

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN
EXOESQUELETO DE CUERPO COMPLETO PARA
INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA**

Tesis para optar el título de **Ingeniero Mecatrónico**, que presenta el bachiller:

AUTOR:

JOSÉ MIGUEL PEÑA RIVERA

ASESOR:

DANTE ÁNGEL ELÍAS GIORDANO

Lima, Agosto, 2021

RESUMEN

El presente trabajo presenta el diseño de los miembros superiores de un exoesqueleto de cuerpo completo, con cinco grados de libertad en cada brazo, de los cuales cuatro son actuados, para soportar una carga de hasta 30kg durante la acción de elevar un objeto desde el suelo hasta la zona media del cuerpo. Incrementar las capacidades físicas de la persona a través del uso de exoesqueletos, consiste en que estos mismos cubran el cuerpo entero de la persona. Por lo tanto, debido a la complejidad del mismo, es que en este proyecto solo aborda el diseño de los miembros superiores del exoesqueleto, además se proporcionan las fuerzas en el extremo que se debe conectar con el resto del exoesqueleto, para su desarrollo en futuros trabajos.

En los primeros capítulos se realizó un estudio sobre las tecnologías existentes en el campo de los exoesqueletos, tanto de modelos comerciales, como de exoesqueletos que forman parte de trabajos de investigación aun en desarrollo. Además, se presenta una breve introducción sobre conceptos anatómicos del cuerpo humano como también de antropometría, esto con el fin de entender y aplicar dichos conceptos en el posterior diseño mecánico. Con esta información recopilada y haciendo uso de la metodología VDI 2221, se realizó el diseño conceptual del exoesqueleto en base a una lista de requerimientos previamente propuestos.

Por último, se desarrolló el diseño mecánico del exoesqueleto, una vez realizado esto se obtuvo y analizó todos los procesos que el exoesqueleto debía cumplir para su funcionamiento y en base a estos requisitos se seleccionaron los componentes electrónicos que cumplan dicha tarea. Así mismo, los costos de diseño y fabricación se estiman en S/. 20,000 y S/ 43,000, respectivamente.

Índice de Contenido

Pág.

<i>RESUMEN</i>	<i>i</i>
<i>Índice de Contenido</i>	<i>ii</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>iv</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>v</i>
INTRODUCCIÓN	1
ESTADO DEL ARTE	3
1.1 Planos de movimiento del cuerpo humano	3
1.2 Biomecánica funcional del brazo	4
1.2.1 Movimientos del hombro	5
1.2.2 Movimientos del codo	7
1.2.3 Movimientos de la muñeca	8
1.2.4 Antropometría	9
1.3 Exoesqueletos comerciales	11
1.3.1 Stuttgart Exo-JackeEt	11
1.3.2 MAX (Modular Agile Exoskeleton)	12
1.3.3 Harmony Exoskeleton	12
1.4 Exoesqueletos en desarrollo	13
1.5 Mecanismos	14
1.6 Sistemas de control	15
DISEÑO CONCEPTUAL	18
2.1 Requerimientos	18
2.1.1 Función Principal	19
2.1.2 Cinemática	19
2.1.3 Fuerza	20
2.1.4 Usuario	20
2.1.5 Ergonomía	20
2.1.6 Control	21
2.1.7. Seguridad	21
2.1.8. Fuente de energía y Autonomía	21
2.1.9. Portabilidad	22
2.1.10. Ensamble y Mantenimiento	22
2.1.11. Fabricación	22
2.1.12. Instrumentación	22
2.2 Caja Negra (Black Box)	23
2.3 Estructura de funciones	24
2.43 Matriz Morfológica	27
2.4.1 Dominio mecánico	27
2.4.2 Dominio Eléctrico / Electrónico	29
2.4.3 Dominio de control	30
2.5 Diseño conceptual	30
2.5.1 Solución 1	31
2.5.2 Solución 2	32
2.5.3 Solución 3	33
2.6 Análisis Técnico-Económico	34

<i>DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO</i>	36
3.1 Modelo cinemático del mecanismo del exoesqueleto	36
3.1.1 Cinemática directa	37
3.1.2 Cinemática diferencial	41
3.1.3 Espacio de trabajo	45
3.2 Estimación de torques en el cuerpo humano	45
3.2.1 Flexión-extensión de la muñeca	46
3.2.2 Flexión-extensión del codo	46
3.2.3 Flexión-extensión del hombro	47
3.2.4 Abducción-Aducción del hombro	48
3.3 Diseño del sistema mecánico del exoesqueleto	49
3.3.1 Selección de motores y cajas reductoras	49
3.3.2 Selección de materiales	52
3.3.3 Cálculo de elementos para transmitir potencia	52
3.3.4 Cálculo de fuerzas internas en la estructura del exoesqueleto	55
3.3.5 Cálculo de resistencia y deformación	63
<i>DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL</i>	66
4.1 Propuesta de sistema de control para el exoesqueleto	66
4.2 Diseño del sistema eléctrico-electrónico	69
4.2.1 Cálculo de potencia del dispositivo	70
4.2.2 Selección de componentes del circuito de control	70
4.2.3 Diagrama de conexiones del exoesqueleto	74
<i>PLANOS Y COSTOS</i>	79
5.1 Lista de Planos	79
5.2 Costos	80
5.2.1 Costos de diseño	81
5.2.2 Costos de componentes comerciales	81
5.2.3 Costos de materia prima y fabricación	82
5.2.4 Costos Total de Fabricación	84
<i>OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES</i>	85
<i>CONCLUSIONES</i>	86
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	87
ANEXOS	
PLANOS	

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1.1: Tabla con valores normalizados del movimiento de las articulaciones.....	9
Tabla 1.2: Resumen de las medidas antropométricas de ambos sexos	10
Tabla 2.1: Tabla con valores normalizados del movimiento de las articulaciones.....	19
Tabla 2.2: Resumen de las medidas antropométricas de ambos sexos	20
Tabla 2.3: Resumen de los requerimientos principales	23
Tabla 2.4: Abreviaturas de los movimientos del brazo	24
Tabla 2.5: Matriz morfológica del dominio mecánico	28
Tabla 2.6: Matriz morfológica del dominio eléctrico / Electrónico	29
Tabla 2.7: Matriz morfológica del dominio eléctrico / Electrónico	30
Tabla 2.8: Análisis técnico de los conceptos de solución.....	34
Tabla 2.9: Análisis económico de los conceptos de solución.....	34
Tabla 3.1: Parámetros D-H.....	38
Tabla 3.2: Rangos de movilidad de cada articulación	38
Tabla 3.3: Nomenclatura	40
Tabla 3.4: Relación de transmisión en cada articulación	51
Tabla 3.5: Dimensionamiento de chavetas	54
Tabla 3.6: Pesos de los principales componentes del exoesqueleto	56
Tabla 3.7: Resumen de fuerzas del sistema de la muñeca.....	58
Tabla 3.8: Resultados del diagrama de cuerpo libre de la muñeca.....	59
Tabla 3.9: Resumen de fuerzas del sistema del codo	59
Tabla 3.10: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo	60
Tabla 3.11: Resumen de fuerzas del sistema del hombro.....	61
Tabla 3.12: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo	61
Tabla 3.13: Resumen de fuerzas del sistema del hombro.....	62
Tabla 3.14: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo	63
Tabla 3.15: Fuerzas y Momentos en el análisis de resistencia.	64
Tabla 5.1: Lista de planos	80
Tabla 5.2: Estimación de costos de diseño.....	81
Tabla 5.3: Estimación de costos de elementos comerciales	82
Tabla 5.4: Estimación de costos de materia prima	83
Tabla 5.5: Estimación de costos de manufactura de elementos comerciales.....	84
Tabla 5.6: Estimación de costos del exoesqueleto	84

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1.1: Planos de referencia del cuerpo humano.....	4
Figura 1.2: Flexión-Extensión del hombro.....	5
Figura 1.3: Movimiento de Aducción del hombro	6
Figura 1.4: Movimiento de Abducción del hombro	6
Figura 1.5: Movimiento del hombro	7
Figura 1.6: Movimientos del codo	8
Figura 1.7: Movimientos de la muñeca	9
Figura 1.8: Dimensiones antropométricas del ser humano.....	10
Figura 1.9: Stuttgart Exo-Jacket [EBRAHIMI, 2017].....	11
Figura 1.10: MAX Exoskeleton	12
Figura 1.11: Harmony Exoskeleton.....	12
Figura 1.12: Exoesqueleto.....	13
Figura 1.13: Exoesqueleto [YINGBAI, 2016]	14
Figura 1.14: Exoesqueleto de cadena cinemática con 4 rotaciones.....	14
Figura 1.15: Mecanismo del hombro	15
Figura 1.16: Exoesqueleto de tres grados de libertad.....	16
Figura 1.17: Diagrama del sistema de control.....	16
Figura 1.18: Exoesqueleto de dos grados de libertad	16
Figura 1.19: Controlador de compensación de carga	17
Figura 2.1: Caja negra del proyecto	24
Figura 2.2: Diagrama de estructura de funciones	26
Figura 2.3: Bosquejo de la solución 1	32
Figura 2.4: Bosquejo de la solución 2	33
Figura 2.5: Análisis técnico-económico.....	35
Figura 3.1: Articulaciones del exoesqueleto	38
Figura 3.2: Área de movilidad del efector final del exoesqueleto en cada plano	45
Figura 3.3: DCL de la muñeca	46
Figura 3.4: DCL del sistema codo-muñeca	47
Figura 3.5: DCL del sistema hombro en flexión-extensión.....	48
Figura 3.6: DCL del sistema hombro en Aducción-abducción	48
Figura 3.7: Motor EC tipo Flat.....	50
Figura 3.8: Características principales Motor EC tipo Flat	50
Figura 3.9: Harmonic Drive	52
Figura 3.10: Chavetas paralela	53
Figura 3.11: Chavetas paralela	53
Figura 3.12: Conjunto motor caja reductora.....	54
Figura 3.13: Esquema del diseño del exoesqueleto	56
Figura 3.14: Diagrama esquemático entre el brazo de persona y el exoesqueleto	57
Figura 3.15: Diagrama de cuerpo libre de la muñeca con el exoesqueleto	58
Figura 3.16: Diagrama de cuerpo libre del antebrazo con el exoesqueleto	60
Figura 3.17: Diagrama de cuerpo libre del brazo con el exoesqueleto	61
Figura 3.18: Diagrama de cuerpo libre del hombro del exoesqueleto	62

Figura 3.19: Desplazamiento de la estructura del exoesqueleto	65
Figura 3.20: Factor de seguridad de la estructura del exoesqueleto	65
Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema de control.....	67
Figura 4.2: Diagrama de flujo del control de los motores	68
Figura 4.3: Diagrama de flujo del controlador principal	69
Figura 4.4: Tarjeta STM32F103C8T6.....	71
Figura 4.5: FSR	71
Figura 4.6: Diseño tentativo de la posición de los sensores de fuerza	72
Figura 4.7: Controlador del motor.....	73
Figura 4.8: Regulador de voltaje	73
Figura 4.9: Switch	73
Figura 4.10: Cableado recomendado por el fabricante	74
Figura 4.11: Esquema de conexiones para un motor.....	75
Figura 4.12: Esquema de conexiones del circuito de control	76
Figura 4.13: Esquema del exoesqueleto de miembros superiores	77



Lista de símbolos

g : aceleración de la gravedad $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
 M : momento angular [N.m]
 θ : posición angular [rad]
 t : tiempo [s]
 n : eficiencia [%]
 m : masa [kg]



INTRODUCCIÓN

Los exoesqueletos son dispositivos los cuales se adaptan a la morfología del cuerpo a fin de imitar su movimiento y, aprovechando sus mecanismos y actuadores, mejorar las capacidades físicas de la persona (reducen el costo metabólico, mejoran la ergonomía, aumentan las capacidades físicas y motoras, entre otras). Estos se han desarrollado en diferentes áreas como de rehabilitación, industrial, militar y de investigación.

El desarrollo de un exoesqueleto de cuerpo entero involucra una gran complejidad, por lo que es desarrollado por un equipo de trabajo que aborda diferentes subsistemas del exoesqueleto, como por ejemplo el exoesqueleto de miembros inferiores (extremidades inferiores hasta zona pélvica) o el exoesqueleto de miembros superiores (miembros superiores hasta zona lumbar).

Por lo tanto, considerando un primer acercamiento en el desarrollo de exoesqueletos que asistan al movimiento durante una rutina de trabajo y según estadísticas publicadas por el Ministerio de Trabajo y Promoción del empleo (MTPE) se evidencia un incremento de 18 956 a 20 282 de accidentes en el trabajo durante el periodo del 2013 al 2018, siendo de esta última cifra un 55,90% de tipo incapacitante. Es por ello que se propone el diseño de los miembros superiores para un exoesqueleto de cuerpo completo que permita a una persona levantar un objeto de hasta 30kg del suelo. Además, en el Perú, es muy frecuente levantar objetos pesados en ambientes laborales y, para estos casos, la Ley N.º29088 establece que la carga máxima a levantar del suelo es de 25kg en hombres y 15kg en mujeres, por lo que, en caso se desee levantar una

carga mayor, sin riesgo físico para el ser humano, es necesario una ayuda biomecánica como la que se propone en este trabajo.

El exoesqueleto contempla el movimiento de cinco grados de libertad de cada brazo el cual comprende desde el hombro hasta la muñeca, los tres movimientos de la articulación del hombro (abducción-aducción, rotación interna-externa y flexión-extensión), un movimiento de la articulación del codo (flexión-extensión) y un movimiento de rotación en la articulación de la muñeca (flexión-extensión).

Como primera etapa del desarrollo de este trabajo se contempla una investigación acerca de la anatomía involucrada, así como de las tecnologías existentes desarrolladas, haciendo énfasis en las más relevantes. Seguidamente, se presentan los requerimientos y el diseño conceptual del exoesqueleto. Luego, se desarrolla el diseño definitivo validado mediante cálculos y simulaciones y, finalmente, se elaboraron los planos de ensamble y despiece para su posterior fabricación, así como una estimación de los costos involucrados para su realización.

Dada la complejidad del dispositivo requerido, el trabajo muestra un mayor énfasis en el diseño mecánico considerando las condiciones funcionales del miembro superior, y elaborando una propuesta preliminar del sistema de control e instrumentación del mismo. Además, se obtendrán las fuerzas resultantes en la zona de la espalda, que servirá como punto de partida en el diseño a futuro del resto del exoesqueleto. La adaptabilidad del exoesqueleto será de acuerdo a una antropometría promedio en Latinoamérica [ÁVILA, 2007].

El diseño de este exoesqueleto busca abrir la posibilidad de desarrollar una nueva línea investigativa, que se enfoque en potenciar las capacidades físicas de la persona. Siendo los exoesqueletos una gran utilidad en actividades que las personas ya no puedan realizar por algún tipo de limitación o en potenciar la capacidad de carga de las personas, así como potenciar las capacidades físicas en general.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se presentará la información correspondiente a la biomecánica del cuerpo que comprende los miembros superiores, con mayor énfasis en el brazo. Esto con el fin de identificar los principales movimientos a imitar por los miembros superiores del exoesqueleto. Además, se presentarán alguno de los exoesqueletos que existen ya implementados y junto con algunas tecnologías acerca de su funcionamiento (mecánica, electrónica y/o control).

