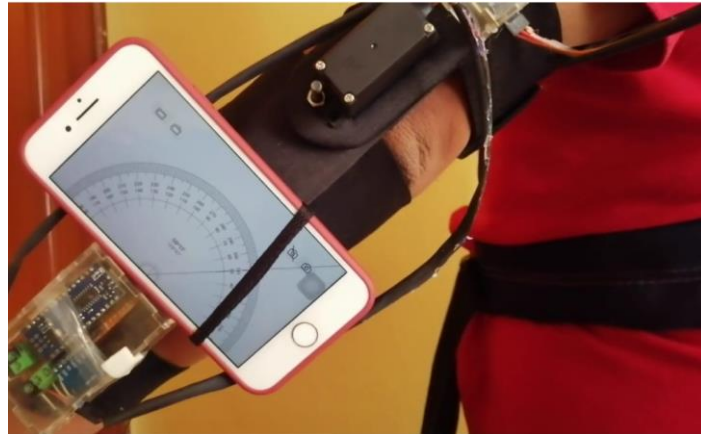


Figura (5-9). Movimiento de flexión del hombro 50°

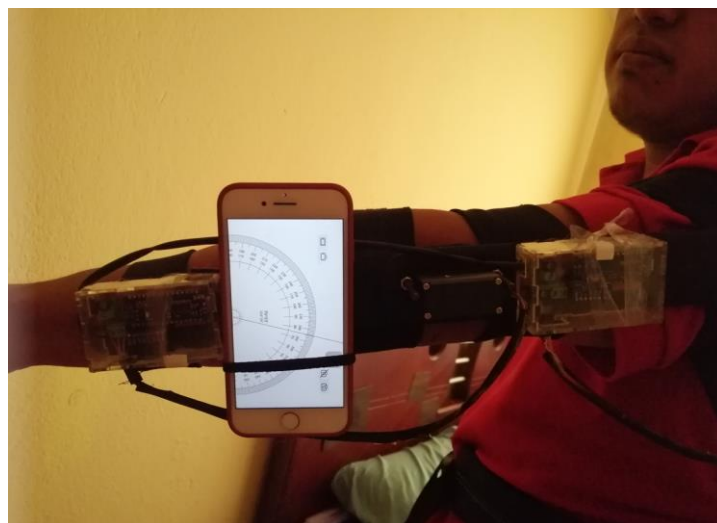


Figura (5-10). Movimiento de flexión del hombro 75°

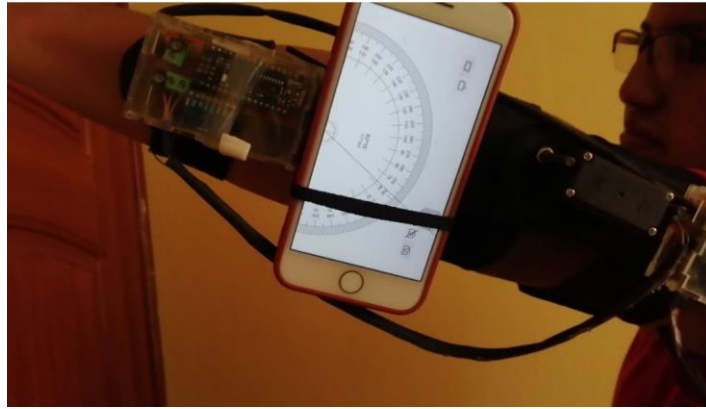


Figura (5-11). Movimiento de flexión del hombro 120°

Para el movimiento de flexión del hombro bajo los datos obtenidos se concluye que los rangos de 0° a 75° no tienen variaciones significativas teniendo un porcentaje de imprecisión de 0.3° máxima, en cambio, en el rango de movimiento crítico es de 120° siendo la posición máxima a la que el eslabón puede llegar con un porcentaje de imprecisión de 0.38°, considerando estos valores el movimiento del exoesqueleto está en los rangos deseados de los parámetros de diseño.

5.3 Tiempo de ejecución de corte

Para calcular la ejecución de corte se realizaron pruebas experimentales, donde se obtuvo los siguientes datos.

Tabla 30

Datos Experimentales del sistema de corte del fruto de palma africana

Velocidad Motor [rpm]	2160
Relación de transmisión	0,25
Velocidad Experimental [ciclo/s]	9
Recorrido [mm]	20

Tabla 31

Datos Experimentales del tiempo de ejecución del corte

Diámetro del tallo		Ciclo 1-3 años [s]	Ciclo 3-5 años [s]
Plantación entre 1-3 años	Plantación entre 3-5 años		
25	34,4	2,5	3,44
26,4	36,2	2,64	3,62
27,2	40,2	2,72	4,02
25,2	29,7	2,52	2,97
28,6	38,7	2,86	3,87
29,4	37,7	2,94	3,77
32,1	40,1	3,21	4,01
27,8	35,7	2,78	3,57
30,1	40,3	3,01	4,03
26,8	38	2,68	3,8
27,86	37,1	2,786	3,71



Figura (5-12). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado



Figura (5-13). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista posterior



Figura (5-14). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista lateral izquierda



Figura (5-15). Corte del fruto de palma africana con el sistema de corte implementado vista lateral derecha

Las figuras muestran el exoesqueleto final del sistema de corte de fruta de palma africana una vez implementado la parte mecánica y el sistema de control. El brazo exoesqueleto tiene un peso de 1kg (eslabones, servomotores, caja de control), la mochila y el motor pesan 15,1184 kg, dando así un resultado de un peso total de 18 kg del exoesqueleto.

5.4 Análisis Económico

Para realizar el análisis económico del proyecto se realizó la determinación de costos de materiales, mecanizado de las piezas y mano de obra, esto se muestra a continuación.

Tabla 32

Materiales Comerciales Ferreteros

Designación	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Perfil estructural redondo 3/4"x0.75mmx6m	1	3,76	3,76
Perfil estructural cuadrado 1/4"x1.1mmx6m	1	10,97	10,97
Plancha A36 estructural 3mm	1	5	5
Plancha Acrílico 2-4mm	2	5	10
TOTAL			\$ 29,73

Tabla 32

Materiales Normalizados

Designación	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Rodamiento KBC BR1934 19x34x6	2	10,71	21,43
Rodamiento HCH 609 09x24x7	2	1,12	2,23
Corredera	1	100	100
Piñón	1	40	40
Motor	1	75	75
eje flexible	1	85	85
Perno, tuerca y rodela M8x54mm	2	0,03	0,06
Perno, tuerca y rodela M10x20mm	2	0,04	0,08
Perno, tuerca y rodela M4x20mm	12	0,5	6
Perno, tuerca y rodela M6x100mm	2	0,5	1
Perno, tuerca y rodela M5x74mm	2	0,3	0,6
Perno, tuerca y rodela M6x74mm	2	0,3	0,6
TOTAL			\$ 332

Tabla 34

Materiales sistema eléctrico

Designación	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Arduino nano V3,0 con cable	4	8	32
Servomotores MG996R 12kg	4	11	44
Acelerómetro ADXL345	4	4,5	18
Galleta de 50x70 mm	2	0,5	1
Cables AWG22-20, UTP.	1	0,5	0,5
Cargador Solar	1	10	10
TOTAL			\$ 105,5

Tabla 35

Costos de mecanizado y recubrimiento de piezas

Designación	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Doble de los perfiles redondos 3/4'x0.75	6	1,5	9
Soldadura MIG	1	5	5
Tapicería Mochila	1	40	30
Recubrimiento eslabones	4	3,5	14
Impresión 3d Resina Tought 2000			
Impresión filamentos			
Corte Láser			
TOTAL			\$ 58

Tabla 36

Costos Otros

Otros	Precio Total (\$)
Servicio de Ensamblaje	50
Servicio de Torno	21
Ingeniera mecatrónica	500
TOTAL	\$ 571

Tabla 37

Costos totales

Designación	Precio Total (\$)
Materiales Comerciales Ferreteros	29,73
Materiales Normalizados	332
Materiales de sistema eléctrico	105,5
Costo de mecanizado y recubrimiento de piezas	58
Otros	571
TOTAL	\$ 1096,23

5.5 Valor actual neto (VAN)

Para calcular la caja de flujo del proyecto futuro se tiene un préstamo de consumo vigente desde 25 de diciembre del 2021 es equivalente a 16.77 %, valor a considerar al cálculo correspondiente, es considerado a un tiempo de plazo de 3 años la cantidad de \$1100 se muestra el flujo de caja en la Tabla 38

Tabla 38

Flujo de caja

Periodo	Cantidad
0	-13200
1	5600
2	11200

Los datos obtenidos a partir del primer producto al primer año, asumiendo que en el segundo año se venderá cuatro productos, y el tercero año ocho productos que serán destinados a las empresas que realicen actividad de producción de palma africana.

$$VAN = -13200 + \frac{5600}{1 + 0.16} + \frac{11200}{1 + 0.16}$$

$$VAN = \$1282,76$$

5.6 Tasa interna de retorno (TIR)

En esta etapa se analiza el desarrollo del equipo e inversiones, para identificar si el producto es viable, mide la factibilidad del proyecto, al calcular la rentabilidad y así mismo los pagos de inversión. En el cálculo se iguala la ecuación del VAN a cero y se realiza las operaciones que se mostrara a continuación:

$$VAN = -13200 + \frac{5600}{1+k} + \frac{11200}{(1+k)^2} = 0$$

$$TIR = 0.16 \times 100$$

$$TIR = 16\%$$

A partir de estos datos obtenidos, se concluye que el proyecto es fiable y rentable con un 16% garantizando que es viable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Tras el análisis bibliográfico se obtuvo las características técnicas necesarias para el diseño del prototipo del presente trabajo. Dentro de los materiales utilizados para la estructura del exoesqueleto se fabricó con acero ASTM 36 en conjunto con manufactura aditiva de impresión 3D. El peso final del exoesqueleto se encuentra dentro de los rangos de capacidad de carga permitidos por la Organización Internacional del trabajo con un porcentaje equivalente 80 % de la carga permitida de 25 Kg, por ende, es un exoesqueleto ergonómico pasivo que simula el movimiento de los eslabones del brazo, reduce la carga muscular producida por el trabajo y mantienen su postura.

Se diseñó un exoesqueleto para extremidad superior capaz de mantener el peso del brazo de hasta 95 N con un esfuerzo mínimo dentro de los entornos de trabajo, la estructura se basó en las medidas antropométricas de la población latina y en su biomecánica, para cumplir con los parámetros deseados del usuario para obtener como resultado un exoesqueleto ergonómico y cómodo que mejore la postura del usuario y la dirección del corte del fruto.

Se concluye que el movimiento de flexo-extensión del codo de precisión es $\pm 0.3472^\circ$ de confiabilidad que representa el 99,12% y en el movimiento flexo-extensión del hombro la precisión es $\pm 0.76^\circ$ que representa el 99,57% de confiabilidad. Además, el ciclo de corte del fruto de palma africana promedio para plantaciones de 1-3 años es de 2,786 s por tallo, y para plantaciones de 3-5 años es de 3,71 s por tallo, detallando el recorrido de 20 mm por cada golpe de la cuchilla. Adicional a esto, el exoesqueleto es capaz de moverse con dos grados de libertad, el primero en movimiento flexo-extensión en el eslabón del codo en un rango de 0-110° y el segundo en el eslabón del hombro de 0- 120°.