1.1 Planos de movimiento del cuerpo humano

El movimiento del cuerpo humano se detalla en tres planos de referencia (Figura 1.1), los cuales se detallan a continuación:

- i. Plano Frontal: Este plano divide el cuerpo humano en una parte anterior y posterior.
- ii. Plano Sagital: La división realizada en este plano es en los lados izquierdo y derecho.
- iii. Plano Transversal: Es aquel que divide al ser humano en una mitad superior y otra inferior.

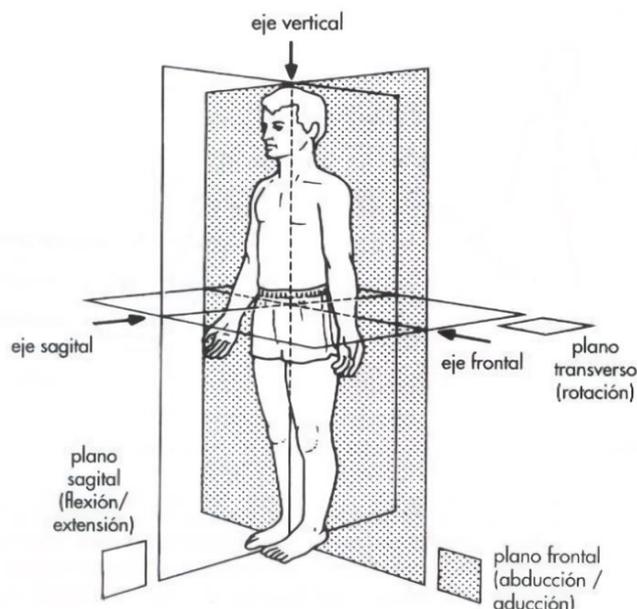


Figura 1.1: Planos de referencia del cuerpo humano [KAPANDJI, 2012]

1.2 Biomecánica funcional del brazo

La biomecánica es el estudio del funcionamiento del cuerpo humano tomando como métodos y principios a la mecánica, para así de esta forma poder cuantificar el movimiento humano, los cuales pueden ser modelados como una cadena cinemática de eslabones. [KAPANDJI, 2012].

En el caso particular del brazo, se puede separar en tres secciones el movimiento. El primero, el hombro está formado por la unión de 3 huesos, la escápula, la clavícula y el humero; además está formado por dos grupos de articulaciones, articulación escapulo humeral y la articulación subdeltoidea, en un primer grupo. En el segundo grupo están la articulación escapulo torácica, la articulación acromio clavicular y la articulación esterno clavicular. Siendo estas articulaciones las responsables de los movimientos de flexión-extensión, rotaciones medial y lateral, aducción-abducción y circunducción.

El segundo viene a ser el codo, en el cual se unen el húmero, el radio y el cúbito. Se encuentran las articulaciones humero radial, humero cubital y radio cubital superior.

Dichas articulaciones permiten el movimiento de flexión-extensión y el de pronación-supinación.

Finalmente, la muñeca es la que une el cúbito y el radio al carpo. Comprende las articulaciones radio carpiana, externa de la cámara distal y la interna de la cámara distal. El cual genera los movimientos de flexión-extensión y desviaciones cubital (aducción) y radial (abducción).

1.2.1 Movimientos del hombro

Uno de los movimientos del hombro es el de flexión-extensión (Figura 1.2), el cual se realiza en el plano sagital y tomando como referencia a un eje transversal que va desde la cabeza hasta los pies. La flexión es el movimiento de elevar el brazo en dirección a la cabeza, este movimiento tiene un rango de 0-180°, el cual se considera de una gran amplitud. En el caso de la extensión, este movimiento consiste en llevar el brazo hacia detrás del cuerpo, se efectúa con una amplitud de 0-50°.

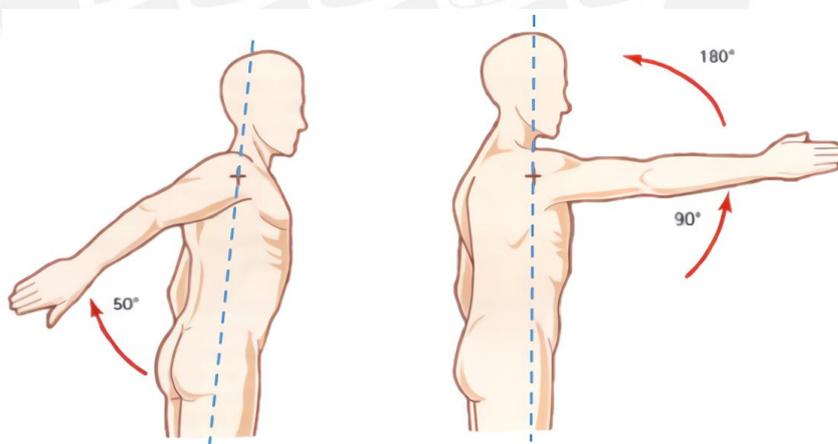


Figura 1.2: Flexión-Extensión del hombro [KAPANDJI, 2012]

El segundo movimiento que ejecuta el hombro es el de abducción-aducción. La aducción es un movimiento que al ser visto desde una posición anatómica no es plausible si es que este movimiento se asocia con un movimiento de extensión o flexión. El rango de movilidad que alcanza este movimiento acompañado de la flexión es de 30-45° y si viene guiado por un movimiento de extensión es muy leve, como se

muestra en la Figura 1.3. Por otro lado, la abducción es el movimiento en el cual el brazo se va a alejando al tronco en el plano frontal. Este movimiento tiene un rango de 0-180° (Figura 1.4).

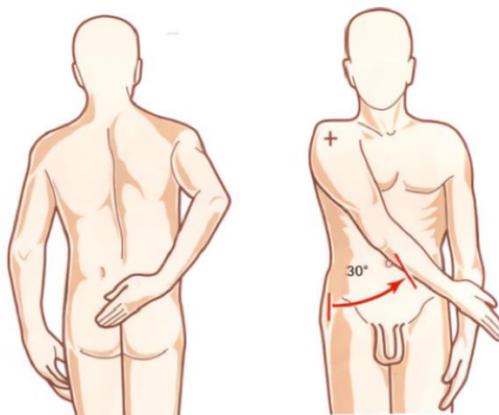


Figura 1.3: Movimiento de Aducción del hombro [KAPANDJI, 2012]

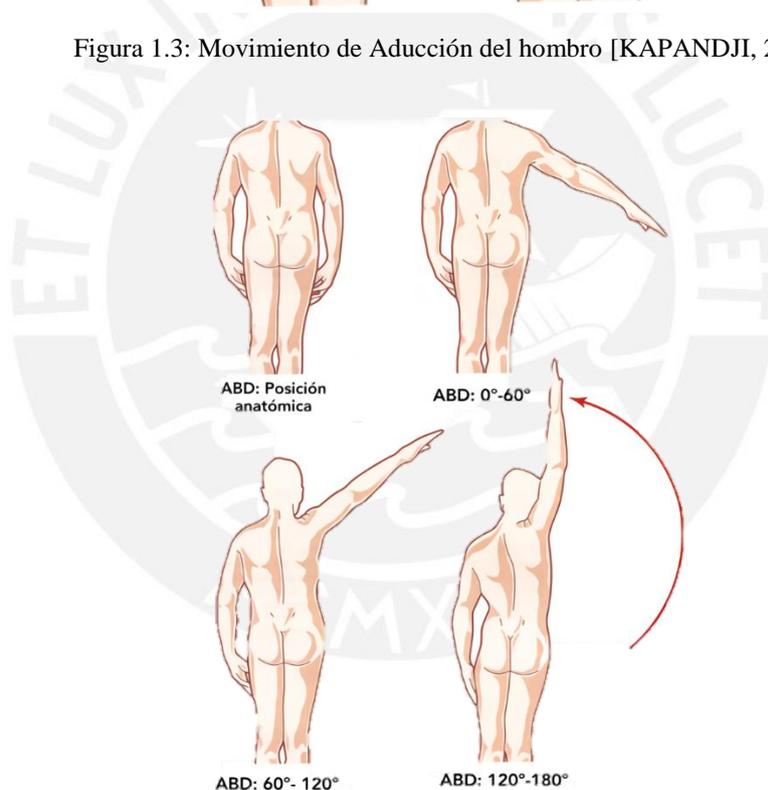


Figura 1.4: Movimiento de Abducción del hombro [KAPANDJI, 2012]

Por último, el tercer movimiento corresponde al de rotación lateral y rotación medial (Figura 1.5). Este movimiento se ejecuta en el plano transversal. El movimiento de rotación lateral consiste en realizar una flexión en el codo y colocarlo en 90° el antebrazo con respecto al brazo, para luego realizar un movimiento el cual consiste el alejar el brazo del cuerpo, este movimiento tiene una amplitud de 80°, aunque desde

un punto funcional su rango es de 0-30°. Finalmente, el movimiento de rotación medial consiste en colocar el antebrazo y brazo en la misma posición descrita anteriormente, pero realizando ahora el movimiento hacia el abdomen, posee una amplitud de hasta 110° esto es posible realizando un movimiento de extensión del hombro.

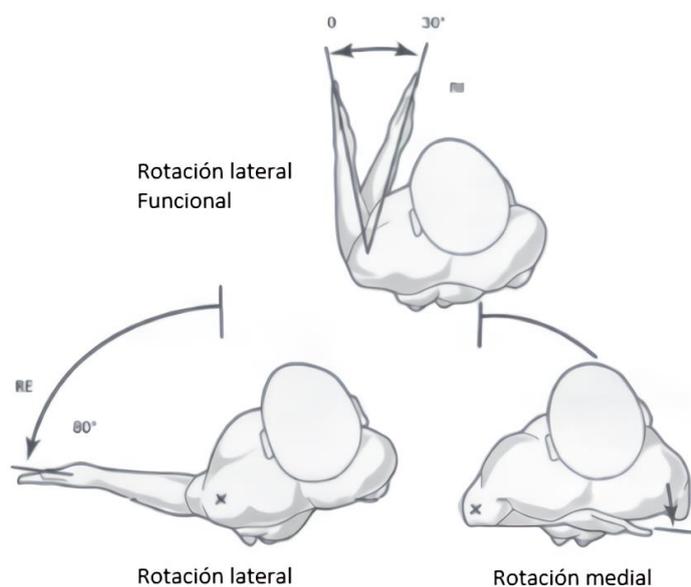


Figura 1.5: Movimiento del hombro [KAPANDJI, 2012]

1.2.2 Movimientos del codo

El codo posee dos tipos de movimientos los cuales son extensión-flexión y pronación- supinación.

El movimiento de extensión-flexión en el plano sagital y consiste en elevar y bajar el brazo en ese plano de movimiento, siendo la extensión el movimiento en el cual el brazo se encuentra completamente estirado, y la flexión en el movimiento de contracción de base con respecto al codo. El rango de movilidad de este movimiento es de 0-150°, como se muestra en la Figura 1.6.

La pronación y supinación es el movimiento en el cual el hombro rota en el plano frontal y el ángulo de movilidad se mide con respecto a ese plano. Siendo la posición neutral o ángulo 0° cuando la mano está en paralelo al plano sagital. El rango de movilidad en supinación y pronación es de 75-90° en ambos casos (Figura 1.6).

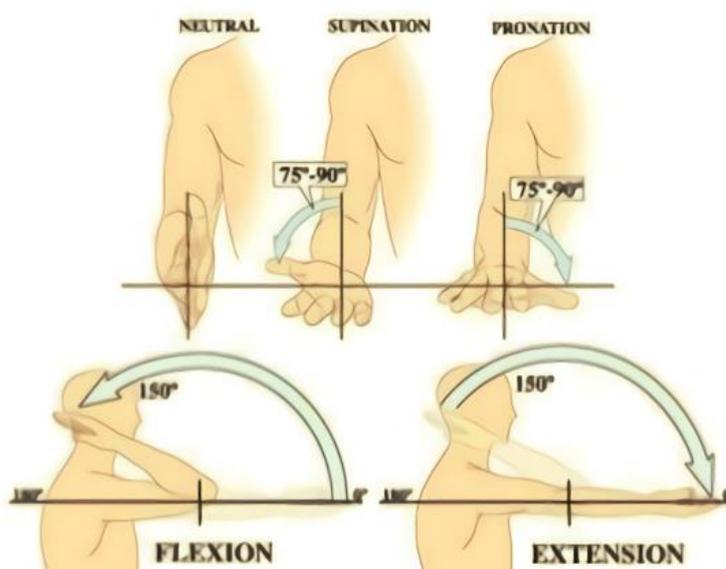


Figura 1.6: Movimientos del codo [KAPANDJI, 2012]

1.2.3 Movimientos de la muñeca

La muñeca es la encargada de realizar los movimientos de flexión-extensión, los cuales se realizan en el plano frontal, y el movimiento de desviación cubital y desviación radial. En la Figura 1.7 se muestran estos movimientos.

El movimiento de flexión-extensión ocurre en el plano sagital, este movimiento ocurre cuando la mano se mueve por encima y por debajo del antebrazo. La flexión y extensión activa ocurren con un rango de movilidad de 85° y la flexión pasiva con un rango de 100° y la extensión pasiva de 95°.

Por último, el movimiento de desviación cubital y radial. Estos movimientos consisten en mover la mano en el plano transversal. Siendo su rango de movimiento en abducción de 15° y el de aducción de 30°, como máximos.

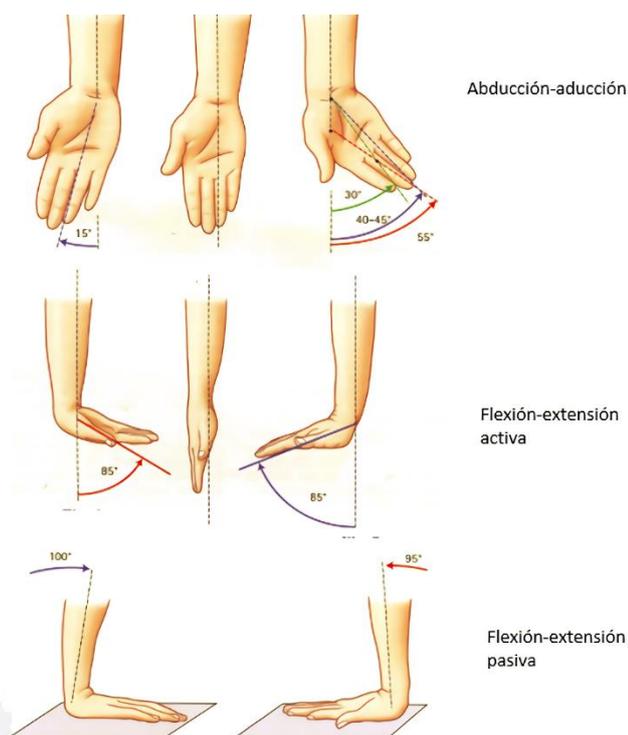


Figura 1.7: Movimientos de la muñeca [KAPANDJI, 2012]

En la tabla 1.1 se muestra un resumen del rango de movilidad del movimiento en cada articulación.

Tabla 1.1: Tabla con valores normalizados del movimiento de las articulaciones

Articulación	Movimiento	Rango
Hombro	Abducción y aducción	0° a 180°
	Rotación lateral y medial	-30° a 80°
	Flexión y extensión	-50° a 180°
Codo	Flexión y extensión	0° a 150°
	Supinación y pronación	-90° a 90°
Muñeca	Flexión y extensión	-85° a 85°

1.2.4 Antropometría

La antropometría es la ciencia que se estudia las medidas de las diferentes partes del cuerpo humano, con el objetivo de darle valor a los cambios físicos del ser humano y encontrar diferencias entre diversas poblaciones.

De acuerdo al libro: “Dimensiones Antropométricas de la población latinoamericana” [ÁVILA, 2007], muestra las medidas antropométricas de la población latinoamericana.

Siendo similar a la población peruana, es que se toma como referencia una población de hombres y mujeres entre 18 y 65 años de la Ciudad de México, Zona fronteriza México-USA y de Guanajuato, siendo la población total del estudio de 8,228 personas [ÁVILA, 2007]. La Figura 1.8 y la Tabla 1.2 muestran las medidas antropométricas de tal población.

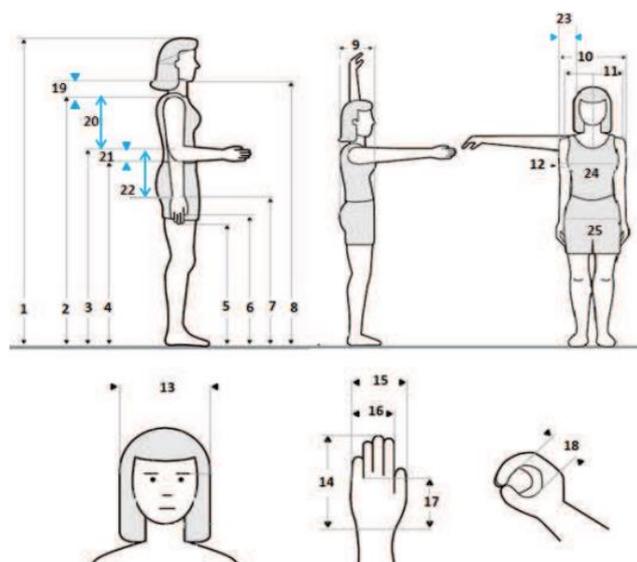


Figura 1.8: Dimensiones antropométricas del ser humano [ÁVILA, 2007]

Tabla 1.2: Resumen de las medidas antropométricas de ambos sexos

Id	Dimensiones	Mínimo	Máximo	Diferencia
	Peso (kg)	40.5	97.3	56.8
1	Estatura	139.8	181.3	41.5
2	Altura al hombro	113.8	149.2	35.4
	Altura sentado	70.0	111.2	41.2
19	Distancia del hombro al mentón	9.9	20.7	10.8
20	Longitud del brazo	24.3	55.67	31.37
21	Longitud codo-codo flexionado	2.93	11.80	8.87
22	Longitud del antebrazo	19.63	42.50	22.87
14	Longitud de la mano	8.7	28.20	19.5
17	Longitud palma mano	7.67	11.30	3.63
11	Diámetro máximo bideltoideo	36.1	54.40	18.3
10	Anchura máxima cuerpo	39.10	59.60	20.50
23	Distancia anchura	11.05	18.90	7.85
15	Anchura de la mano	8.0	24.25	16.25
16	Anchura palma mano	6.7	9.4	2.70
9	Profundidad máxima cuerpo	19.7	38.6	18.90
12	Perímetro brazo	20.3	35.2	14.90

1.3 Exoesqueletos comerciales

En esta sección se describirán de manera resumida los exoesqueletos existentes que ya son parte del mercado o están pronto a ser lanzados comercialmente, y son usados en diversas áreas. Estos exoesqueletos son de miembros superiores, inferiores o de todo el cuerpo.

1.3.1 Stuttgart Exo-JackeEt

Este exoesqueleto desarrollado para usos industriales tiene el fin de reducir las cargas en el ensamblaje y tareas de logísticas, el cual usa actuadores activos. Cada brazo posee cuatro grados de libertad (tres en el hombro y uno en el codo) siendo tres de ellos activos y el restante pasivo. Los motores usados son combinados con cajas reductoras de tipo Harmonic-Drive para así obtener la realimentación para el control. El sistema eléctrico se encuentra distribuido alrededor de zona lumbar, distribuyendo de manera adecuada las cargas. El control consiste en máquinas de estado que reconocen los estados del sistema y permite al controlador elegir el más adecuado.

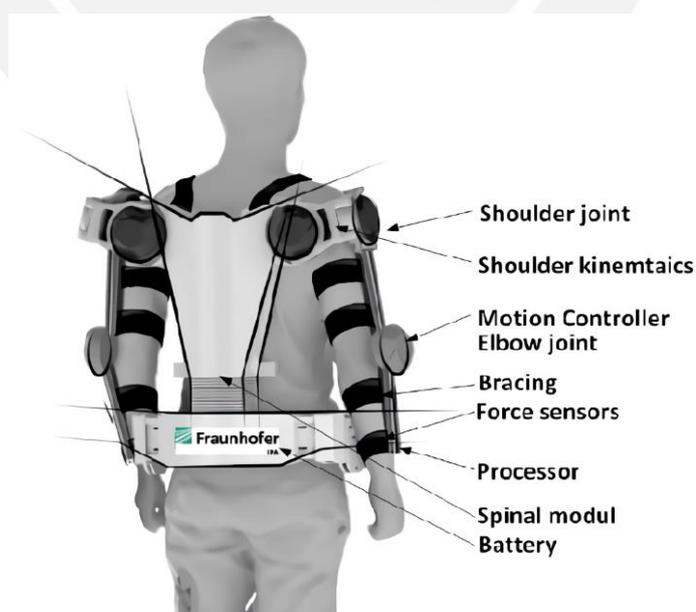


Figura 1.9: Stuttgart Exo-Jacket [EBRAHIMI, 2017]

1.3.2 MAX (Modular Agile Exoskeleton)

Este exoesqueleto (Figura 1.10) está diseñado para todo el cuerpo, el cual reduce las fuerzas en la espalda, hombros y rodillas. Está dividido en tres módulos los cuales cubren la espalda, hombros y piernas, los cuales trabajan de forma independiente y de forma conjunta según se requiera. Según estudios en la Universidad de California, estos exoesqueletos pueden reducir hasta en un 60% la fuerza requerida de los músculos para realizar ciertas tareas. El módulo de la espalda tiene un costo de 4,000 dólares, de los hombros cuesta 4,000 dólares y el de las piernas 6,000 dólares.



Figura 1.10: MAX Exoskeleton¹

1.3.3 Harmony Exoskeleton

Este exoesqueleto (Figura 1.11) permite ayudar en la rehabilitación de los miembros superiores de pacientes que han sufrido accidentes de tipo cerebro vascular. El diseño que plantea el exoesqueleto es permitir soportar su propio peso y asistir al movimiento de la persona que ocupe el exoesqueleto en la movilidad de todas las articulaciones.



Figura 1.11: Harmony Exoskeleton²

¹ Fuente: <https://www.suitx.com/home>. Consulta: 31 de Agosto de 2018

² Fuente: <https://reneu.robotics.utexas.edu/projects/harmony-exoskeleton>. Consulta: 31 de Agosto de 2018

1.4 Exoesqueletos en desarrollo

Los dispositivos presentados en esta sección muestran los exoesqueletos que han sido objeto de investigación y de los cuales han servido para futuras investigaciones.

En la Figura 1.12 se muestra el diseño de un exoesqueleto de miembro superior que se puede llevar puesto para asistir actividades de la vida diaria” [SUI, 2017]. El dispositivo cuenta con cinco grados de libertad, estando tres ubicados en el hombro y los otros dos en el codo. Cuenta con un peso de 4.2kg asimismo el sistema de control que se propone es el de compensación de torque, para lo cual el sistema de control estima el torque para poder realizar la composición mediante los conjuntos de motorreductores.

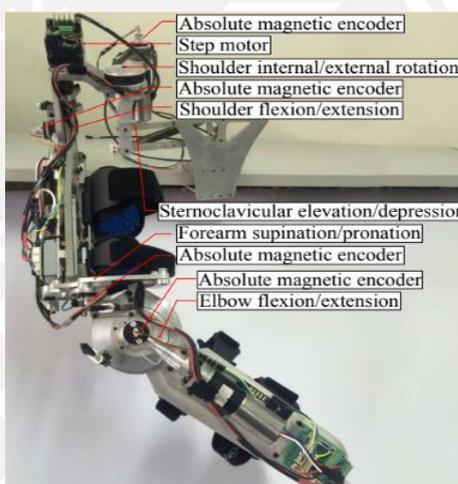


Figura 1.12: Exoesqueleto de miembro superior [SUI, 2017]

Otro caso es el diseño de un robot exoesqueleto de extremidades superiores portátil para tareas de elevación [YINGBAI, 2016]. Este exoesqueleto, desarrollado para aplicaciones de rehabilitación, especialmente para pacientes con ACV, cuenta con 3 grados de libertad en cada brazo, dos grados de libertad simulan el movimiento del hombro y el tercero el movimiento del codo (Figura 1.13). En base a los parámetros Denavit-Hartenberg es que desarrolla tanto la cinemática directa como inversa. Este prototipo usa un control PD (Proporcional-Derivativo) para cada actuador.

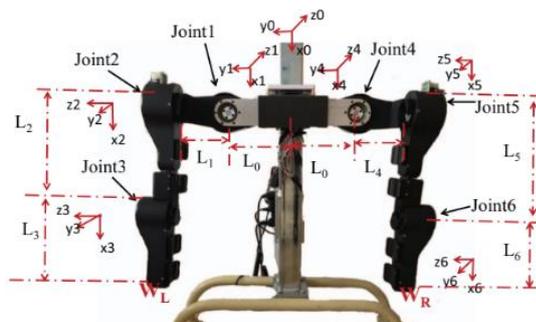


Figura 1.13: Exoesqueleto [YINGBAI, 2016]

1.5 Mecanismos

En esta sección se detallarán los recientes artículos científicos sobre mecanismos que emulan el movimiento de las articulaciones.

Un primer caso es la optimización de un mecanismo de 4 grados de libertad en el hombro (Figura 1.14) en el cual se propone el diseño de una cadena cinemática [SHING, 2013]. Cuenta con un grado de libertad adicional a los 3 que posee el hombro el cual es redundante con el fin de evitar singularidades en el movimiento. En este caso se usó un algoritmo genético a fin de optimizar las ecuaciones obtenidas por la cinemática inversa, y así evitar las singularidades que se puedan generar en las uniones articulares del exoesqueleto.

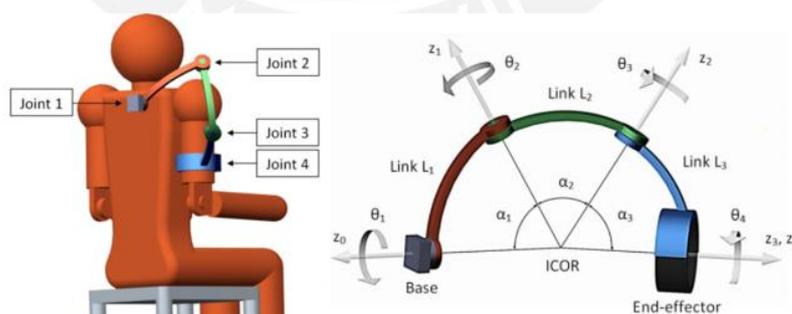


Figura 1.14: Exoesqueleto de cadena cinemática con 4 rotaciones [SHING, 2013]

Adicionalmente, en la Figura 1.15 se muestra una alternativa que busca emular el movimiento del hombro mediante mecanismos esféricos, esto mediante articulaciones pasivas de cuatro y cinco grados de libertad [HSIANG, 2015]. A través de actuadores

eléctricos se genera el movimiento de abducción-aducción y el de flexión-extensión del hombro. El peso de este modelo es de 2.08kg y está fabricado de una aleación de aluminio. Asimismo, el mecanismo de balanceo de gravedad permite reducir el tamaño del motor y la pérdida de energía, esto debido a que cuenta con un mecanismo en paralelo el cual posee un resorte que permite el movimiento del miembro superior en la dirección del eje Z y soporta el peso del miembro superior.

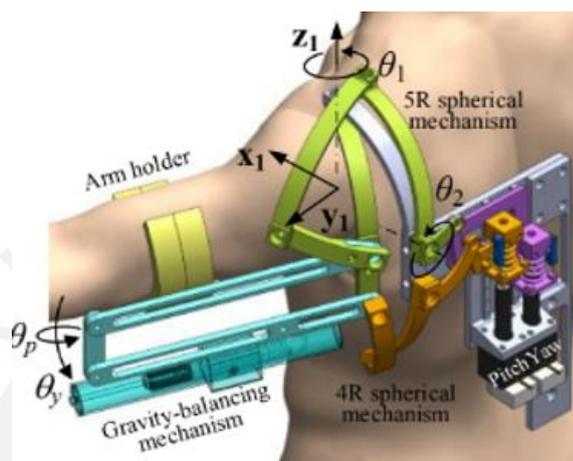


Figura 1.15: Mecanismo del hombro [HSIANG, 2015]

1.6 Sistemas de control

En la siguiente sección se expondrán el sistema de control de exoesqueletos de miembros superiores. Estos exoesqueletos pertenecen a líneas de investigación y no son de tipo comerciales.

En la Figura 1.16 se muestra un exoesqueleto de miembros superiores en el cual se diseñó y experimentó con un algoritmo de control para el movimiento de los de 3 grados de libertad que posee el exoesqueleto [HWIWON, 2017]. Se emplea un sensor de fuerza, el cual está ubicado en la muñeca, luego esa fuerza medida se desacopla a los pares de cada articulación, para cada motor, entonces con el torque calculado se estima la intención de movimiento del usuario y se genera la señal de referencia a los motores. En la Figura 1.17 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

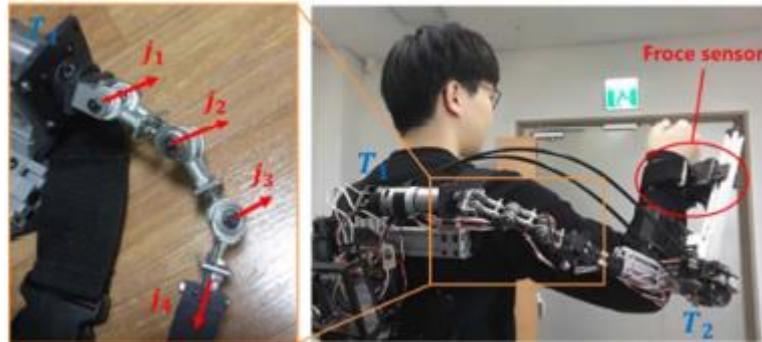


Figura 1.16: Exoesqueleto de tres grados de libertad [HWIWON, 2017]

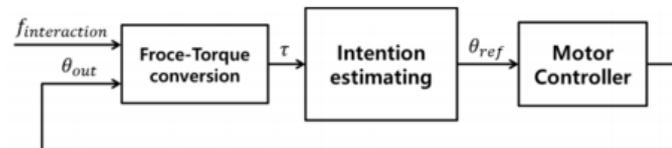


Figura 1.17: Diagrama del sistema de control [HWIWON, 2017]

Asimismo, Shitong diseñó y simuló un controlador de compensación dinámica de carga basado en modelo dinámico para un exoesqueleto de miembros superiores [SHITONG, 2017]. En este trabajo se desarrolló un sistema de control para un exoesqueleto de dos grados de libertad, el cual se muestra en la Figura 1.18. El objetivo es compensar la carga que sujetara el extremo operativo del exoesqueleto ya que es desconocido. Para ello, se coloca un sensor de fuerza (de seis dimensiones), entre la carga y el extremo operativo, para así de esta forma controlar el torque en cada articulación. Dicho controlador es mostrado en la Figura 1.19.