Recomendaciones

A pesar de que el exoesqueleto cumple de forma adecuada con la mayoría de los parámetros de diseño se recomienda implementar un sistema de torque más elevado para poder recompensar fuerzas externas que influyen en el corte.

Para optimizar el funcionamiento del exoesqueleto a futuro se recomienda investigar y diseñar distintas formas de control que se adapte a las condiciones físicas-ambientales del sistema de corte de fruto de palma africana para que el exoesqueleto trabaje en tiempo real y satisfaga los movimientos de la persona en un rango máximo de optimización.

El sistema de alimentación eléctrica del exoesqueleto requiere de una mayor duración para la jornada de cosecha de fruto de palma africana lo que afecta al periodo de trabajo y peso del sistema, por ende, se sugiere buscar un tipo de fuente de energía que optimice su capacidad y peso.

Se sugiere implementar materiales más ligeros y que cumplan con los parámetros de diseño que permitan construir una estructura más liviana y con la capacidad de carga.

REFERENCIAS

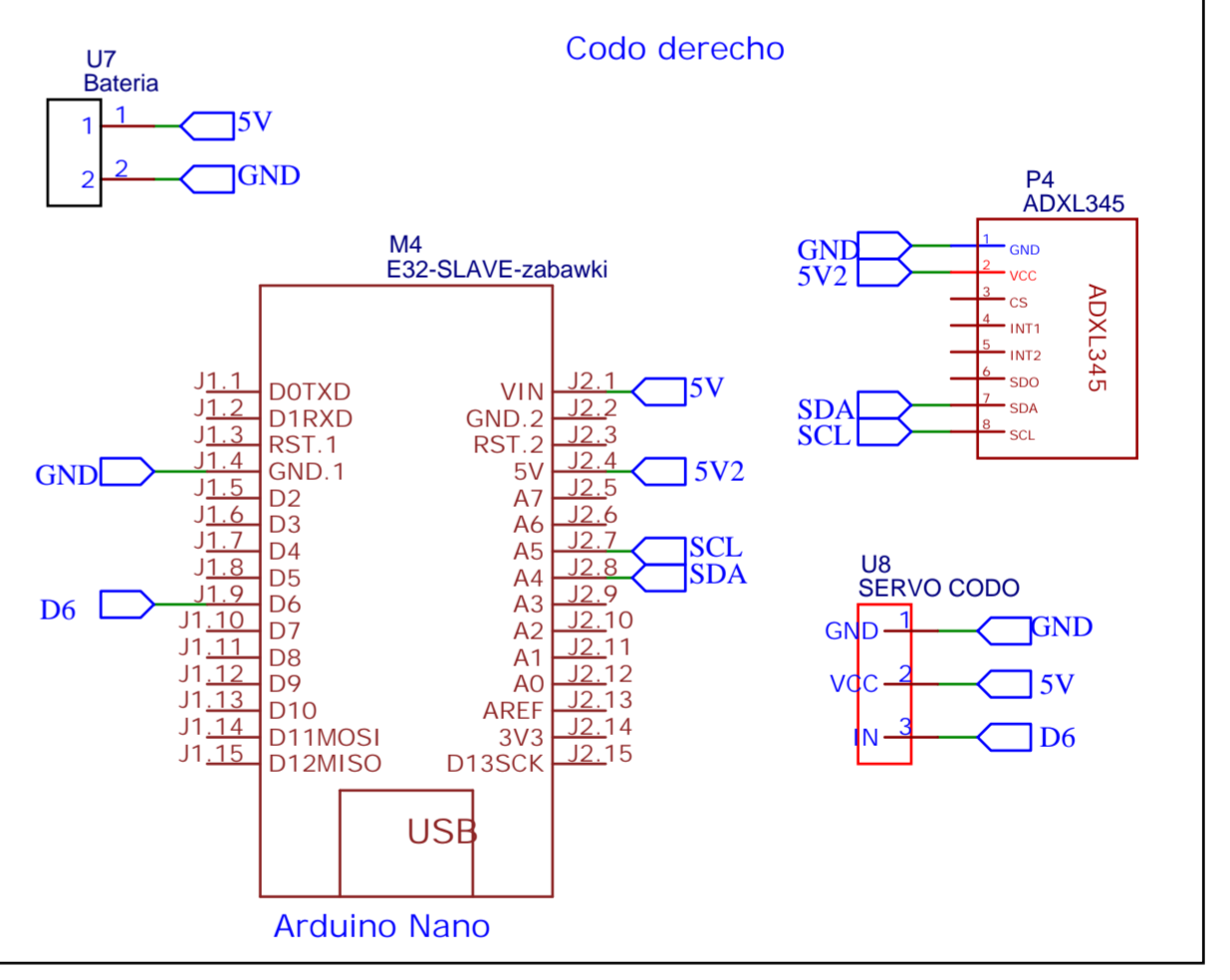
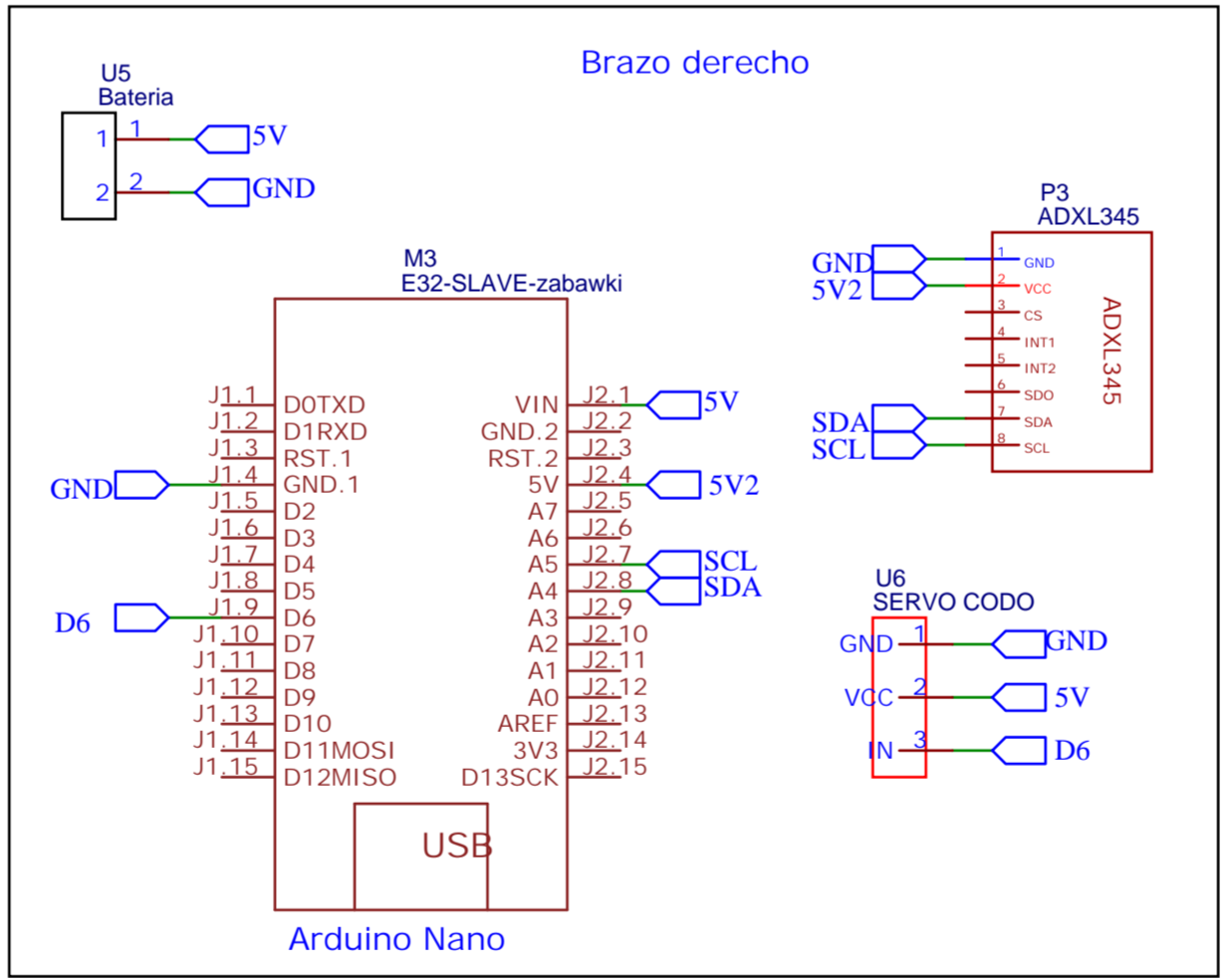
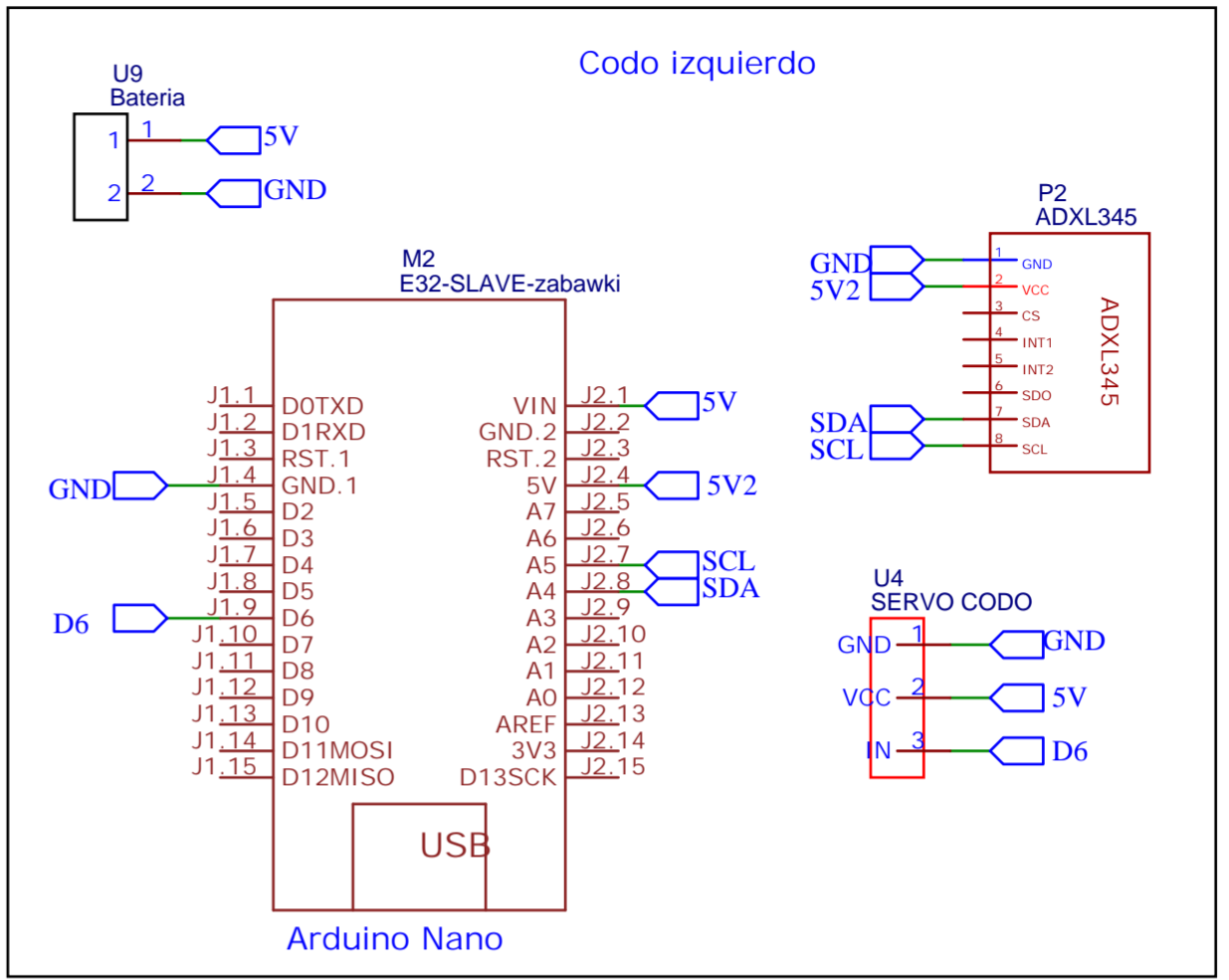
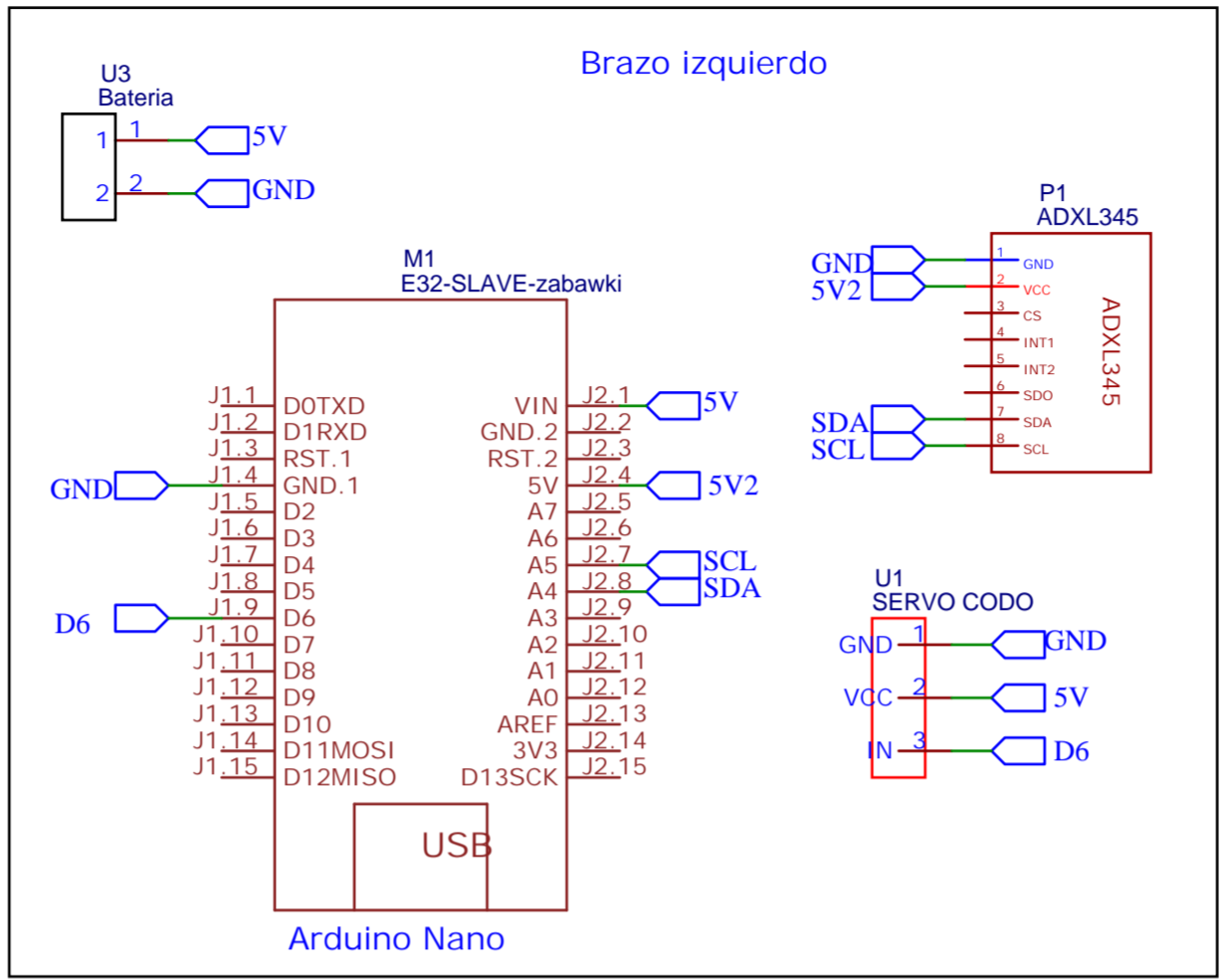
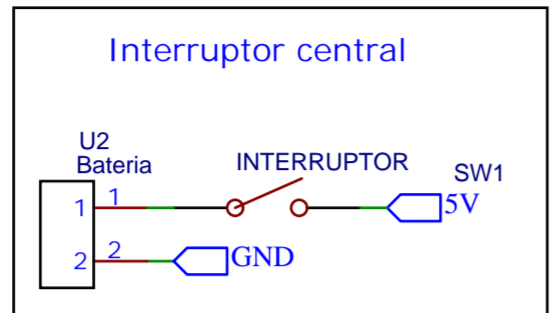
- [1] Iniap, “Manual del cultivo de la palma aceitera,” *INIAP-Estación Experimental Santo Domingo*, vol. 102, no. 0, pp. 1–4, 2015, [Online].
- [2] M. Jennefer and G. Bruno, “African Palm Corp . to Launch Palm Oil Production in Guinea-Bissau , West Africa,” *PR Newswire*, pp. 1–3, 2018.
- [3] S. D. Martinez Quiroz, “Diseño de procedimientos e instructivos para implementar buenas prácticas agrícolas en el cultivo de palma aceitera,” 2014.
- [4] Rubén Alberto Ortiz Vega, *Cultivo de la Palma Aceitera*, Univerisid. 2000.
- [5] S. a los pamicultores ANCUPA, “Historia del cultivo de Palma Aceitera,” 2015.
- [6] F. Sterling, “Development of Oil Palm Varieties for Extreme Climatic Conditions,” vol. 25, no. 0, pp. 24–31, 2004.
- [7] C. Reddy, “Propuesta de un sistema para la planeación de la recolección de la cosecha para la optimización de recursos y costos en la empresa plamneras de Yarima S.A,” *Almeras de Yarima S.A*, no. July, p. 32, 2012.
- [8] Mongabay Latam, “Cinco claves para el cultivo de Palma Africana en América Latina,” *Thelma Gomez*, 2020. <https://es.mongabay.com/2020/07/cinco-claves-palma-africana-america-latina/>
- [9] “42-3 Sosteniendo Nuestras Tierras y Nuestras Vidas.” 2018. Available: <https://www.culturalsurvival.org/es/publications/cultural-survival-quarterly/42-3-sosteniendo-nuestras-tierras-y-nuestras-vidas>
- [10] *El estado de los bosques del mundo 2020*. FAO and UNEP, 2020. doi: 10.4060/ca8642es.
- [11] G. Strona, S. D. Stringer, G. Vieilledent, Z. Szantoi, J. Garcia-Ulloa, and S. A. Wich, “Small room for compromise between oil palm cultivation and primate conservation in Africa,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, pp. 8811–8816, Feb. 2018, doi: 10.1073/pnas.1804775115.
- [12] Y. Xiao *et al.*, “Genetic control of fatty acid composition in coconut (*Cocos nucifera*), African oil palm (*Elaeis guineensis*), and date palm (*Phoenix dactylifera*),” *Planta*, vol. 249, no. 2, pp. 333–350, 2019, doi: 10.1007/s00425-018-3003-x.
- [13] A. C. Borrero, “Cultivo de Palma de aceite,” *Industria de los cereales y derivados*. https://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite2.htm
- [14] Technoserve, “Manual Tecnico De Palma Africana,” *Mac*, p. 99, 2009.
- [15] INIAP, *Bibliografía sobre: Palma Africana (Elaeis guineensis)*. 2001.
- [16] R. Mosquera, M., Fontanilla, C., & Martínez, “Identificación de palmas de aceite con racimos maduros antes de la cosecha.,” *El caso de palma en estados tempranos de desarrollo.*, p. 28, 2008.
- [17] Grupo Jaremar, “Manual de buenas practicas agricolas para la producción sostenible de la palma aceitera por pequeños productores,” *Fundación Hondureña de Investigación Agrícola*, p. 24, 2016.

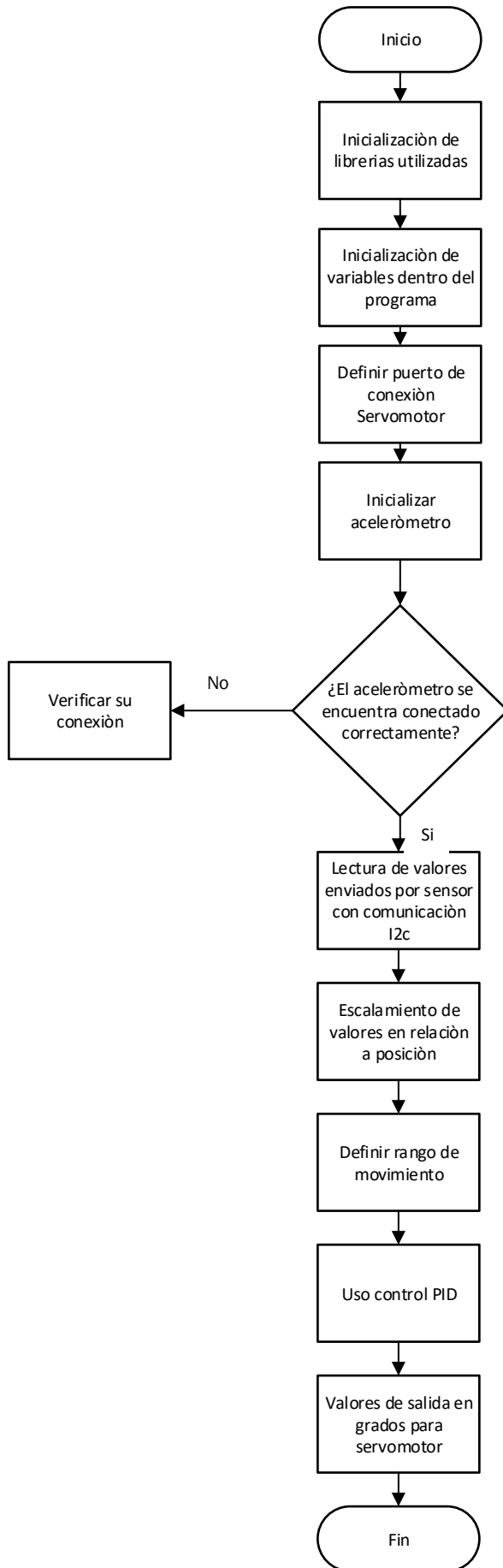
- [18] C. Franciso, *Manual del cultivo de palma aceitera (Elaeis guineensis jacq.): para la zona noroccidental del Ecuador*, 1mera ed. 2003.
- [19] R. Raygana Zambrano, “Manual Técnico para el cultivo de Palma,” *Saravia Javier*, p. 104, 2005.
- [20] I. Manual, “Stihl pc 70, 75,” 2019
- [21] F. Calvo, “Cosecha: Maduración , sistemas y costos,” 1991.
- [22] J. Llaneza Ergonomía y Psicología, A. M. para la formación del especialista. V. L. Nova, and S.A., “Ergonomía y Psicología Aplicada: Manual para la formación del especialista.,” 2009.
- [23] M. C. Peña, “Evaluación de factores de riesgo ergonómico en una plantación de palma aceitera.,” *Universidad san Francisco de Quito-Ecuador.*, pp. 34–46, 2019.
- [24] L. A. Garzón Castañeda, “Trastornos musculoesqueléticos y la relación con la carga postural asociada a la labor de cosechero de palma aceitera en una plantación del Meta,” *Maestría en Salud Ocupacional y Ambiental*, 2015.
- [25] M. & S. F. Chávez, “Exoesqueletos para potenciar las capacidades, Ingeniería Biomédica.,” pp. 63–70, 2010.
- [26] J. , B. M. , & F. M. Rosen, “A myosignal-based powered exoskeleton system.,” *IEEE Transaction On Systems, Man and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, pp. 210–222.
- [27] “Exoesqueleto: tecnología que integramos para reducir la fatiga y lesiones en los trabajadores de Ford de México | Mexico | español | Sala de Prensa de Ford.” 2018.
- [28] J. Soto, “Ecomotor. Recuperado el 21 de febrero de 2018,” Jan. 2017.
- [29] Soto J., “Robo-Mate, un exoesqueleto mecánico para facilitar el reciclaje de automóviles.” Jan. 2017
- [30] FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, “Antropometría,” *Laboratorio de Condiciones de Trabajo*. [Online]. Available: https://escuelaing.s3.amazonaws.com/staging/documents/2956_antropometria.pdf?
- [31] L. , M. F. , & B. E. Carmentate, “Manual de Medidas Antropométricas. Costa Rica: SALTRA (Programa Salud, Trabajo Y Ambiente en América Central) /IRET-UNA (Instituto Regional en Sustancias Tóxicas).,” 2014.
- [32] K. , & O. T. Norton, “Antropométrica: Un libro de referencia sobre mediciones corporales humanas para la educación en deportes y salud. Sidney: Southwood Press,” 1996.
- [33] A. Gonzalo and L. Javier, “Investigación de mecanismos multiplicadores de fuerza para diseño y construcción de un exoesqueleto robótico de extremidad superior para levantamiento de carga.,” *Espe.edu.ec*, 2018, doi: MEC-0126.
- [34] Leopoldo Javier Loo Ceballos, “Investigación de mecanismos multiplicadores de fuerza para el diseño y construcción de un exoesqueleto robótico de extremidad superior para levantamiento de carga,” 2018.