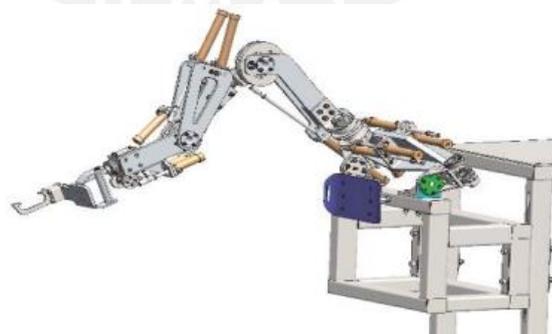


Figura 1.18: Exoesqueleto de dos grados de libertad [SHITONG, 2017]

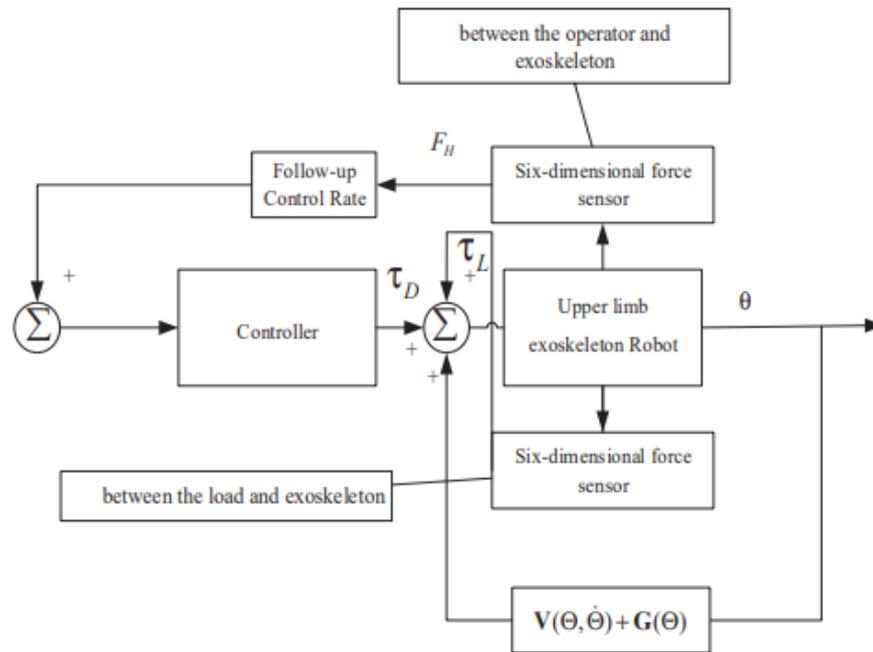


Figura 1.19: Controlador de compensación de carga [SHITONG, 2017]

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se detallarán los requisitos tomados en cuenta para el desarrollo del diseño conceptual siguiendo la metodología alemana VDI 2221 “Proceso generalizado de desarrollo y diseño de sistema mecatrónicos”. Se detallarán los requerimientos de todo el dispositivo, se presenta las soluciones preliminares y de estas se elige el diseño definitivo para su posterior desarrollo a través de un análisis técnico-económico.

2.1 Requerimientos

Partiendo de las ideas y conceptos del capítulo anterior sobre la biomecánica del brazo, exoesqueletos ya existentes y funcionales en diversas líneas de operación, mecanismos que simulan el movimiento humano e investigaciones, es posible plantear los requerimientos que permitan obtener un diseño conceptual del exoesqueleto de miembro superior a desarrollar, siendo el principal los límites de carga establecidos al levantar un objeto del suelo por la ley N° 29088 que estipula un máximo de 25kg en hombres y 15kg en el caso de mujeres.

2.1.1 Función Principal

La función principal de los miembros superiores del exoesqueleto es permitir levantar un objeto de hasta 30kg desde el suelo reduciendo en hasta un 60% el esfuerzo en las articulaciones. Tomando como referencia lo establecido en la norma peruana (Reglamento de la ley de seguridad y salud en el trabajo de los estibadores terrestres y transportistas manuales, Capítulo II, Artículo 2°) para levantar objetos, el peso a levantar por hombres debe ser como máximo 25kg y en mujeres 12.5kg. Es así que se propone una carga máxima de 30kg.

2.1.2 Cinemática

La cinemática del exoesqueleto estará limitado a cinco grados de libertad por cada brazo. En el hombro se imitarán los movimientos de flexión-extensión, aducción-abducción y rotación lateral-rotación medial. Seguidamente, los movimientos del codo a los cuales este diseño limita son los de flexión-extensión, finalmente, en la muñeca se contempla el movimiento de flexión-extensión. Los rangos de movilidad se encuentran definidos en la Tabla 1.1. Este rango de movilidad se normaliza a los valores mostrados en la Tabla 2.1, debido a los elementos mecánicos y eléctricos que presentará el diseño del exoesqueleto, por ende, estos reducen el rango de movimiento. Además, debido a las singularidades del exoesqueleto, este rango se reduce aún más. Estos valores normalizados serán considerados durante el análisis de cinemática diferencial, la cual se presentará en el Capítulo 3.

Tabla 2.1: Tabla con valores normalizados del movimiento de las articulaciones

Articulación	Movimiento	Rango Normalizado
Hombro	Abducción y aducción	0° - 90°
	Rotación lateral y medial	-10° - 50°
	Flexión y extensión	0° - 45°
Codo	Flexión y extensión	0° - 120°
Muñeca	Flexión y extensión	-60° - 60°

2.1.3 Fuerza

Los miembros superiores del exoesqueleto se diseñarán de tal manera que se permita la transmisión de las fuerzas necesarias para soportar y elevar la carga de máximo 30kg en los movimientos descritos en el apartado 2.1.2.

2.1.4 Usuario

La persona, o usuario que porte el exoesqueleto, deberá contar con las medidas antropométricas que se presentan en la Tabla 2.2. Estas medidas corresponden a la normalización del rango de valores presentados en el Capítulo 1. Este rango de longitud se propone ya que el 75% de personas del estudio se encuentran contenidas en el rango, y el resto de la población no se toma en cuenta ya que corresponden a valores atípicos.

Tabla 2.2: Resumen de las medidas antropométricas de ambos sexos

Parámetro	Valor normalizado [cm]	Valor promedio [cm]
Longitud del brazo	18.0 – 38.0	28
Longitud del antebrazo	13.2 – 30.0	21.6
Profundidad máxima del cuerpo	10.5 – 15.2	12.85
Longitud de la mano	9.7 – 23.0	16.35

2.1.5 Ergonomía

Los miembros superiores del exoesqueleto se diseñarán para realizar el movimiento de elevar una carga desde el suelo. El exoesqueleto presentará el diseño adecuado para que, al ser colocado en los brazos de la persona, esta no sienta fatiga o cansancio en alguna zona del brazo, ni tampoco en las articulaciones debido al peso del mismo exoesqueleto. Además, contará con materiales que no presenten ningún tipo de molestia o incomodidad durante su uso.

2.1.6 Control

El sistema de control que se propondrá es el de compensación por torque el cual consistirá en obtener la información con respecto a la posición angular mediante sensores de posición, para así poder calcular el torque en cada actuador, con esa información el sistema de control será capaz de compensar el torque en cada articulación a fin de ayudar a soportar la carga extra que se genera al levantar el objeto, siendo este tipo de señal de tipo analógica. Así mismo, en el extremo articular del dispositivo se dispondrá de sensores de fuerza, los cuales permitan reconocer la carga que se está manipulando. Debido a que sería innecesario asistir a la persona con cargas pequeñas, es que el controlador empezará a mover los actuadores cuando la carga sea de un 50% del máximo que una persona puede levantar, lo cual en el caso del hombre es de 25kg y el de la mujer 12.5kg.

2.1.7. Seguridad

El dispositivo se diseñará partiendo de la premisa que una persona se colocará encima el dispositivo, por ende, a nivel mecánico el diseño evitará contar con elementos o componentes que puedan causar algún tipo de daño a la persona y ser elementos rígidos. A nivel eléctrico, el dispositivo deberá presentar aislamientos adecuados entre los elementos eléctricos (sensores, actuadores, controladores, etc), a fin de que la persona no se vea expuesta a descargas eléctricas no controladas. Finalmente, a nivel de control, el exoesqueleto contará con algoritmos que limiten los movimientos de los actuadores y de sensores para ayudar a ese propósito.

2.1.8. Fuente de energía y Autonomía

Debido a que el dispositivo no es un producto final, sino parte de un proyecto más grande (desarrollo de un exoesqueleto de cuerpo entero), se entregará el requisito energético para el correcto funcionamiento del exoesqueleto y se propondrá una opción para el diseño de una fuente eléctrica que sea capaz de cubrir el requerimiento

energético. Siendo un valor referencial de 17.5KWh de un exotraje de cuerpo entero [FONTANA,2014].

2.1.9. Portabilidad

El exoesqueleto tendrá un peso menor a 12kg en cada brazo, por ello se priorizará en elementos que cuenten con una alta relación eficiencia-peso y elementos estructurales que sean ligeros y cuenten con una adecuada resistencia.

2.1.10. Ensamble y Mantenimiento

Los diferentes elementos serán diseñados de forma modular, con el fin de poder ensamblar y desensamblar los diversos componentes mecánicos y poder realizar un mantenimiento óptimo a los elementos mecánicos y eléctricos.

2.1.11 Fabricación

La fabricación del exoesqueleto se realizará con materiales ligeros, resistentes y que no supongan un costo elevado de fabricación, priorizando elementos que se adquieran en el mercado local y que el trabajo de mecanizado pueda ser realizado localmente.

2.1.12. Instrumentación

Los dispositivos mecánicos serán adquiridos y comprados en el mercado local. Mientras que en la electrónica se priorizará que los componentes se adquieran en el mercado local, o en todo caso serán adquiridos mediante exportación. Se priorizará la adquisición de actuadores de gama alta, debido a que el sistema actuado debe ser el más óptimo en relación peso-rendimiento.

En la Tabla 2.3 se muestra un resumen con los requerimientos que se priorizarán en el diseño del exoesqueleto.

Tabla 2.3: Resumen de los requerimientos principales

Requerimiento	Descripción
Función Principal	Permitir a una persona poder levantar una carga de 30kg como máximo.
Cinemática	Permitirá el movimiento en 5GDL.
Fuerza	Permitirá que la persona soporte una carga de 30kg reduciendo el esfuerzo en las articulaciones.
Usuario	Será de diseño adaptable, mediante un rango que dimensional que engloba al 75% de personas.
Ergonomía	Presentará un diseño ergonómico que permita levantar con ambas manos un objeto.
Control	Realizará los cálculos del torque en cada posición de acuerdo a valores leídos por sensores para así controlar el dispositivo, además se contará con sensores de fuerza.
Seguridad	Contará con medidas mecánicas, eléctricas y de algoritmos para garantizar una adecuada seguridad.
Fuente de energía y Autonomía	Se realizará los cálculos energéticos y se propondrá una fuente de energía para un posterior diseño.
Portabilidad	Diseño no mayor a 12kg por cada miembro superior..
Ensamble y Mantenimiento	Diseño modular para fácil ensamble y mantenimiento.
Instrumentación	Elementos mecánicos adquiridos en el mercado local, y electrónica, mercado local e importación.

2.2 Caja Negra (Black Box)

Los miembros superiores del exoesqueleto por diseñar contemplan el uso de energía eléctrica para su total funcionamiento, lo cual incluye la alimentación de los actuadores, sensores, dispositivos de control y electrónica en general (indicadores, pulsadores, etc.). El dispositivo recibirá como parámetros de entrada la intención de movimiento y el objeto a cargar y, con esto, al término del proceso se obtendrá el movimiento ya realizada y el objeto levantado del suelo o de otra superficie.

Este proceso del exoesqueleto liberará a la vez calor, debido a los actuadores y electrónica tanto de potencia como de control, ruido y vibraciones, provenientes también de los actuadores.

Por último, el exoesqueleto contará con señales las cuales permitirán controlar el dispositivo. Estos son, botones de encendido y apagado, la lectura de los encoders para el control y sensores de fuerza. Además, existirán indicadores para observar el nivel

de batería y el estado de los actuadores. La Figura 2.1 muestra la “caja negra” la cual presenta las entradas y salidas que permitirán el desarrollo del exoesqueleto.

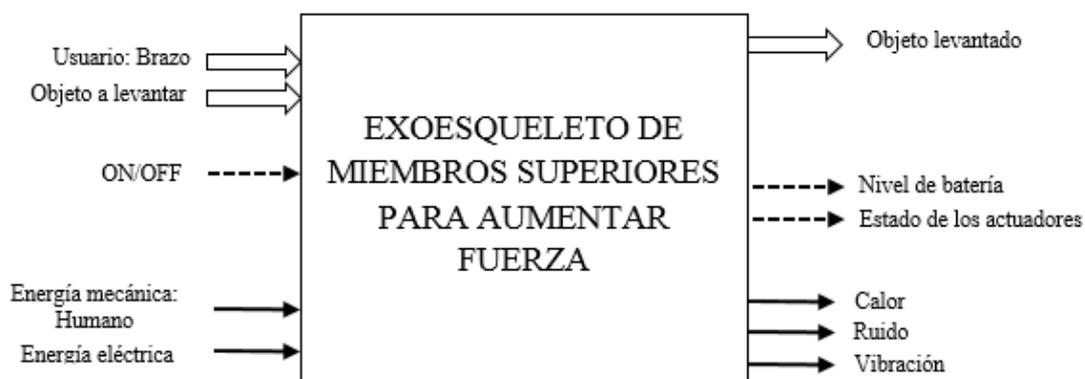


Figura 2.1: Caja negra del proyecto

En los siguientes subtítulos, se hará uso de abreviaciones para indicar los movimientos del brazo. Dichas abreviaciones se detallarán en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Abreviaturas de los movimientos del brazo

Parte del cuerpo	Movimiento	Abreviatura
Hombro	Flexión y extensión	H-FE
	Abducción y aducción	H-ABAD
	Rotación lateral y medial	H-RLM
Codo	Flexión y extensión	C-FE
	Supinación y pronación	C-SP
Muñeca	Flexión y extensión	M-FE

2.3 Estructura de funciones

El funcionamiento del exoesqueleto debe seguir una serie de acciones, las que están basadas en tres grandes disciplinas (mecánica, electrónica y control)

En el dominio mecánico, el sistema recibe al brazo del usuario y el objeto a levantar, y como energía mecánica, a la humana que es la que manipula el exoesqueleto. Seguidamente la persona debe colocarse el exoesqueleto ajustando a su medida de brazo y sujetando el exoesqueleto al brazo. Luego, comienza el movimiento para recoger el objeto, primero acercando las manos y agachándose al objeto, para levantarlo. Finalmente, levanta el objeto, resultando como salida el objeto levantado,

y desprendiendo energía en forma de calor, ruido y vibraciones. Cabe resaltar, que el diseño del acoplamiento entre el sistema de miembros superiores con el sistema espalda-torso no se presenta en este trabajo, pero si se entregan las fuerzas resultantes.