- [35] P. Balthazard, D. Currat, and F. Degache, "Fundamentos de biomecánica," *EMC - Kinesiterapia - Medicina Física*, vol. 36, pp. 1–8, Jan. 2015, doi: 10.1016/s1293-2965(15)74142-3.
- [36] C. Oliveira *et al.*, "8. Canarias médica y quirúrgica enero -Abril 2007." [Online]. Available: https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/5977/1/0514198_00012_0002.pdf
- [37] I. Javier and I. Ceballos, "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." 2018.
- [38] A. Kapandji, "Fisiología Articular. España: Editorial medica Panamericana. Tomo I,," 2012.
- [39] S. Antuña, "Biomecánica del codo y sus implicaciones en el diseño de recambios articulares," *Biomecánica*, Jan. 2004, doi: 10.5821/sibb.v12i2.1701.
- [40] I. Javier and I. Ceballos, "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." 2018.
- [41] J. A. Diego-Mas, "GINSHT - Guia de manipulación manual de carga del INSHT." 2015. [Online]. Available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/ginsht/ginsht-ayuda.php>
- [42] A. E. OSHA, "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,," 2007.
- [43] Laurantines, "<h1>Mecanismo biela y manivela</h1>." Feb. 2022. [Online]. Available: <http://electricidad-tekno.blogspot.com/2010/03/mecanismo-biela-y-manivela.html>
- [44] "Neumática e Hidráulica II Objetivos." [Online]. Available: <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena10/pdf/quincena10.pdf>
- [45] "Vista de Diseño de una herramienta de corte para racimos de palma aceitera | Revista UIS Ingenierías." 2022.
- [46] "Vista de Diseño de una herramienta de corte para racimos de palma aceitera | Revista UIS Ingenierías." 2022.
- [47] "PC 70 -." Mar. 2010. [Online]. Available: <https://www.stihl.com/STIHL-power-tools-A-great-range/Special-harvester/Palm-Cutter/244915-64532/PC-70.aspx>
- [48] ASTM INTERNATIONAL, "Standard Specification for Carbon Structural Steel. Designation: A36/A36M -14, West Conshohock: ASTM INTERNATIONAL," 2014.
- [49] Tough, "Tough 2000 Resin 1 L." 2022. [Online]. Available: https://formlabs.com/store/materials/tough-2000-resin/?utm_source=preform
- [50] R. W. Fitzgerland, *Mecánica de Materiales*, vol. Revisada.
- [51] Rebeca Mejia, "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8va Edición Richard G. Budynas FREELIBROS.ORG." Feb. 2017.
- [52] A. Galeas, "Mecanica Vectorial para Ingenieros Estatica - Beer 9th (1)." Feb. 2018.

- [53] “Servomotor MG996R.” 2020. [Online]. Available: <https://sharkelectronics.com.ec/product/servomotor-mg996r/>
- [54] “Arduino Nano + Cable USB.” 2021. [Online]. Available: <https://electrocrea.com/products/arduino>.
- [55] “Módulo ADXL345 Acelerómetro Digital.” 2021. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/528-modulo-adxl345-acelerometro-digital.html>
- [56] “Arduino - ¿Cómo reduzco el ruido en mi circuito?” 2022. [Online]. Available: <https://respuestas.me/q/arduino-como-reduzco-el-ruido-en-mi-circuito-62611454961>
- [57] “Amazon.com: Cargador solar, cargador portátil de batería solar resistente al agua.” 2022. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Charger-Portable-Waterproof-Shockproof-Dustproof/dp/B00YOP7LV8>
- [58] Robert L. Mott, *Resistencia de Materiales*, Quinta., vol. 1. Ciudad de Mexico: Pearson Educación, 2009.
- [59] AceroCenter Catálogo, “Tubo redondo mecánico.” Jan. 2021. [Online]. Available: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/tubo-redondo-mecanico/>
- [60] R. Avila-Chaurand, L. Prado-León, and E. González-Muñoz, *Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana : México, Cuba, Colombia, Chile / R. Avila Chaurand, L.R. Prado León, E.L. González Muñoz*. 2007.
- [61] D. Amanda, “Beneficios y limitaciones del uso de exoesqueletos ocupacionales para la prevención de trastornos musculoesqueléticos: revisión sistemática exploratoria,” *Uisek.edu.ec*, 2020.
- [62] html.alldatasheet.com, “MG996R Datasheet(1/2 Pages) ETC2 | High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo.” 2022.
- [63] “SKF.” 2022. [Online]. Available: <https://www.skf.com/co/support/engineering-tools/bearing-select>
- [64] Grey Evans, “Cuál es el peso máximo para levantar de acuerdo con el peso de tu cuerpo.” pp. 1–5, 2017. [Online].
- [65] “Desbrozadora ELITE Mochila 43cc – Elite Ecuador.” 2017. [Online]. Available: <https://eliteecuador.com/producto/desbrozadora-elite-mochila-43cc/>
- [66] “Cardan Flexible Para Desmalezadora Stihl Fs38.” 2022. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-592551090-cardan-flexible-para-desmalezadora-stihl-fs38-_JM
- [67] Jairo Borja Hincapié, “Engranajes cilindricos y Helicoidales,” *SUBDIRECCION TECNICO PEDAGOGICA*, no. REGIONAL VALLE, pp. 24–27, 1990.
- [68] Rebeca Mejia, “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8va Edición Richard G. Budynas FREELIBROS.ORG.” Jan. 2017.
- [69] M. Elena and L. Guillén, “Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua.”

ANEXOS





CÓDIGO ARDUINO CON IMPLEMENTACIÓN PID

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
#include <Servo.h>
Adafruit_ADXL345_Unified accel= Adafruit_ADXL345_Unified();

Servo servoX;

int valorX;
int valorx2;
//PID constants

double kp = 23.366 ;
double ki = 35.8902;
double kd = 0;
unsigned long currentTime, previousTime;
double elapsedTime;
double error;
double lastError;
double output, setPoint;
float input, angulo;
float input2, angulo2;
double cumError, rateError;

String valores;
String valores2;

void setup() {

input=0;
    angulo=0;
    input2=0;
```

```

    angulo2=0;

Serial.begin(9600);
//Serial.println("LABEL,fecha,valorY,valorY2");
servoX.attach(6);

if (!accel.begin()) {
    Serial.println("El sensor no inicio");
    while(1);
}

}

void loop() {

    int Motor1=0;

    sensors_event_t event;
    accel.getEvent(&event);
    Serial.print(" "); Serial.print(event.acceleration.x); Serial.print(" "); Serial.print(",");
    //Serial.print("Y= "); Serial.print(event.acceleration.y); Serial.print(" ");
    // Serial.print("Z= "); Serial.print(event.acceleration.z); Serial.println(" ");
    // delay(100);

    valorX= event.acceleration.x;
    //Serial.print(valorX);
    valorx2=map(valorX, 10.20 ,-6.2,0.0 ,180.0);
    Serial.println(valorx2);

    //servoX.write(valorY2);

```

```

if(valorx2>130){
  valorx2=130;

  Motor1=valorx2;
  setPoint = valorx2;
  input = valorX;
  angulo = valorx2;
  output = computePID(angulo);
  //delay(100);
  servoX.write(output);
  Serial.print(setPoint);
  Serial.print(",");
  Serial.println(angulo);

}

//Serial.print("DATA,TIME,");
//Serial.print(valorX);
//Serial.print(",");
//Serial.println(valorx2);

}

double computePID(double inp){
  currentTime = millis();          //get current time
  //elapsedTime = (double)(currentTime - previousTime);    //compute time elapsed from
previous computation
  elapsedTime=0.1;
  error = setPoint - inp;          // determine error
  cumError += error * elapsedTime; // compute integral
  rateError = (error - lastError)/elapsedTime; // compute derivative

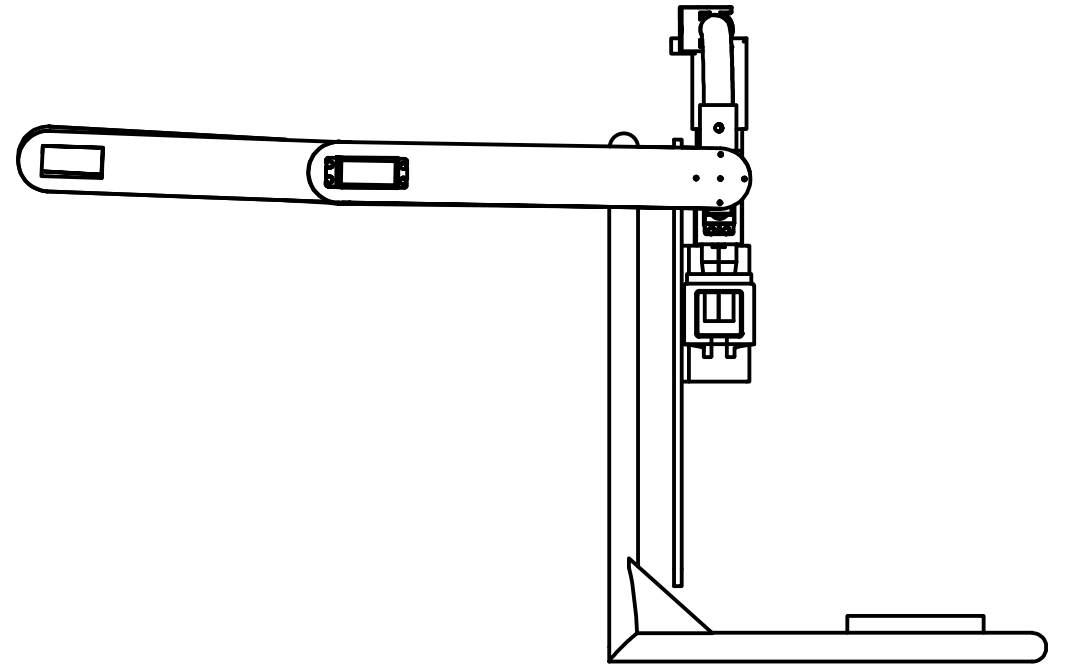
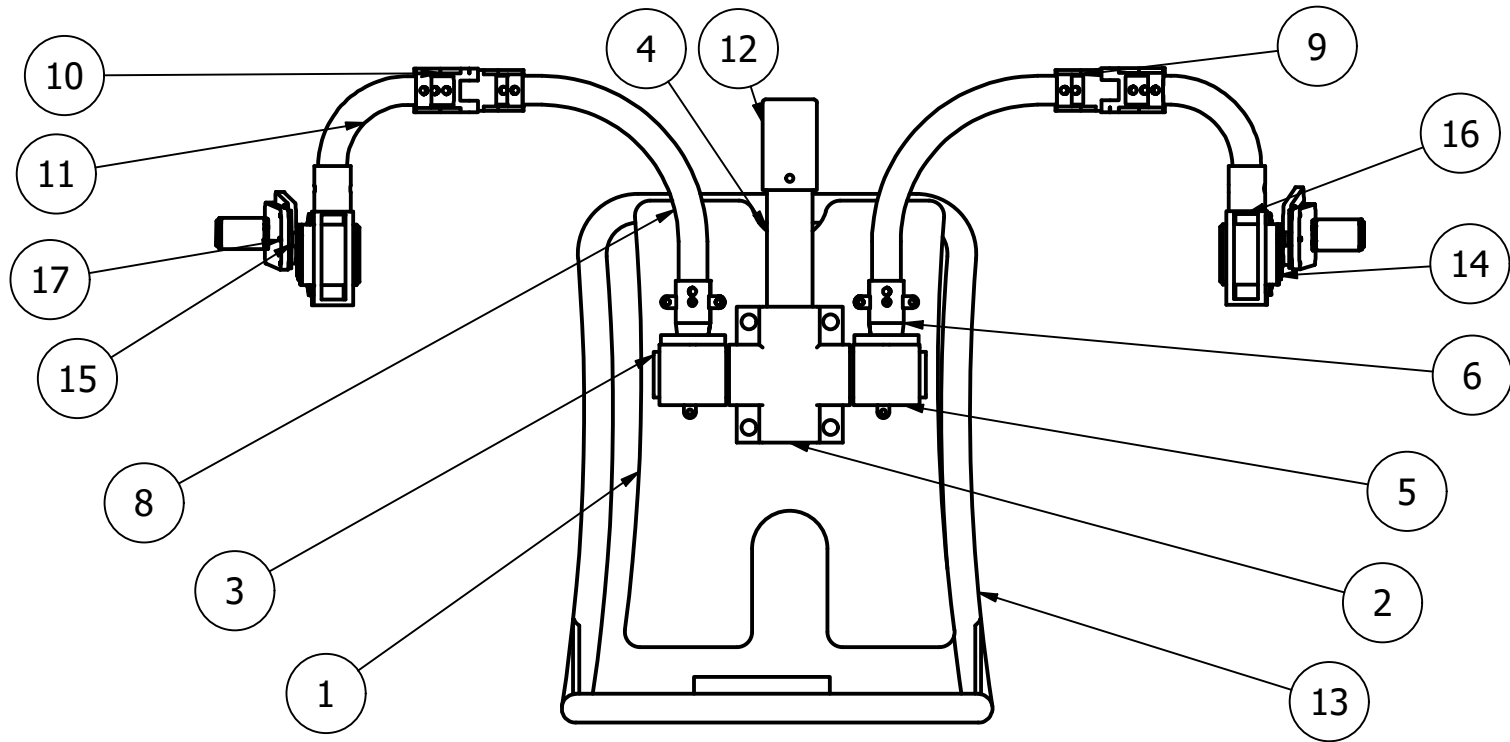
  double out = kp*error + ki*cumError + kd*rateError;      //PID output

```

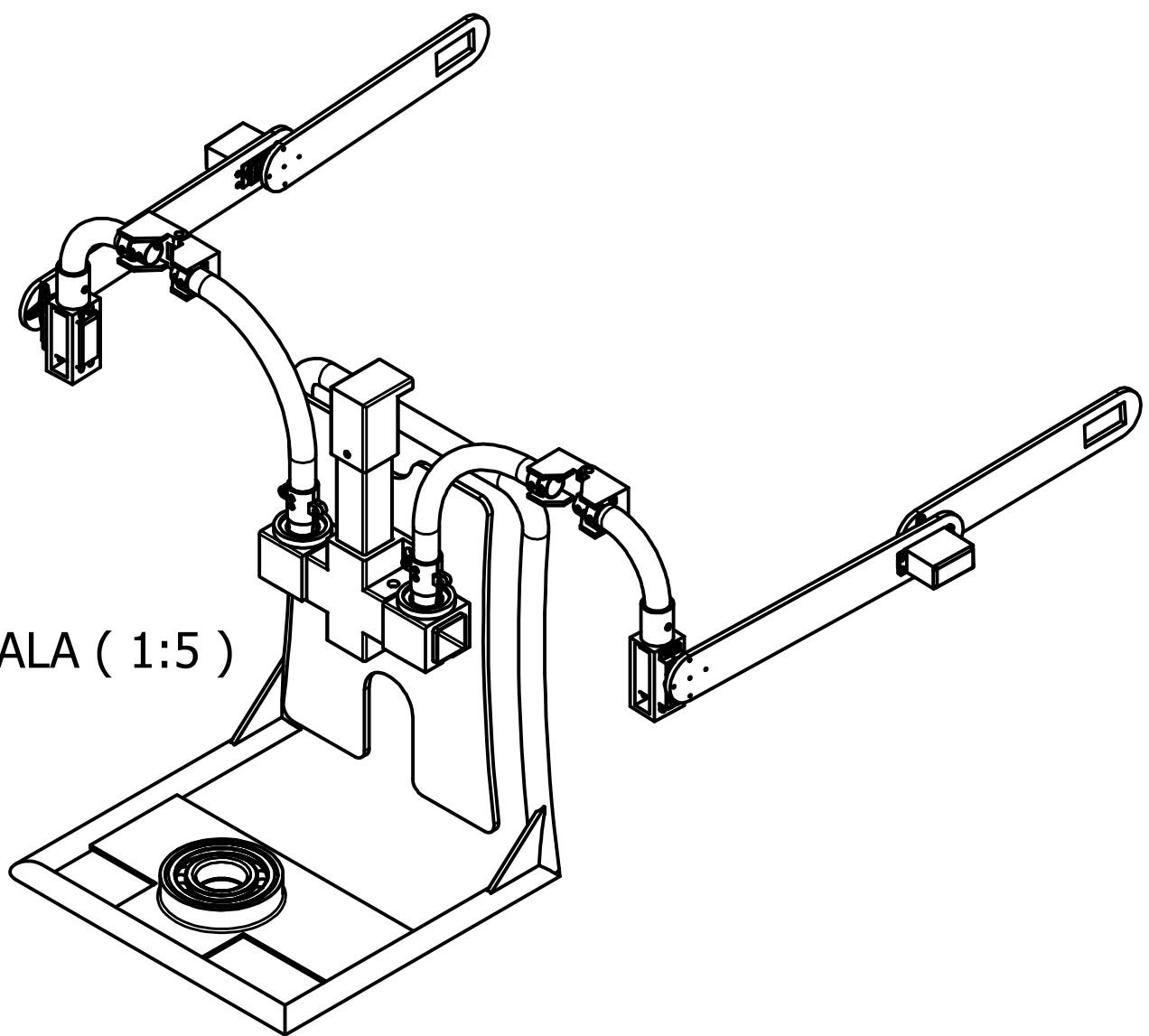
```
    lastError = error;                //remember current error
    previousTime = currentTime;      //remember current time

    return out;                       //have function return the PID output
}
void serialEvent(){
if(Serial.available()>0){
valores=Serial.readStringUntil(',');
valores2=Serial.readStringUntil('@');