En el dominio electrónico, el sistema recibirá la energía de una fuente eléctrica de acuerdo al requerimiento energético para el accionamiento de los actuadores. El diseño de dicha fuente no se encuentra dentro de los alcances de este proyecto, puesto que lo que se espera desarrollar como futuro trabajo es un exoesqueleto de cuerpo entero. Con esta energía, se alimenta tanto al sistema de control como al de potencia mediante el uso de rectificadores. Donde el sistema de potencia corresponde a los actuadores y el sistema de control comprende al controlador y a los sensores de posición y fuerza.

Por último, el dominio de control, comprende al controlador, el cual controlará todo el sistema mediante el cálculo del peso del objeto a levantar, las posiciones de cada actuador y las señales de entrada los cuales encienden y apagan el dispositivo.

En la Figura 2.2 se muestra la estructura de funciones del dispositivo a desarrollar en el presente trabajo.

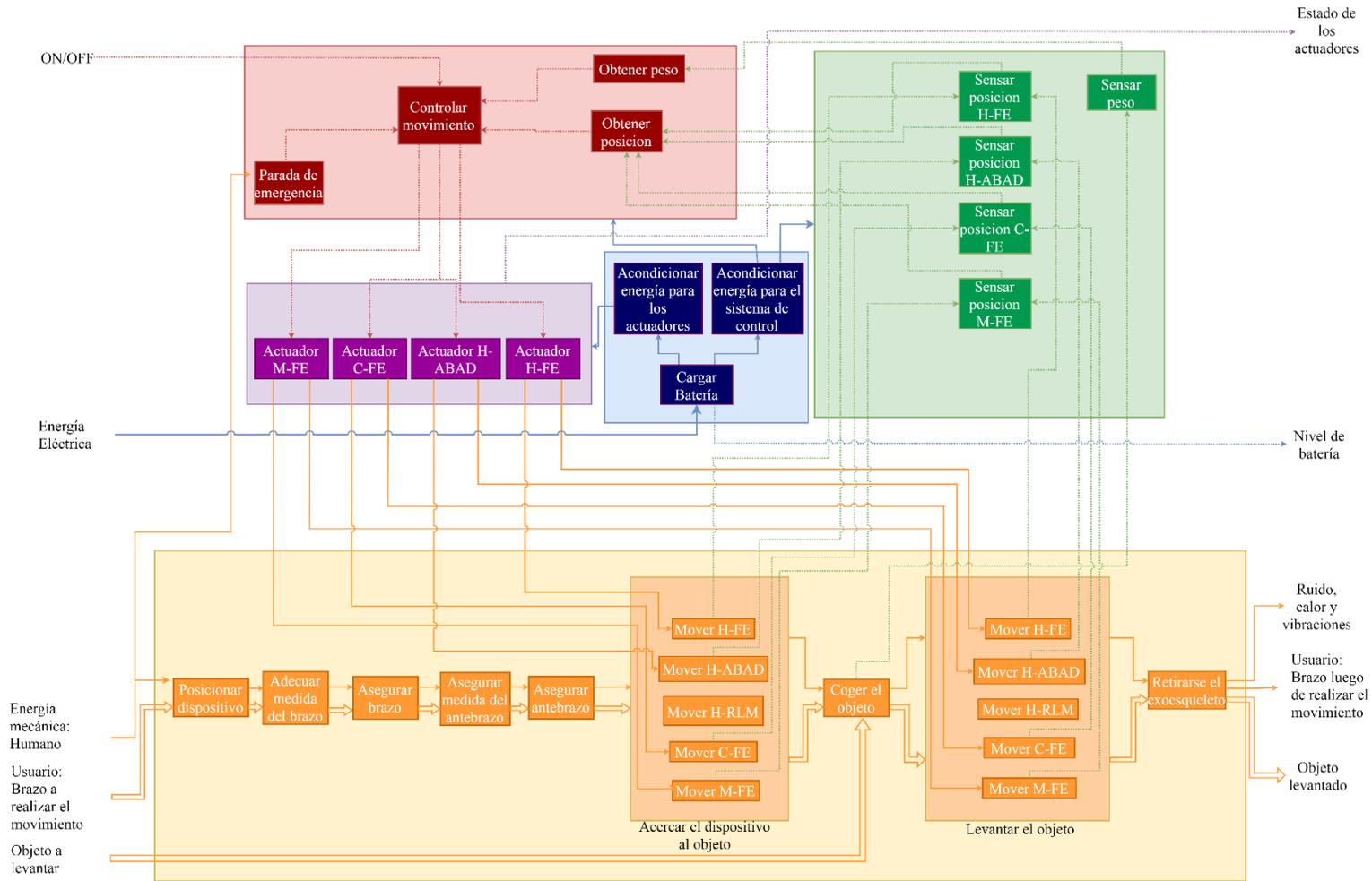


Figura 2.2: Diagrama de estructura de funciones

2.43 Matriz Morfológica

En la obtención del concepto de solución se procede a proponer diversas soluciones a las funciones de cada dominio, a fin de elegir entre ellas y obtener el diseño final de los miembros superiores del exoesqueleto. Por ende, se procederá a desarrollar la matriz morfológica en cada dominio previamente identificado.

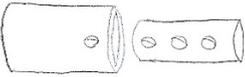
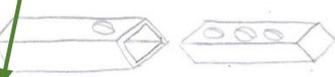
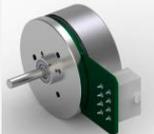
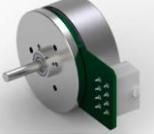
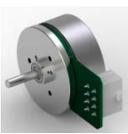
Las soluciones se determinarán mediante las siguientes nomenclaturas:

- Solución 1: 
- Solución 2: 
- Solución 3: 

2.4.1 Dominio mecánico

En este apartado se procederá a representar de manera gráfica la selección de los componentes mecánicos, ya sean activos (actuadores) y pasivos (mecanismos) los cuales cumplen una función dentro del desarrollo del exoesqueleto. En la Tabla 2.5 se aprecia la matriz morfológica de las funciones del dominio mecánico y la selección de las soluciones.

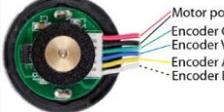
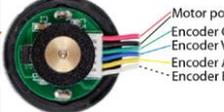
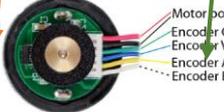
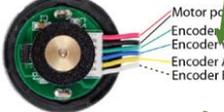
Tabla 2.5: Matriz morfológica del dominio mecánico

Funciones	Portadores de funciones	
Posicionar exoesqueleto	 <p>Manos</p>	
Asegurar brazo	 <p>Velcro</p>	 <p>Correa</p>
Adecuar medida del brazo	 <p>Mecanismo 1</p>	 <p>Mecanismo 2</p>
Asegurar antebrazo	 <p>Velcro</p>	 <p>Correa</p>
Asegurar muñeca	 <p>Velcro</p>	 <p>Correa</p>
Mover hombro flexión-y extensión	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>
Mover hombro aducción y abducción	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>
Mover hombro rotación lateral y medial	 <p>Rodamiento</p>	 <p>Servomotor</p>
Mover codo flexión-extensión	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>
Mover muñeca flexión-extensión	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>
Coger y sujetar el objeto	 <p>Manos</p>	

2.4.2 Dominio Eléctrico / Electrónico

En esta sección se ilustrarán los componentes electrónicos y eléctricos que ofrecen solución a las funciones que realizará el exoesqueleto en este dominio. En la Tabla 2.6 se muestra la matriz morfológica correspondiente al dominio mecánico.

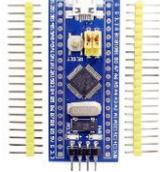
Tabla 2.6: Matriz morfológica del dominio eléctrico / Electrónico

Funciones	Portadores de funciones	
Alimentación	Fuente a Diseñar en un futuro proyecto	
Acondicionar energía: circuito de potencia	 Driver	 Fuente switching
Acondicionar energía: circuito de control	 Driver	 Fuente switching
Sensar posición del hombro flexión-extensión	 Encoder	 Efecto Hall
Sensar posición del hombro abducción-aducción	 Encoder	 Efecto Hall
Sensar posición del codo flexión-extensión	 Encoder	 Efecto Hall
Sensar posición de la muñeca flexión-extensión	 Encoder	 Efecto Hall
Sensar Fuerza	 Sensores de fuerza	

2.4.3 Dominio de control

En este apartado se especificarán los componentes a usar en el control y el algoritmo de control de los motores, dicha información se detalla en la tabla 2.7.

Tabla 2.7: Matriz morfológica del dominio eléctrico / Electrónico

Funciones	Portadores de funciones	
Controlar sistema	 Controlador	 Microcontrolador
Obtener peso	Promedio y escalamiento de data leída	
Obtener posición	Escalamiento y acondicionamiento de cada sensor	
Parada de emergencia	 Pulsador	 Switch

2.5 Diseño conceptual

La matriz morfológica permite conocer soluciones a cada función que el dispositivo tendrá como exigencia que realizar. De la matriz ya realizada se extrajeron tres posibles soluciones las cuales se describen en los siguientes puntos.

Cabe resaltar que la sujeción del exoesqueleto a la persona, en las tres soluciones, se realizará mediante bandas de velcro acondicionadas de forma que las cargas entre el

usuario y los miembros superiores del exoesqueleto sean uniformes, generando la menor fatiga posible.

Además, las tres soluciones consideran que toda la electrónica estará instalada en la zona de la espalda del exoesqueleto, pero ya que el diseño principal contempla solo los brazos, está no está indicada en los bosquejos.

2.5.1 Solución 1

La presente solución se basa en el uso de cuatro motores eléctricos EC de tipo flat, ya que son modelo compacto y presentan un bajo peso. Los actuadores son para los movimientos de flexión y extensión, y abducción y aducción del hombro, flexión y extensión del codo, y flexión extensión de la muñeca. Los movimientos de rotación lateral y medial del hombro, serán realizados por mecanismos que permitan la movilidad dentro del rango de movimiento ya establecido. La sujeción entre la muñeca y el actuador será mediante un mecanismo en “L” el cual irá unido a la muñeca mediante una configuración de tela [ROCON, 2007]. El recojo y movimiento del objeto será realizado por las manos del usuario. La persona podrá adaptar la medida de su brazo a la del exoesqueleto esto debido a un mecanismo diseñado para tal propósito y la sujeción del exoesqueleto se realiza mediante bandas de velcro. Para poder ejecutar el control del dispositivo se dispone de sensores de posición, los cuales serán encoders a fin de poder conocer la posición de los motores y poder obtener el torque de cada motor, para el medir el peso del objeto a levantar se hará uso de un arreglo de sensores de fuerza ubicados de forma pertinente en la palma de la persona. Para el procesamiento y la ejecución del algoritmo de control se empleará una placa de desarrollo STM32, esto debido a su capacidad de procesamiento, la cantidad de pines para todas las conexiones y su comunicación con diversos dispositivos. Por último, el sistema será energizado por una batería la cual será cargada por energía eléctrica doméstica. La energía se acondicionará, mediante el uso de placas electrónicas que cumplan tal función, para alimentar tanto al sistema de control con el sistema de potencia. El bosquejo de la solución 1 se muestra en la Figura 2.3.

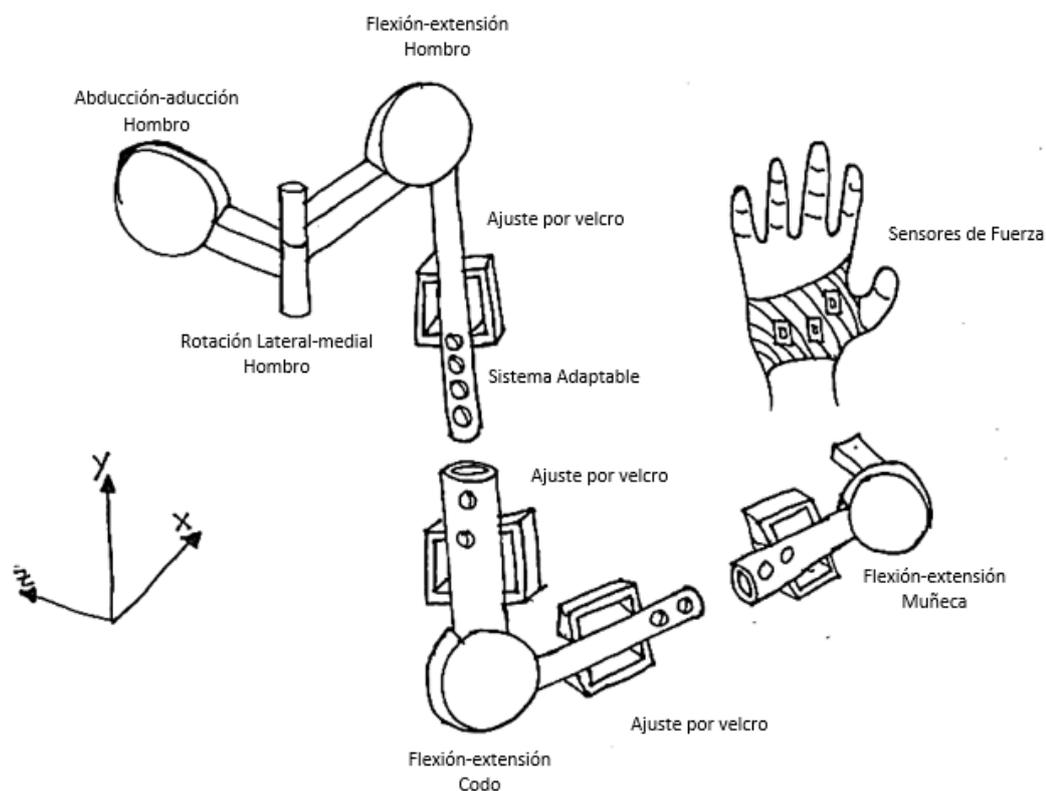


Figura 2.3: Bosquejo de la solución 1

2.5.2 Solución 2

En este diseño se consideró el uso de motores EC tipo flat en cuatro grados de libertad, esto para garantizar un efectivo control de todos los movimientos propuestos. Las manos siguen siendo la solución para el recojo del objeto. El sistema de acople entre el exoesqueleto y el brazo del usuario, es mediante correas de cuero y el sistema de adaptabilidad (ajustar la distancia del brazo) es mediante un mecanismo prismático. En este caso para reconocer la posición de los actuadores se plantea el uso de sensores de posición tipo encoder, para así poder ejecutar un algoritmo de control en base a la posición y de galgas extensiométricas para cuantificar el peso a cargar. Para el procesamiento de toda la información recopilada por los sensores, se optó por una tarjeta de desarrollo STM32, la cual cuenta con un nivel de procesamiento alto y con la cantidad suficiente de pines para controlar todo el dispositivo. La energía se acondiciona mediante fuentes switching la cual alimenta tanto al sistema de control y al de potencia. En la Figura 2.4 se muestra la solución 2.

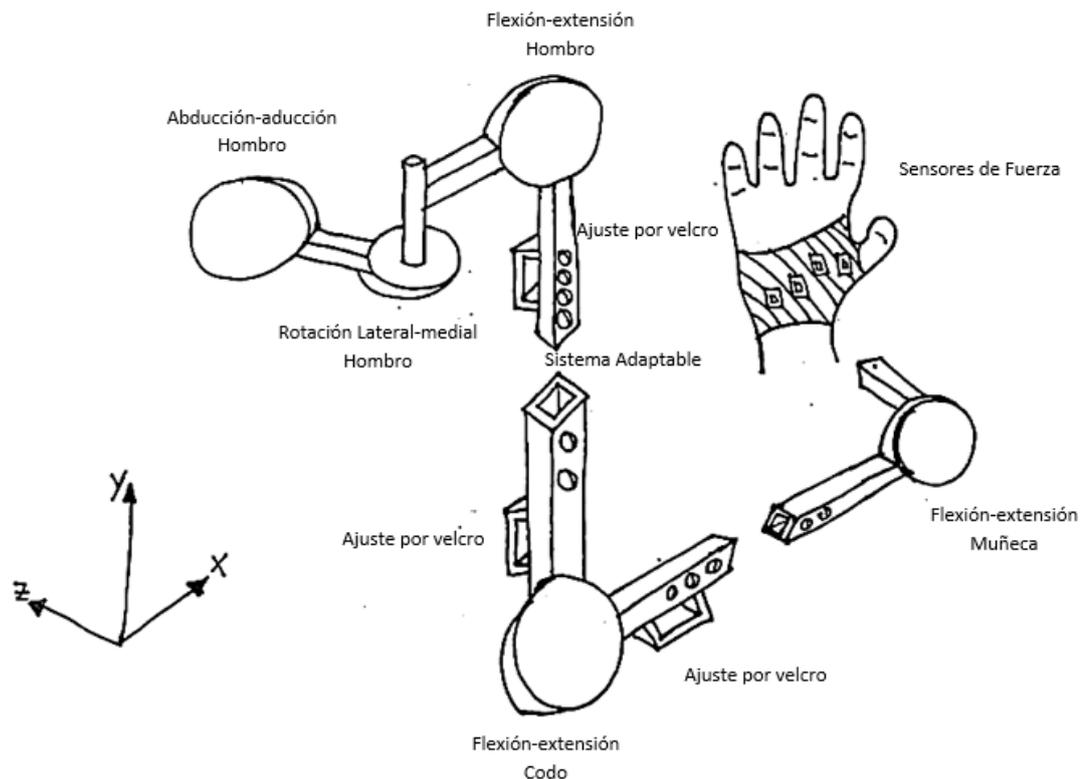


Figura 2.4: Bosquejo de la solución 2

2.5.3 Solución 3

La tercera solución se basa en el uso de cuatro motores de paso para los movimientos de flexión y extensión, y abducción y aducción del hombro, flexión y extensión del codo, y flexión extensión de la muñeca. El movimiento de rotación lateral y medial del hombro, será realizado de forma idéntica a la solución 1. Contará como sensor de posición a sensores de tipo Hall y sensores de fuerza para la medición de fuerza. El control se realizará con una Tiva Launchpad, debido a su bajo precio y capacidad de procesamiento óptimo. La energía eléctrica se acondicionará mediante el uso de tarjetas electrónicas diseñadas para ese propósito. Dado que la solución 3 es similar a la 1, ya que su única diferencia es el tipo de motores, el bosquejo es idéntico, lo único que varía es el tipo de acople del motor al exoesqueleto, ya que son motores paso a paso los cuales son más grandes y más pesados.

2.6 Análisis Técnico-Económico

Dados los tres conceptos de soluciones presentados previamente, se procederá a realizar el análisis técnico-económico. En el análisis técnico se muestra en la Tabla 2.8, mientras que en la Tabla 2.9 se muestra el respectivo análisis económico.

Tabla 2.8: Análisis técnico de los conceptos de solución

Variantes de Concepto / Proyecto		Solución 1			Solución 2		Solución 3	
Nr.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp
1	Seguridad	4	3	12	2	8	2	8
2	Ergonomía	4	3	12	2	8	2	8
3	Aprovechamiento de energía	3	2	6	1	3	1	3
4	Fácil montaje	3	3	9	3	9	2	6
5	Fácil mantenimiento	3	3	9	2	6	2	6
6	Fácil limpieza	3	3	9	2	6	2	6
7	Peso del equipo	4	4	16	2	8	1	4
8	Facilidad de control de los grados de libertad	5	3	15	3	15	2	10
9	Precisión de movimientos	5	3	15	3	15	3	15
	Puntaje máximo		27	103	20	78	17	66
	Valor técnico		0.75	0.76	0.74	0.76	0.63	0.65

Tabla 2.9: Análisis económico de los conceptos de solución

Variantes de Concepto / Proyecto		Solución 1			Solución 2		Solución 3	
Nr.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp
1	Número de piezas	2	3	6	2	4	2	4
2	Costo energético	4	2	8	1	4	1	4
3	Costo de fabricación	3	2	6	1	3	1	3
4	Fácil adquisición de componentes	5	2	10	1	5	2	10
5	Costo de la tecnología	4	2	8	2	8	2	8
7	Costos diversos	2	2	4	1	2	2	4
	Puntaje máximo		13	42	8	26	10	33
	Valor económico		0.72	0.70	0.67	0.65	0.83	0.83

Con la información proveniente de ambos análisis, se procede a plasmar en una gráfica las tres soluciones, para así poder obtener el diseño que más se acerque al valor ideal descrito por una línea con orientación de 45°, siendo la más óptima la solución que más se acerque a esa recta y que, además, se encuentre más alejada del origen de coordenadas (Figura 2.5).

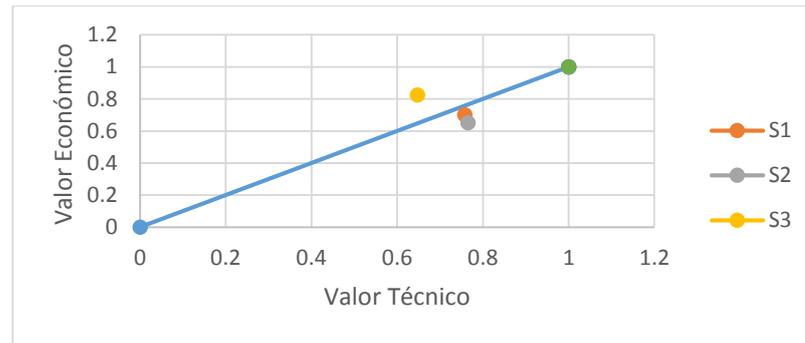


Figura 2.5: Análisis técnico-económico

En conclusión, la solución 1, fue la que más se acercó a la recta, por ende, es el concepto de solución definitivo. Este resultado presenta dentro sus más importantes ventajas, el uso de actuadores en las articulaciones que más presencia tienen durante la ejecución de levantamiento de un objeto del suelo, las cuales son, el movimiento de flexión y extensión del hombro y del codo, y el movimiento de abducción y aducción del hombro. Mientras que el movimiento de flexión y extensión de la muñeca no se encarga completamente de contribuir a la carga del objeto, este actuador se encargará de guiar al movimiento. Debido a que el exoesqueleto es un dispositivo que va a estar colocado sobre la persona, es de vital importancia que los componentes a usar sean compactos y con el menor peso posible, debido a esto es que a nivel electrónico los componentes que presenta esta solución son de tamaño pertinente acorde al cuerpo humano.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

En el presente capítulo se presentan los cálculos y el análisis de todos los elementos mecánicos que conformarán el diseño conceptual.

Inicialmente, se realizará el análisis de cinemática del exoesqueleto y se realizará un análisis de las singularidades del sistema. Luego, se analiza la posición en la cual el exoesqueleto se encuentra sometido a los mayores esfuerzos y se calculan las fuerzas internas. Finalmente, mediante el uso de software se calcula el factor de seguridad y la deformación del exoesqueleto.

3.1 Modelo cinemático del mecanismo del exoesqueleto

En la presente sección se realizará el modelo cinemático del exoesqueleto mediante Denavit-Hartenberg, desarrollando la cinemática directa, la cinemática inversa y el análisis de singularidades.

3.1.1 Cinemática directa

Mediante el método Denavit-Hartenberg se calcula la posición y orientación del extremo operativo del exoesqueleto, por ello se define que la posición base u origen será el actuador colocado sobre el omóplato el cual permite el movimiento de abducción y aducción del hombro, y el extremo operativo será el actuador de la muñeca que permite el movimiento de flexión y extensión de la misma. Este modelo cinemático muestra los cinco grados de libertad que se permiten con el exoesqueleto, cabe resaltar que solo cuatro de esos cinco son actuados mediante motores.

En primer lugar, se definen las siguientes distancias:

l_1 : Longitud del actuador de aducción-abducción al mecanismo de rotación lateral- medial. [mm]

d_1 : Altura del mecanismo que permite la rotación lateral y medial. [mm]

l_2 : Longitud del ancho de la persona. [mm]

l_3 : Longitud del brazo. [mm]

l_4 : Longitud del antebrazo. [mm]

l_5 : Longitud del actuador de la muñeca a la muñeca. [mm]

Las longitudes l_1 y l_2 se considerarán iguales, esto se debe a que se busca que los esfuerzos sean equivalentes en estos segmentos y, además, se busca disminuir la complejidad de los cálculos mecánicos, siendo los rangos de 105 a 152mm, del cual el valor elegido es un promedio de ambos y adecuando a una medida más comercial y real, en este caso 130mm. Mientras que d_1 , se consideró de 20mm para disminuir las fuerzas internas y, por ende, los esfuerzos en dicho grado de libertad.

La longitud l_3 toma un valor entre 180 a 380mm, la longitud l_4 se encuentra en el rango de 132 a 300mm. Por último, l_5 se estableció como el valor promedio del valor normalizado (85mm) que figura en la Tabla 2.2.

A continuación, se presenta en la Tabla 3.1 los parámetros correspondientes al desarrollo del método Denavit-Hartenberg. Asimismo, en la Figura 3.1 se muestran las

articulaciones con sus respectivos ejes de movimiento, siendo q_i el ángulo que la articulación 'i' puede rotar, mientras que en la Tabla 3.2 se presenta el rango de movilidad de cada articulación.

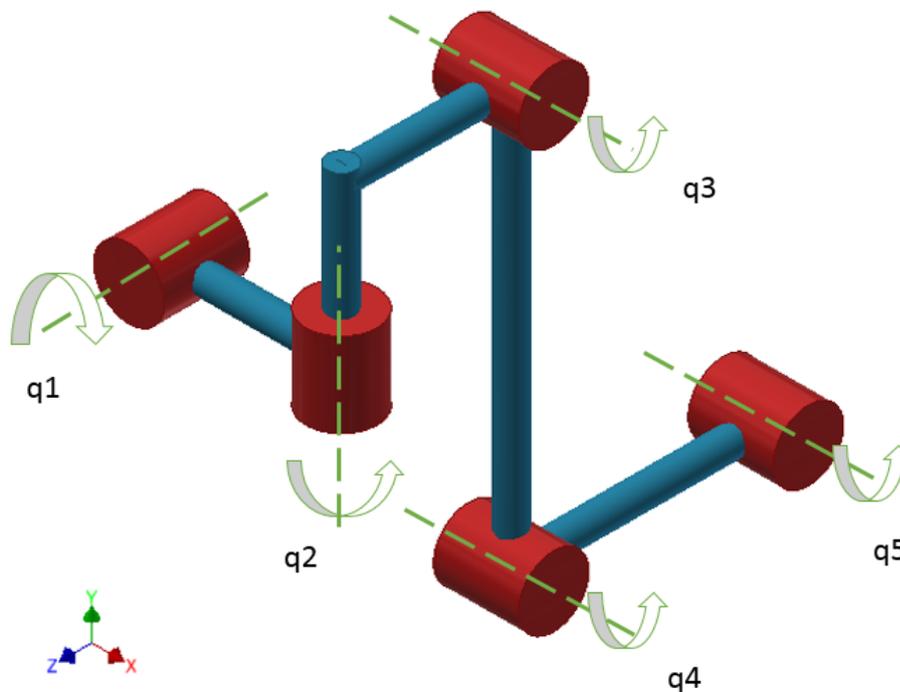


Figura 3.1: Articulaciones del exoesqueleto

Tabla 3.1: Parámetros D-H

Articulación	Movimiento	Numero de articulación	Θ_i	d_i	a_i	α_i
Hombro	Abducción y aducción	1	q_1	0	l_1	-90°
	Rotación lateral y medial	2	$q_2 + 90^\circ$	d_1	l_2	$+90^\circ$
	Flexión y extensión	3	$q_3 - 90^\circ$	0	l_3	0
Codo	Flexión y extensión	4	$q_4 + 90^\circ$	0	l_4	0
Muñeca	Flexión y extensión	5	q_5	l_5	0	0

Tabla 3.2: Rangos de movilidad de cada articulación

Articulación	Movimiento	Rango
Hombro	Abducción y aducción	$-60^\circ \leq q_1 \leq 90^\circ$
	Rotación lateral y medial	$-10^\circ \leq q_2 \leq 50^\circ$
	Flexión y extensión	$-90^\circ \leq q_3 \leq 90^\circ$
Codo	Flexión y extensión	$-90^\circ \leq q_4 \leq 30^\circ$
Muñeca	Flexión y extensión	$-60^\circ \leq q_5 \leq 60^\circ$

De acuerdo al método de Denavit-Hartenberg, los parámetros DH se resuelven en la Ecuación 3.1. Dicha ecuación proviene de realizar una rotación en el eje 'z', para luego realizar una traslación en ese mismo eje, posteriormente se realiza una traslación en el eje 'x' y finalmente se realiza una rotación sobre ese mismo eje, dando como resultado la ecuación siguiente:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & a_i * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & a_i * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones de transformación del desacoplo cinemático (Ecuaciones 3.2 a 3.6) las cuales se obtienen reemplazando los parámetros DH de la Tabla 3.1 en la Ecuación 3.1, para lo cual se consideró como la base de la cadena cinemática al actuador que permite el movimiento de aducción-abducción del hombro, y como extremo operativo al mecanismo acoplado al actuador de flexión-extensión de la muñeca.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q1) & 0 & -\sin(q1) & l1 * \cos(q1) \\ \sin(q1) & 0 & \cos(q1) & l1 * \sin(q1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\sin(q2) & 0 & \cos(q2) & -l2 * \sin(q2) \\ \cos(q2) & 0 & \sin(q2) & l2 * \cos(q2) \\ 0 & 1 & 0 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \sin(q3) & \cos(q3) & 0 & l3 * \sin(q3) \\ -\cos(q3) & \sin(q3) & 0 & -l3 * \cos(q3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} -\sin(q4) & -\cos(q4) & 0 & -l4 * \sin(q4) \\ \cos(q4) & -\sin(q4) & 0 & l4 * \cos(q4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & 0 \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Debido al gran tamaño de las expresiones que resultan de la operación de las matrices de transformación, se consideró prudente el uso de la nomenclatura mostrada en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Nomenclatura

Función trigonométrica	Nomenclatura
$\sin(i)$	s_i
$\cos(i)$	c_i
$\sin(i + j)$	s_{ij}
$\cos(i + j)$	c_{ij}

Las Ecuación 3.7 y 3.8, permiten relacionar todas las matrices obtenidas del desacoplo cinemático (ecuación 3.2 a 3.6), para poder conocer tanto la posición (P_{3x1}) como la orientación (R_{3x3}) del extremo operativo del robot con respecto a su base

$$T = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 * {}^4A_5 = {}^0A_5 \quad (3.7)$$

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Donde:

$$T_{11} = -s_1s_{345} - c_1s_2c_{345}$$

$$T_{12} = c_1s_{345} - s_1s_2c_{345}$$

$$T_{13} = -c_2c_{345}$$

$$T_{14} = l_1c_1 - l_2c_1s_2 + l_3[s_1c_3 - c_1s_2s_3] - l_4[s_1s_{34} + c_1s_2c_{34}] + l_5c_1c_2 - d_1s_1$$

$$T_{21} = -s_1c_{345} + c_1s_2s_{345}$$

$$T_{22} = c_1c_{345} + s_1s_2s_{345}$$

$$T_{23} = c_2s_{345}$$

$$\begin{aligned}
T_{24} &= l_1 s_1 - l_2 s_1 s_2 - l_3 [c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3] + l_4 [c_1 s_{34} - s_1 s_2 c_{34}] + l_5 s_1 c_2 + d_1 c_1 \\
T_{31} &= c_1 c_2 \\
T_{32} &= s_1 c_2 \\
T_{33} &= -s_2 \\
T_{34} &= -l_2 c_2 - l_3 c_2 s_3 - l_4 c_2 c_{34} - l_5 s_2
\end{aligned}$$

La Ecuación 3.8 (matriz T) representa las ecuaciones cinemáticas que relacionan la base del exoesqueleto (actuador de abducción-aducción del hombro) con el extremo operativo (actuador de la muñeca), en función de todas las variables articulares (q_1 , q_2 , q_3 , q_4 y q_5).