//Serial.println(valores);
//Serial.println(valores2);
}
}
```





Dimensiones Extremas		
LARGO	ANCHO	ESPESOR
450,0mm	265,5mm	279,3

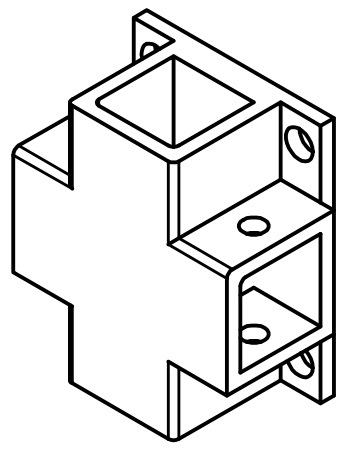
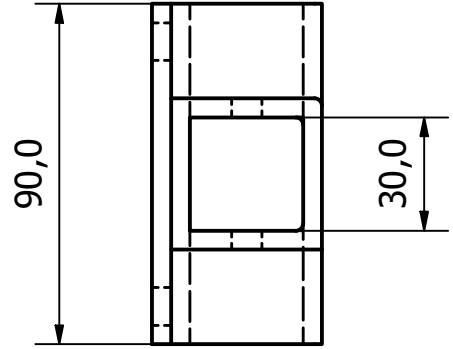
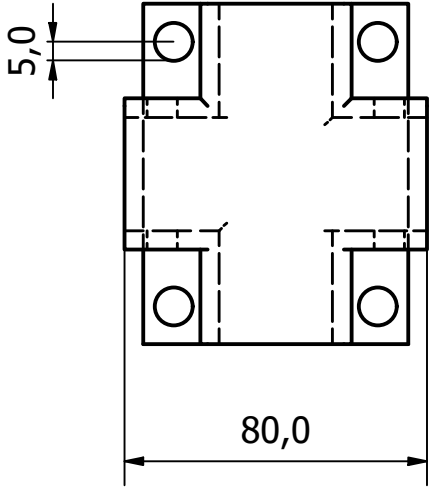


ESCALA (1:5)


Nº DE ELEMENTO	CANTIDAD	Nº. DE PIEZA	DESCRIPTION
18	2	SKF_DW ER1634	BB1_001_101-Deep groove ball bearings
17	4	Eslabon codo	Acrilico
16	2	Eslabon hombro	Acrilico
15	4	Quadruple_Blade_Rudder	Accesorio Servo_MG_996R
14	4	##Servo_MG_996R	Servo_MG_996R
13	1	Estructura mochila	10.9702.00.01.06
12	1	Base cabeza	Resina Tough 2000
11	2	Brazo hombro	10.9702.00.01.05
10	2	Brazadera Macho	Resina Tough 2000
9	2	Brazadera hembra	Resina Tough 2000
8	2	Brazo Espaldal	10.9702.00.01.04
7	2	SKF_RLS 12	BB1_001_101-Deep groove ball bearings
6	4	Sujeción perfil redondo	Resina Tough 2000
5	2	Base Rodamiento	Resina Tough 2000
4	1	Perfil cuadrado vertical	10.9702.00.01.03
3	1	Perfil cuadrado horizontal	10.9702.00.01.02
2	1	Base Principal	10.9702.00.01.01
1	1	Espaldar H	Acrilico

Dimensiones:	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	N/A				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA			Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23
			Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23
			Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24
Plano conjunto		Escala:	1:5	Código:	10.9702.00
				Tol. Gral.:	± 0.1

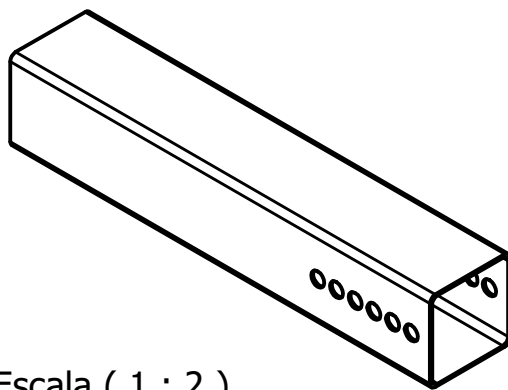
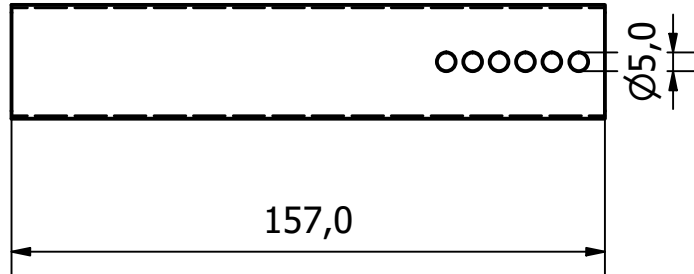
✓ N11




Escala (1 : 2)

Espesor: 1.1 mm	NA	Material: Resina Tough 2000	Dim. brutas: NA
Recubrimiento:	N/A		
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño: Masache July Ana	2022-02-23
		Dibujó: Masache July Ana	2022-02-23