3.1.2 Cinemática diferencial

Mediante este análisis se plantea obtener la relación existente entre las velocidades lineales y angulares, en función de las velocidades articulares. Mediante la matriz Jacobiana es posible encontrar las posiciones o configuraciones a las cuales nuestra configuración cinemática no puede alcanzar, las cuales se denominan singularidades.

El análisis que se plantea a continuación consiste en obtener las velocidades del extremo operativo del robot (lineales y angulares), partiendo de las velocidades articulares. Para lo cual la Ecuación 3.9 y 3.10, muestra la relación existente entre ellas.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J(q) * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_P(q) \\ J_o(q) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Donde la función del Jacobiano (Ecuación 3.10) contiene dos submatrices de tamaño $(3 \times q)$, las cuales representan la componente de velocidades lineales $J_p(q)$, y de velocidades angulares $J_o(q)$. Entonces la Ecuación 3.11 permite encontrar las velocidades lineales.

$$J_p(q) = \begin{bmatrix} \frac{dFx}{dq_1} & \frac{dFx}{dq_2} & \frac{dFx}{dq_3} & \frac{dFx}{dq_4} & \frac{dFx}{dq_5} \\ \frac{dFy}{dq_1} & \frac{dFy}{dq_2} & \frac{dFy}{dq_3} & \frac{dFy}{dq_4} & \frac{dFy}{dq_5} \\ \frac{dFz}{dq_1} & \frac{dFz}{dq_2} & \frac{dFz}{dq_3} & \frac{dFz}{dq_4} & \frac{dFz}{dq_5} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Donde las ecuaciones F_x , F_y y F_z se obtienen de la Ecuación 3.8 (matriz T), dichos valores son el efector final, es decir, el que relaciona la posición del extremo operativo en función de las variables articulares de la cadena cinemática.

$$\begin{aligned} F_x &= l_1 c_1 - l_2 c_1 s_2 + l_3 [s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3] - l_4 [s_1 s_{34} + c_1 s_2 c_{34}] + l_5 c_1 c_2 - d_1 s_1 \\ F_y &= l_1 s_1 - l_2 s_1 s_2 - l_3 [c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3] + l_4 [c_1 s_{34} - s_1 s_2 c_{34}] + l_5 s_1 c_2 + d_1 c_1 \\ F_z &= -l_2 c_2 - l_3 c_2 s_3 - l_4 c_2 c_{34} - l_5 s_2 \end{aligned}$$

En el caso del cálculo de la componente de velocidades angulares se toma la submatriz de rotación, proveniente de la matriz T. La Ecuación 3.12 es la que permite realizar el cálculo de las velocidades angulares. Esta ecuación relaciona la derivada implícita de la matriz R (Ecuación 3.14) con respecto a cada variable articular, con la transpuesta de la matriz R.

$$\dot{R} * R^T = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Donde \dot{R} corresponde a la suma de derivar implícitamente la matriz R con respecto a cada variable articular (Ecuación 3.13).

$$\dot{R} = \sum_{i=1}^n \frac{dR}{dq_i} \quad (3.13)$$

De la Ecuación 3.11, 3.12 y 3.13, se puede calcular la matriz Jacobiana, la cual se muestra a continuación (Ecuación 3.14).

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & 0 \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & 0 \\ 0 & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} \\ 0 & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} \\ J_{61} & 0 & J_{63} & J_{64} & J_{65} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Donde,

$$J_{11} = -l_1 s_1 + l_2 s_1 s_2 + l_3 [c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3] - l_4 [c_1 s_{34} - s_1 s_2 c_{34}] - l_5 s_1 c_2 - d_1 c_1$$

$$J_{12} = -l_2 c_1 c_2 - l_3 c_1 c_2 s_3 - l_4 c_1 c_2 c_{34} + l_5 s_1 c_2$$

$$J_{13} = -l_3 [s_1 s_3 + c_1 s_2 c_3] + l_4 [-s_1 c_{34} + c_1 s_2 c_{34}]$$

$$J_{14} = l_4 [-s_1 c_{34} + c_1 s_2 c_{34}]$$

$$J_{21} = l_1 c_1 - l_2 c_1 s_2 + l_3 [s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3] - l_4 [s_1 s_{34} + c_1 s_2 c_{34}] + l_5 c_1 c_2 - d_1 s_1$$

$$J_{22} = -l_2 s_1 c_2 - l_3 s_1 c_2 s_3 - l_4 s_1 c_2 c_{34} - l_5 s_1 s_2$$

$$J_{23} = l_3 [c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3] + l_4 [c_1 c_{34} + s_1 s_2 c_{34}]$$

$$J_{24} = l_4 [c_1 c_{34} + s_1 s_2 c_{34}]$$

$$J_{32} = l_2 s_2 + l_3 s_2 s_3 + l_4 s_2 c_{34} - l_5 c_2$$

$$J_{33} = -l_3 c_2 c_3 + l_4 c_2 c_{34}$$

$$J_{34} = l_4 c_2 c_{34}$$

$$J_{42} = -s_1$$

$$J_{43} = c_1 c_2$$

$$J_{44} = c_1 c_2$$

$$J_{45} = c_1 c_2$$

$$J_{52} = c_1$$

$$J_{53} = s_1 c_2$$

$$J_{54} = s_1 c_2$$

$$J_{55} = s_1 c_2$$

$$J_{61} = 1$$

$$J_{63} = -s_2$$

$$J_{64} = -s_2$$

$$J_{65} = -s_2$$

Con la matriz Jacobiana ya presentada (Ecuación 3.14), se pueden realizar el análisis de las singularidades, las cuales se dividen en dos, singularidades internas y de contorno.

Las singularidades de contorno, son aquellas en las que el exoesqueleto adopta una posición en la cual está completamente extendida, o en su defecto retraída. Este tipo de singularidades no representan una situación en extremo no deseada, ya que pueden ser evitadas no trasladando el extremo del exoesqueleto a dichas posiciones.

Por el contrario, las singularidades internas si representan un problema serio, ya que estas ocurren dentro del volumen de movilidad del exoesqueleto, y se generan por alguna determinada posición del efector final o por la alineación de dos o más ejes de movimiento.

La Ecuación 3.15 permite calcular dichas configuraciones que conllevan a las singularidades. Esta se basa en que en determinadas posiciones articulares (posición y velocidades instantáneas), el cálculo de la determinante de la matriz Jacobiana cuando es cero, conlleva a que en esa posición exista una singularidad o en su defecto que el exoesqueleto pierda grados de libertad.

$$\det(J(q)) = 0 \tag{3.15}$$

Para efectos de este trabajo se presentan las ecuaciones necesarias para el cálculo de dichas singularidades ya que no se realizó un análisis numérico dada su complejidad.

3.1.3 Espacio de trabajo

El efector final de la Ecuación 3.8 ofrece información sobre la posición que el extremo operativo del exoesqueleto podrá alcanzar (con los ángulos propuestos en la Tabla 3.2). En la Figura 3.2 se muestran las áreas en los planos XY, XZ y YZ que el exoesqueleto podrá recorrer. Cada imagen corresponde al área de movilidad del extremo operativo en cada plano.

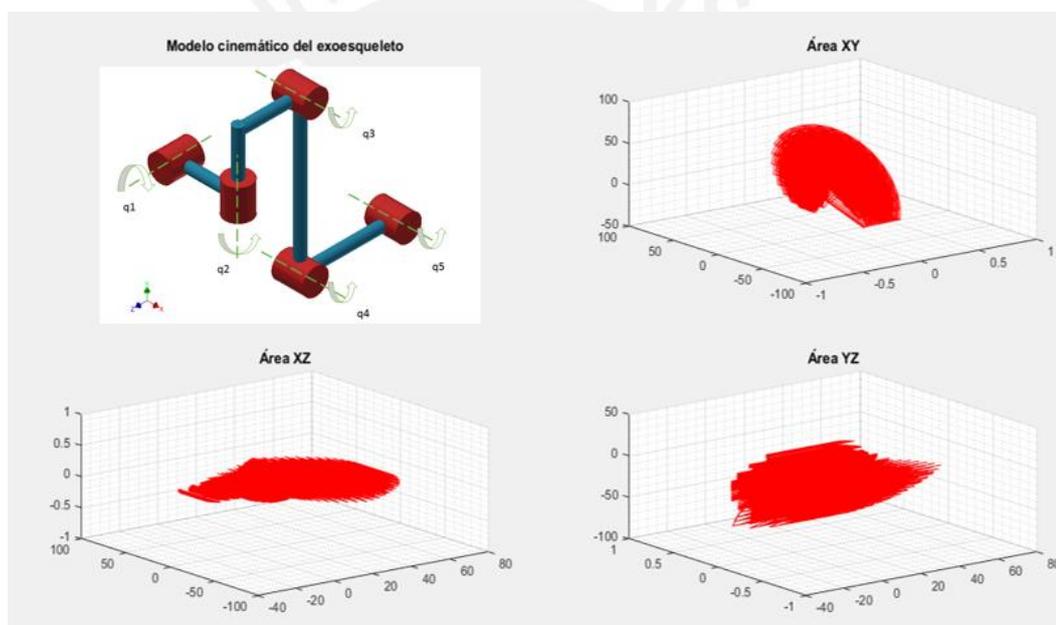


Figura 3.2: Área de movilidad del efector final del exoesqueleto en cada plano

3.2 Estimación de torques en el cuerpo humano

En la presente sección se calcularán el torque que se genera en las articulaciones de la persona, sin portar el exoesqueleto, soportando una carga de 15kg en cada miembro superior, esto con el objetivo de seleccionar los motores y mecanismos que entreguen el torque para compensar el peso, y con esto evitar que las articulaciones del usuario perciban el momento que se generará.

Tomando como parámetros de diseño las dimensiones y condiciones que más esfuerzo generan al exoesqueleto, es que se toman las longitudes más grandes de la persona, los pesos más altos de los miembros de la persona (Capítulo 2) y las cargas ubicadas de tal forma que representan el máximo esfuerzo en cada articulación de la persona.

3.2.1 Flexión-extensión de la muñeca

El torque generado en la articulación de la muñeca en el movimiento de flexión-extensión, se calculó considerando la longitud de la mano es 23.0cm, su masa de 5.98N (P_1) que se encuentra ubicada a 6.0cm de la articulación de la muñeca, y la carga de 147.15N (P_2) ubicada en el mismo punto, las cuales se ilustran en la Figura 3.3. El par generado en la articulación de la muñeca realizando el movimiento de flexión-extensión es de 9.2Nm (Ecuación 3.16).

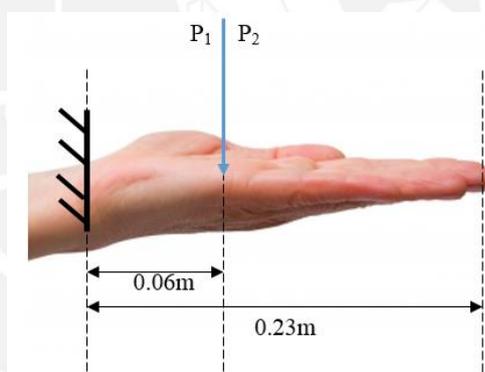


Figura 3.3: DCL de la muñeca

$$\sum M = 0; \quad M_{MFE} = 0.06 * P_1 + 0.06 * P_2 \quad (3.16)$$

3.2.2 Flexión-extensión del codo

Las consideraciones para el cálculo del torque que se genera en la articulación del codo, se consideró como un empotramiento a dicha articulación. Además, el peso de la mano es 5.98N (P_2) y está ubicado a 6cm de la articulación de la muñeca, el antebrazo tiene un peso de 16.87N (P_1) y se concentra a 12cm de la articulación del

codo y la carga a levantar, la cual es de 15kg. Se ubicó en el centroide la mano. Las longitudes de la mano y el antebrazo son de 23.0cm y 30.0cm, respectivamente. En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la configuración descrita. El torque resultante necesario para soportar la carga es de 57.15Nm, especificado en la Ecuación 3.17.

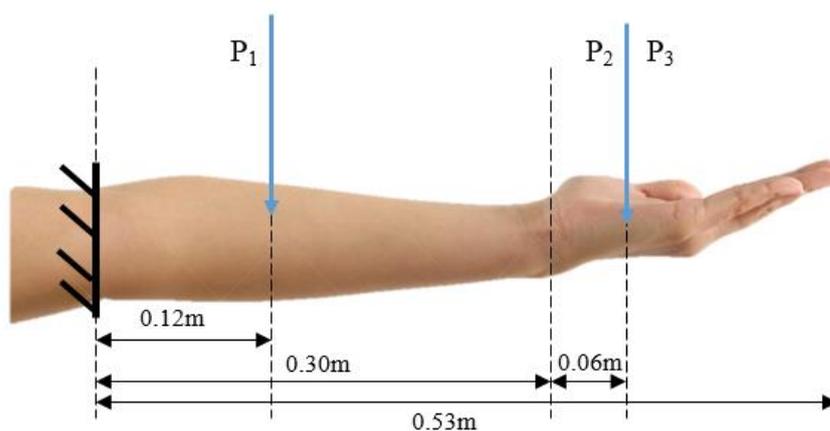


Figura 3.4: DCL del sistema codo-muñeca

$$\sum M = 0: M_{CODO} = P_1 * 0.12 + P_2 * 0.36 + P_3 * 0.36 \quad (3.17)$$

3.2.3 Flexión-extensión del hombro

El torque generado en la articulación del hombro para el movimiento de flexión-extensión, considerando que el máximo esfuerzo se da cuando el brazo está inclinado 60° con respecto al plano sagital, se realiza con los parámetros descritos a continuación. Primeramente, el peso del brazo es de 24.51N (P_4) y su ubicación es de 15.7cm (longitud medida desde la articulación del hombro hacia la articulación del codo con longitud del brazo de 38 cm). El resto de parámetros (antebrazo y muñeca) se tomaron de la sección 3.2.1. El diagrama de cuerpo libre se muestra en la Figura 3.5. El par necesario para mover la carga propuesta en el movimiento flexión-extensión del hombro se obtienen con la Ecuación 3.18, el cual resulta 116.69Nm.