		Revisó: Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24
Base Principal Exoesqueleto	Escala: 1:2	Código: 10.9702.00.01	Tol. Gral.: ± 0.1

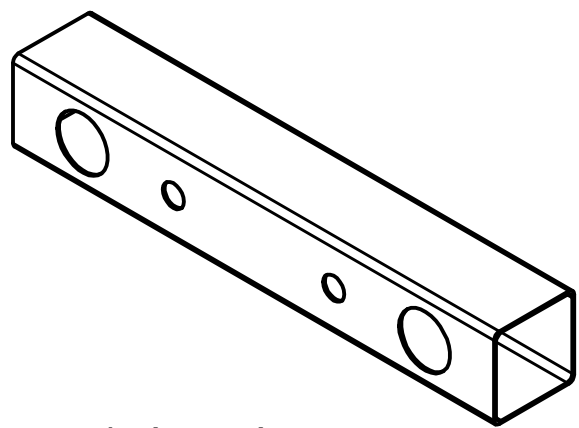
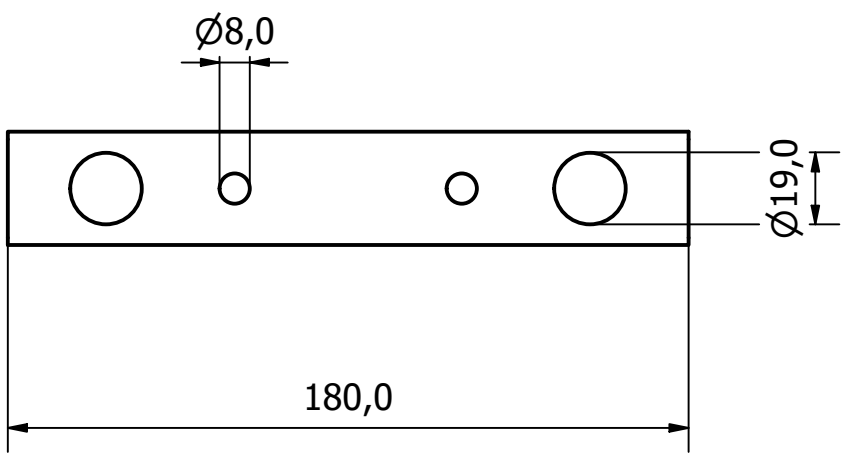
(N11) N7




Escala (1 : 2)

Espesor: 1.1 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	N/A				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Base solar charger	Escala: 1:2	Código:	10.9702.00.02	Tol. Gral.:	± 0.1

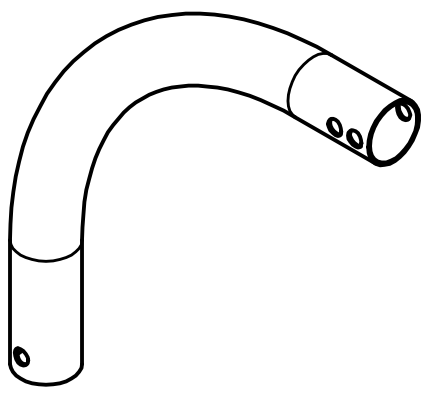
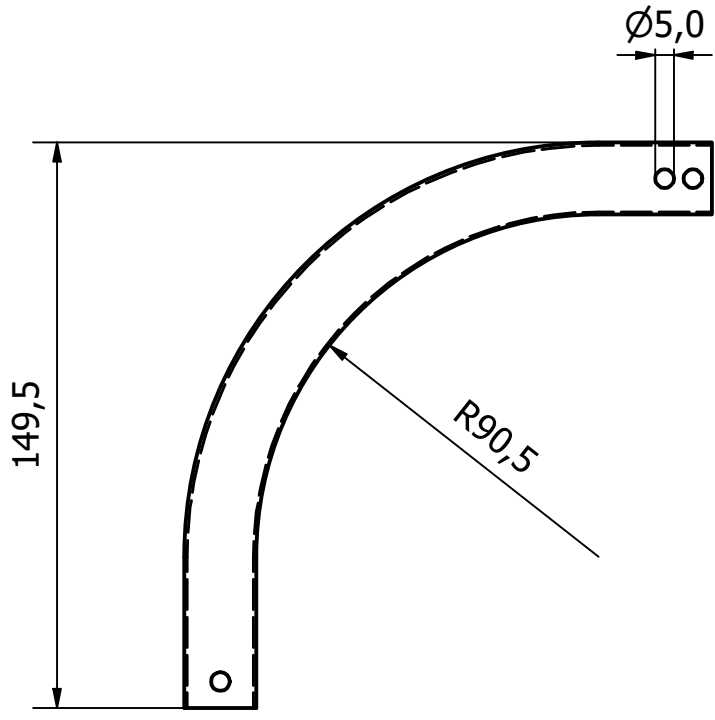
✓ (N11) N7




Escala (1 : 2)

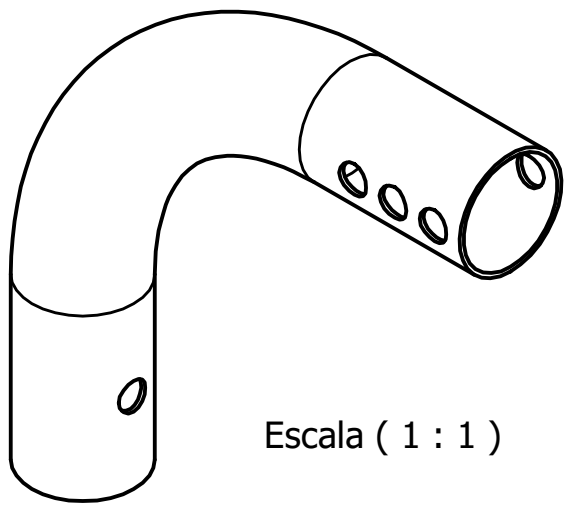
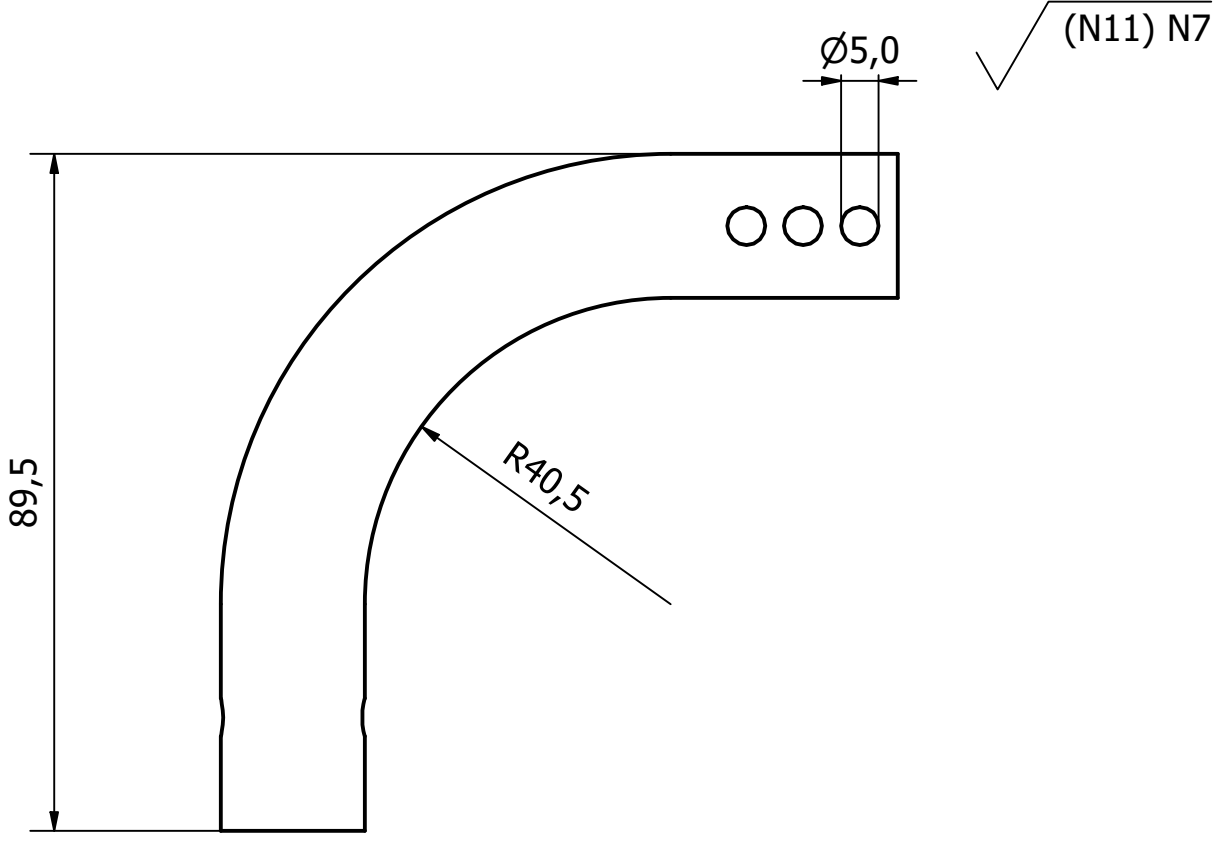
Espesor: 1.1 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	Pintura				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Base Brazos exoesqueleto	Escala: 1:2	Código:	10.9702.00.03	Tol. Gral.:	± 0.1

✓ N11




ESCALA (1 : 2)

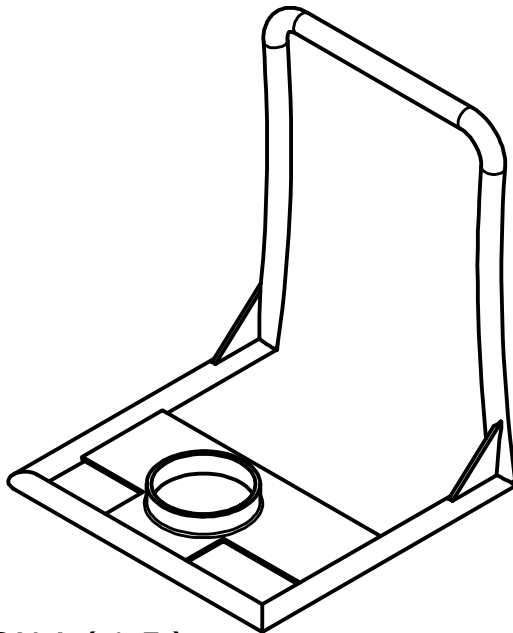
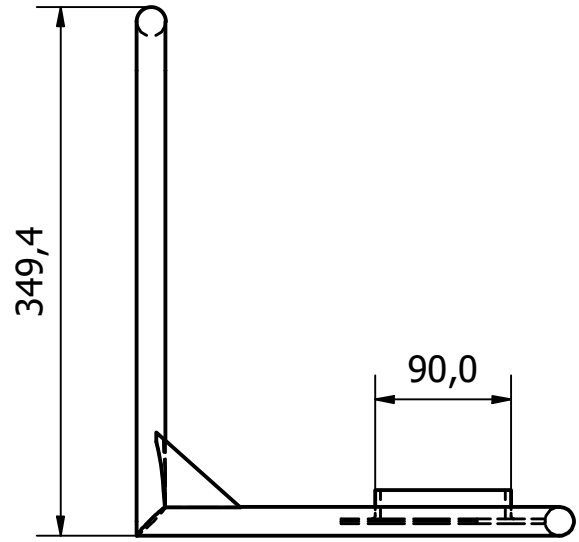
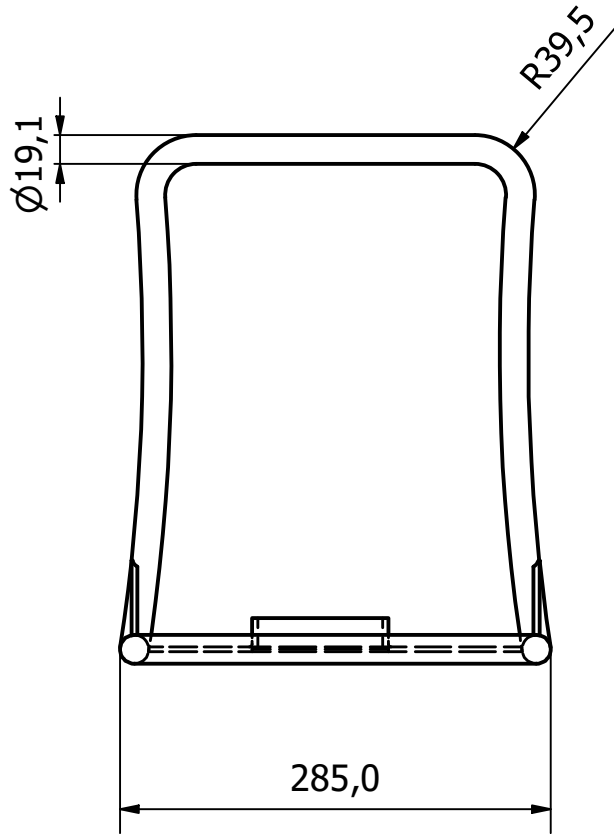
Espesor: 0,75 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	Pintura				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Brazo Espaldar-Hombro	Escala: 1:2	Código:	10.9702.00.04	Tol. Gral.:	± 0.1




Escala (1 : 1)

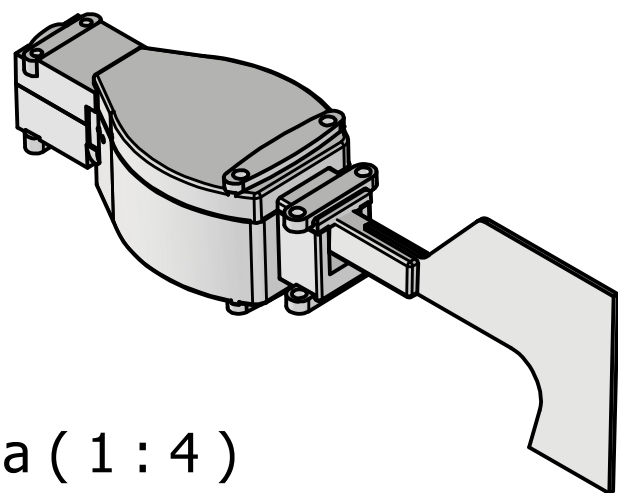
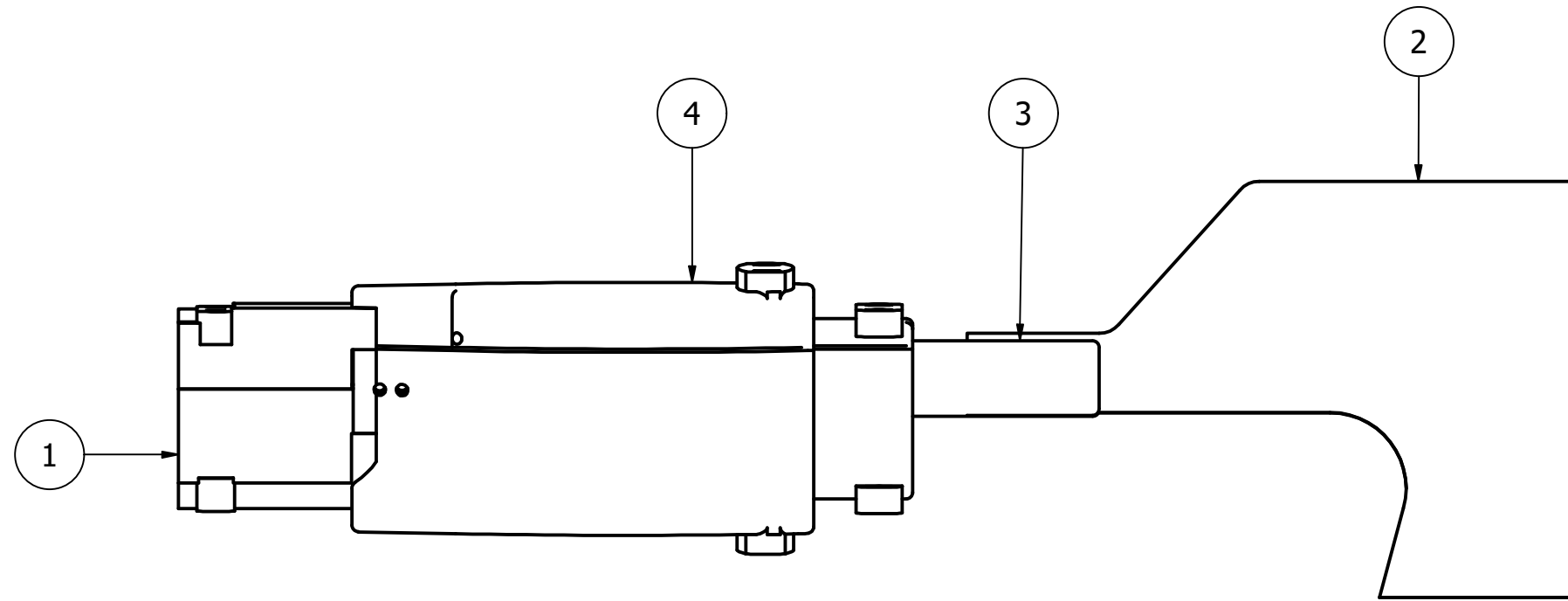
Espesor: 0,75 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	Pintura				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Brazo hombro-codo	Escala: 1:1	Código:	10.9702.00.05	Tol. Gral.:	± 0.1

(N11) N7



ESCALA (1:5)


Espesor: 0,75 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	Pintura				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Estructura mochila exoesqueleto	Escala: 1:5	Código:	10.9702.00.06	Tol. Gral.:	± 0.1



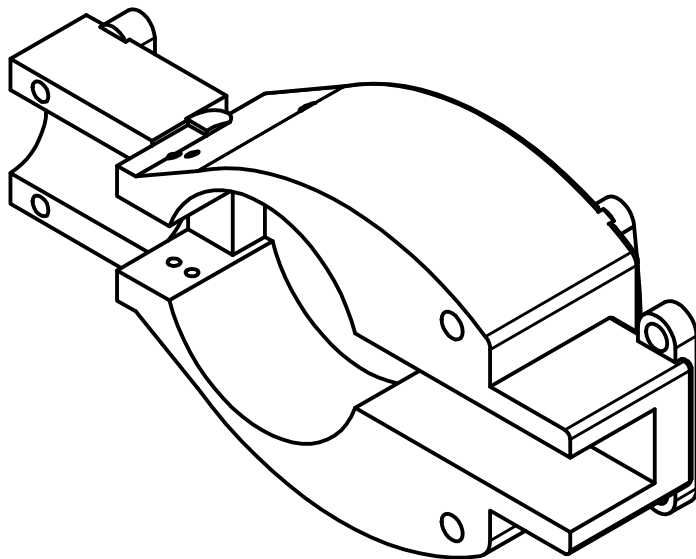
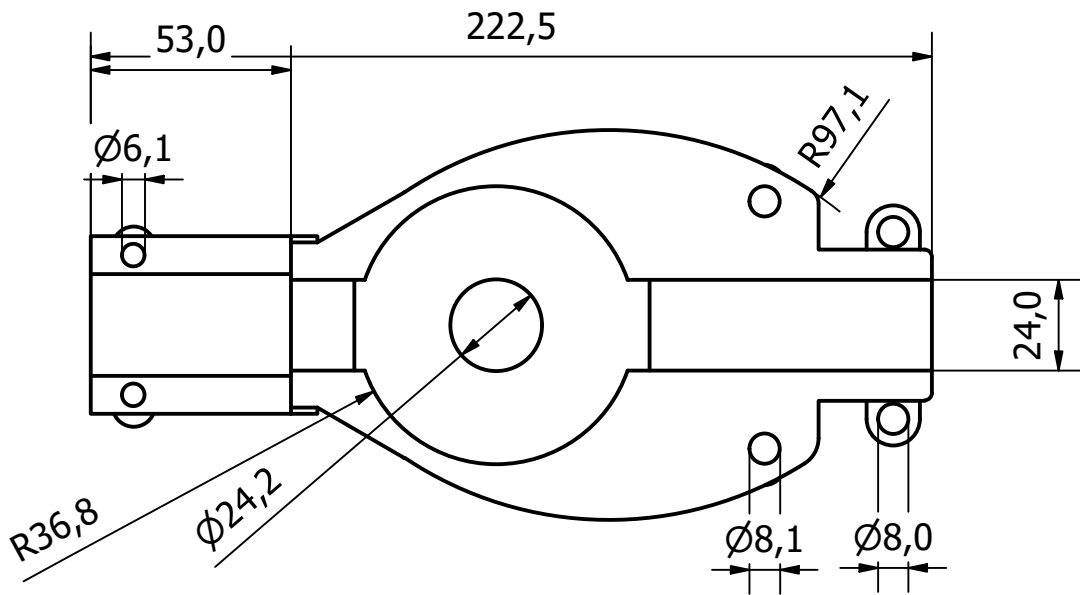
Escala (1 : 4)

DIMENSIONES EXTREMAS		
LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
424,6	96,3	71,5


Nº. ITEM	CANTIDAD	Nº. DE PIEZAS	DESCRIPTION
4	1	Tapa caja reductora	10.9702.00.02.03
3	1	Vástago	Resina Tough 2000
2	1	Cuchilla	10.9702.00.02.02
1	1	Cara caja reductora	10.9702.00.02.01

Esesor: 71,50 mm	NA	Material:	Filamento	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	N/A				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA			Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23
			Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23
			Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24
Plano subconjunto caja reductora		Escala:	1:4	Código:	10.9702.01
				Tol. Gral.:	± 0.1

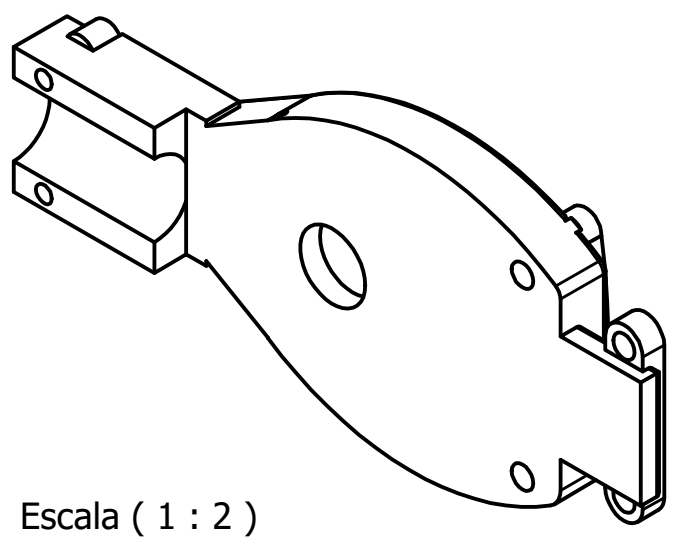
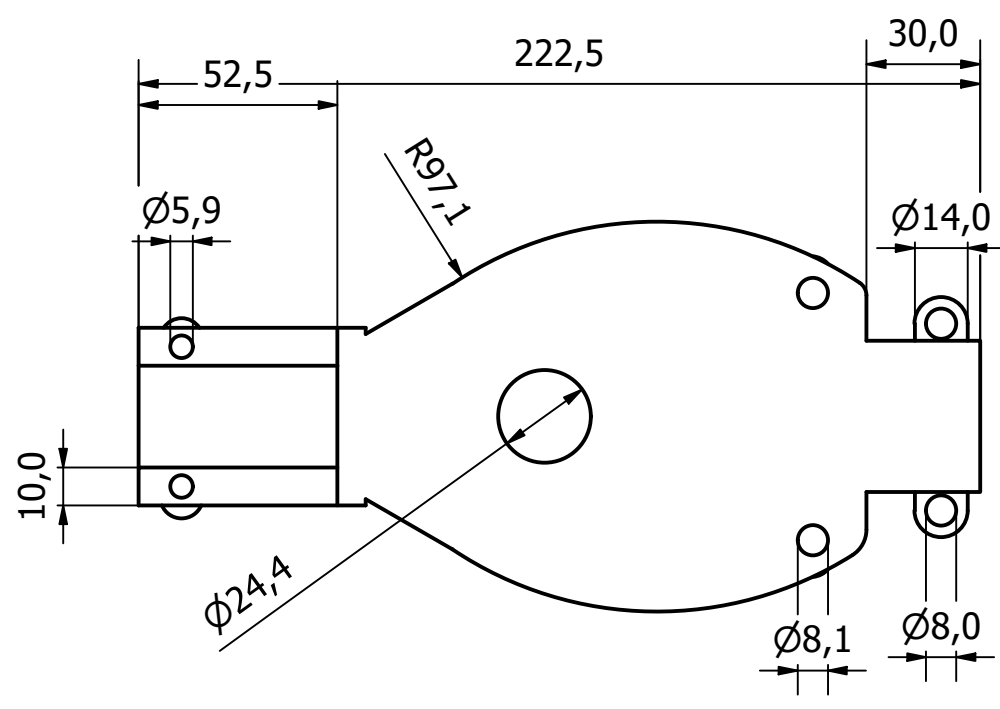
✓ N7




Escala (1 : 2)

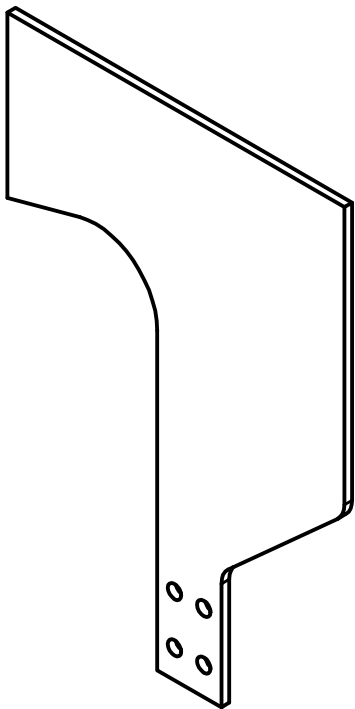
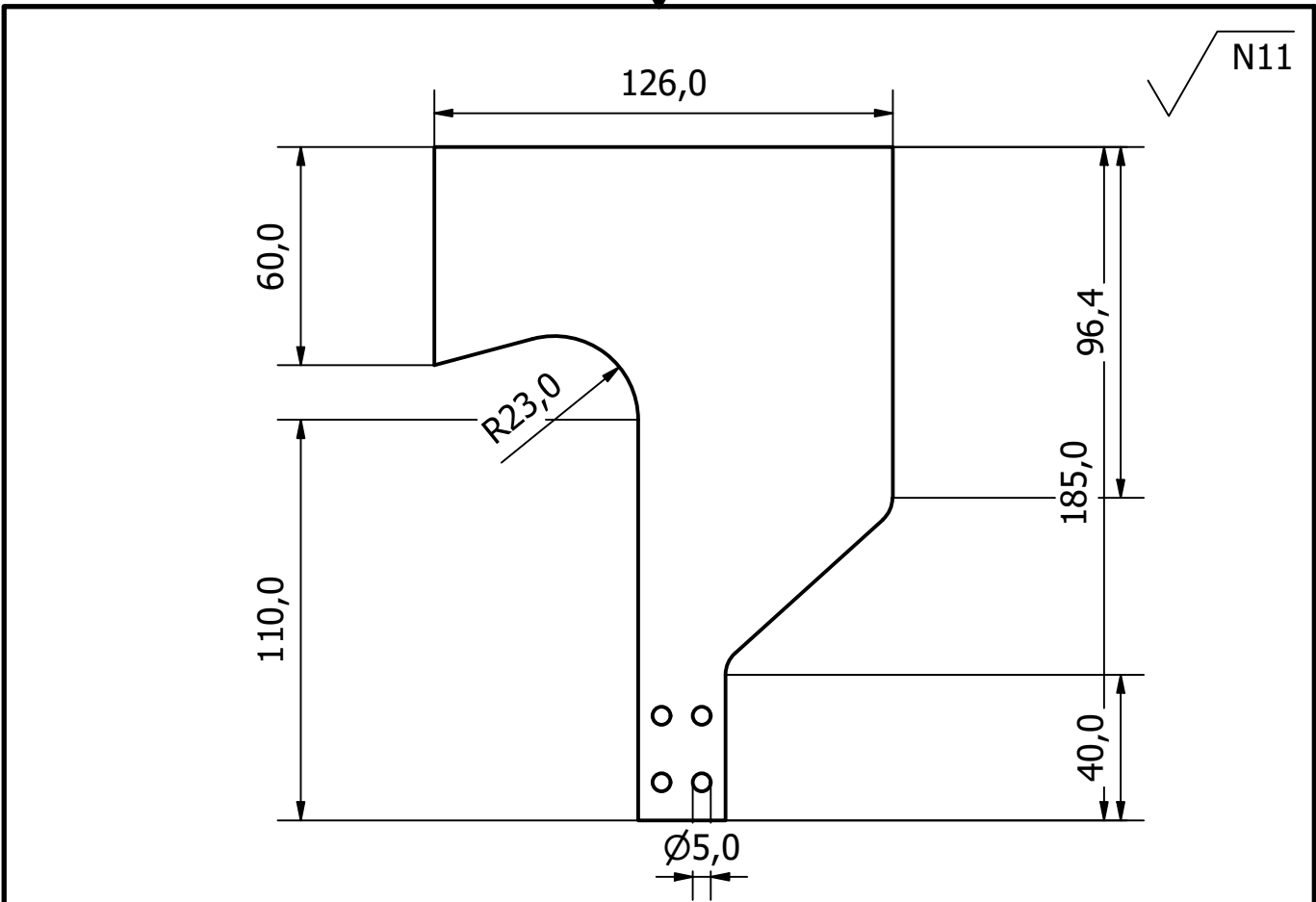
Espeor: 56,5 mm	NA	Material:	Filamento	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	N/A				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Cuerpo caja reductora	Escala: 1:2	Código:	10.9702.01.01	Tol. Gral.:	± 0.1

✓ N7




Escala (1 : 2)

Espesor: 18 mm	NA	Material:	Filamento	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	N/A				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Cara caja reductora	Escala: 1:2	Código:	10.9702.01.02	Tol. Gral.:	± 0.1



Escala (1 : 2)

Espesor: 3 mm	NA	Material:	A36	Dim. brutas:	NA
Recubrimiento:	Pintura electrostática				
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Dibujó:	Masache July Ana	2022-02-23	
		Revisó:	Ing. Fabio Obando MSc.	2022-02-24	
Cuchilla	Escala: 1:2	Código:	10.9702.01.03	Tol. Gral.:	± 0.1