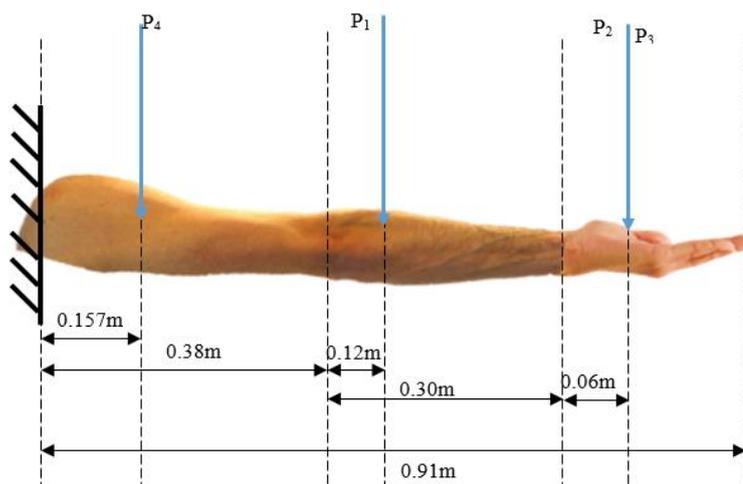


Figura 3.5: DCL del sistema hombro en flexión-extension

$$\sum M = 0: M_{HFE} = P_4 * 0.14 + P_1 * 0.45 + P_2 * 0.69 + P_3 * 0.69 \quad (3.18)$$

3.2.4 Abducción-Aducción del hombro

La posición considerada para el cálculo de este par se muestra en el DCL de la Figura 3.6, y de ese punto hasta la articulación del hombro es una longitud de 12cm. Todas las fuerzas y longitudes de las secciones 3.2.1 y 3.2.2 se mantienen. El par necesario en el movimiento de abducción-aducción, usando la Ecuación 3.19, resulta 64.39Nm.

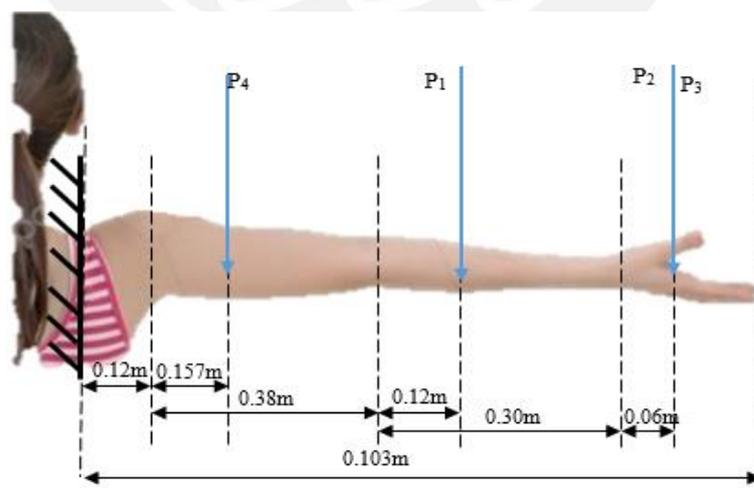


Figura 3.6: DCL del sistema hombro en Aducción-abducción

$$\sum M = 0: M_{HABAD} = P_4 * 0.18 + P_1 * 0.24 + P_2 * 0.28 + P_3 * 0.28 \quad (3.19)$$

3.3 Diseño del sistema mecánico del exoesqueleto

En la presente sección se realizará el diseño de los diferentes elementos mecánicos que corresponden al exoesqueleto, el cálculo de las fuerzas y momentos que interactúan entre el exoesqueleto y la persona, la selección de motores y cajas reductoras, cálculo de la resistencia como la deformación que presentará el exoesqueleto, y finalmente se mostrará el modelado del exoesqueleto.

Es preciso resaltar que, dentro de los alcances de este proyecto, no se contempla el diseño de la estructura espalda torso ni piernas, que es a donde las fuerzas que se presentan dentro de esta sección deben dirigirse.

3.3.1 Selección de motores y cajas reductoras

En la sección 3.2 se obtuvo los momentos que se generan en la persona al levantar 15kg por cada brazo (máxima carga 30kg). Debido a que los torques que se generan son altos (siendo el mayor de ellos de 116.69Nm), los motores deben estar acompañados de una caja reductora.

El requisito principal que debe contar el motor, es que tenga un torque elevado para así mediante las cajas reductoras, obtener el torque necesario para ejecutar el movimiento. Es por esto que el motor para las cuatro articulaciones son motores EC de tipo Flat (Figura 3.7) de la empresa Maxon, los cuales ofrecen una velocidad de 2080rpm y hasta 1.61Nm (Figura 3.8). Estos motores ofrecen un diseño compacto, tamaño reducido en comparación a otros de las mismas características y un torque de hasta 1.61Nm, el cual es el de mayor valor en esta gama de motores.



Figura 3.7: Motor EC tipo Flat³

Motor Data		
Values at nominal voltage		
1 Nominal voltage	V	18
2 No load speed	rpm	2080
3 No load current	mA	821
4 Nominal speed	rpm	1620
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	1610
6 Nominal current (max. continuous current)	A	18
7 Stall torque ¹	mNm	14900
8 Stall current	A	183
9 Max. efficiency	%	87.2
Characteristics		
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.0983
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.133
12 Torque constant	mNm/A	81.6
13 Speed constant	rpm/V	117
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	0.141
15 Mechanical time constant	ms	7.47
16 Rotor inertia	gcm ²	5100

Figura 3.8: Características principales Motor EC tipo Flat⁴

Con los motores seleccionados, se procede a la selección de las cajas reductoras que permitan alcanzar el torque que se deberá compensar en las articulaciones. Dichas cajas reductoras los cuales poseen un arreglo de engranajes patentada por la empresa Harmonic Drive, la particularidad de estas cajas reductoras es que nos permiten alcanzar un torque elevado, gracias a la alta reducción que poseen (reducción de hasta 1:160).

En cada una de las cuatro articulaciones, los motores tendrán acoplados una caja reductora, estas diferirán en el tamaño y en la relación de transmisión para así llegar

³ Fuente: www.maxonmotor.es. Consulta: 25 de abril de 2020

⁴ Fuente: www.maxonmotor.es. Consulta: 25 de abril de 2020

al torque calculado en la sección 3.2, el cual es el torque máximo que se deberá compensar al levantar el objeto.

La ecuación 3.20 nos relaciona el torque a la entrada de la caja reductora (T_1), la cual corresponde al torque que nos entrega el motor, con el torque a la salida (T_2) y la eficiencia de la caja reductora (n , siendo este valor de 87.2% de acuerdo al catálogo del fabricante). La relación de transmisión en los cuatro actuadores se muestra en la tabla 3.4, de los cuales durante la selección se tomó el valor inmediato superior.

$$r = \frac{T_2}{T_1 * n} \quad (3.20)$$

Tabla 3.4: Relación de transmisión en cada articulación

Articulación	Actuador	Relación de transmisión
Hombro	Abducción-aducción	45.86
Hombro	Flexión-extensión	83.12
Codo	Flexión-extensión	40.71
Muñeca	Flexión-extensión	6.55

En la articulación de la muñeca, se seleccionó el reductor HFUC-14-30-2UH, el cual nos ofrece una relación de 30, nos proporciona un torque promedio a la salida de 6.8Nm y cuenta con un peso de 0.49kg. En el codo se seleccionó el reductor HFUC-17-100-2UH el cual cuenta con una relación de 100, y siendo capaz de proporcionar un torque promedio de 39Nm y tiene con un peso de 0.64kg. En el caso del actuador que permitirá el movimiento de flexión-extensión del hombro el modelo de la caja reductora es HFUC-25-100-2UH, el cual cuenta con un peso 1.5kg y entrega un par promedio de 108Nm. Por último, para el caso del movimiento de abducción-aducción del hombro, se seleccionó la caja reductora HFUC-17-100-2UH que cuenta con una relación de transmisión de 100 esto debido a que en esta articulación el torque a transmitir debe ser mayor, cuenta con un peso de 0.64kg y el par que puede entregar es de 39Nm. En la figura 3.9 se muestra la caja reductora de tipo Harmonic-Drive, siendo el mismo para los cuatro motores, con la única diferencia que tienen diferentes cantidades de dientes.



Figura 3.9: Harmonic Drive⁵

3.3.2 Selección de materiales

El exoesqueleto al ser un dispositivo que una persona podrá portar, deberá ser ligero y que su peso no represente fatiga o cansancio a la persona y debe ser un material de fácil acceso comercial, es por esto que el material elegido para los componentes estructurales del exoesqueleto es el Aluminio 6061. Este material es una aleación entre aluminio, magnesio y silicio, la cual presenta un módulo de Young de 71.70GPa, resistencia máxima a la tracción de 169Mpa y una densidad de 2700 kg/mm^3 . Así mismo, los componentes tanto de unión entre los motores, la caja reductora y el exoesqueleto, serán del material presentado previamente.

En el caso de las uniones atornilladas, como también de los elementos de transmisión de potencia usados, se seleccionarán de acuerdo a normas DIN, la cual indican las características mecánicas a usar.

3.3.3 Cálculo de elementos para transmitir potencia

De la sección 3.3.1 se obtuvo el torque que se debe transmitir al exoesqueleto mediante el conjunto motor y la caja reductora. Para realizar dicha transmisión se emplea el uso de elementos mecánicos, diseñados exclusivamente para tal fin. Los elementos

⁵ Fuente: www.maxonmotor.es. Consulta: 25 de octubre de 2018

mecánicos a seleccionar deberán ser de tamaño reducido y garantizar que se transmita la máxima potencia para el movimiento del exoesqueleto

El elemento de transmisión seleccionada es la chaveta (figura3.10), la cual nos permite unir dos elementos denominados eje y cubo para transmitir movimiento y, por lo tanto, potencia. Las chavetas que se seleccionaron son las chavetas paralelas, debido a que son las más comerciales.

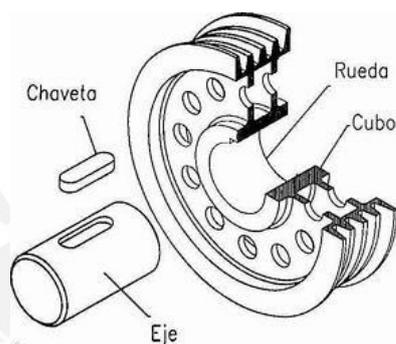


Figura 3.10: Chavetas paralela⁶

La norma DIN6885 nos permite el dimensionamiento de las chavetas a través de la Ecuación 3.21, mediante la cual se obtiene la longitud total de la chaveta, mientras que las dimensiones del perfil de la chaveta se obtienen de la norma DIN6885 (Figura 3.10).

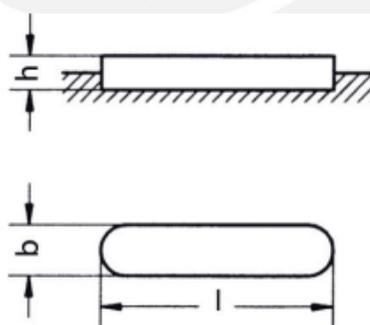


Figura 3.11: Chavetas paralela⁷

$$l = \frac{2 * M}{D * t * n * P_{ad}} \quad (3.21)$$

⁶ Fuente: <http://www.vc.ehu.es>. Consulta: 14 de noviembre de 2018

⁷ Fuente: www.opac.net. Consulta: 14 de noviembre de 2018

Los parámetros de la ecuación 3.21 son, ‘M’ el momento a transmitir, ‘D’ el diámetro del eje, ‘t’ la altura de contacto con el cubo (Valor que se obtiene de la norma DIN6885), ‘n’ la cantidad de chavetas y ‘ P_{ad} ’ la presión admisible, siendo este último $100N/mm^2$. El cálculo de la longitud de las chavetas para cada articulación se muestra en la Tabla 3.5, donde las columnas resaltadas en naranja fueron seleccionadas de acuerdo a norma.

Tabla 3.5: Dimensionamiento de chavetas

Articulación	Actuador	Diámetro (mm)	b (mm)	h (mm)	t (mm)	Cantidad de chavetas	Momento (Nm)	l (mm)
Hombro	Abducción-aducción	18	6	6	2.3	2	39	12
Hombro	Flexión-extensión	21	6	6	2.8	2	108	20
Codo	Flexión-extensión	18	6	6	2.8	2	39	12
Muñeca	Flexión-extensión	15	5	5	2.3	1	11	10

Así mismo, en la Figura 3.12 se muestra de manera esquemática el diseño de la unión entre el motor, la caja reductora y el eje de salida que permite el movimiento de flexión y extensión en el hombro. Los detalles de este conjunto se especifican en los planos del capítulo 4.

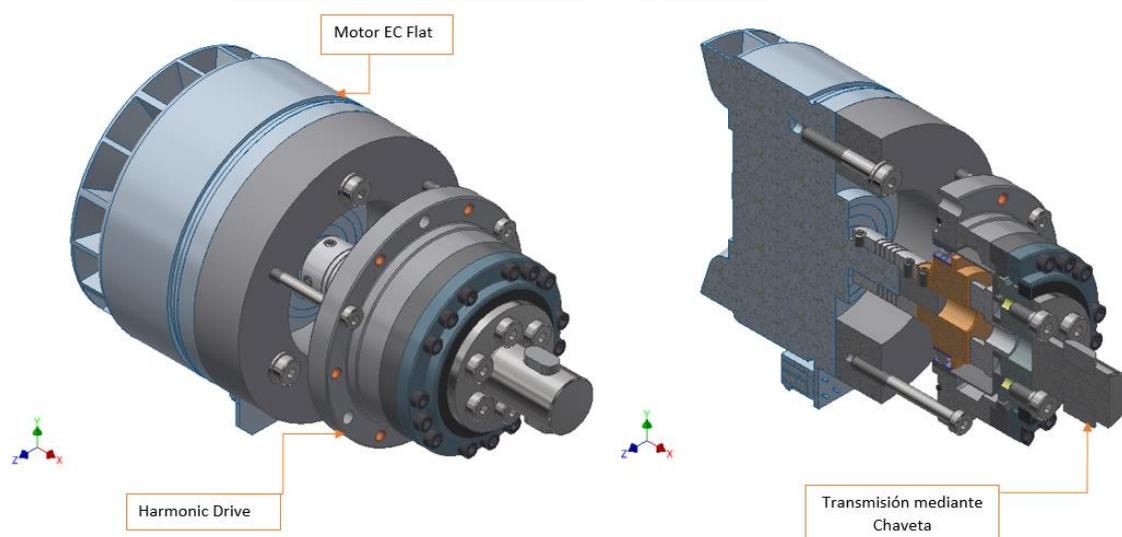


Figura 3.12: Conjunto motor caja reductora

3.3.4 Cálculo de fuerzas internas en la estructura del exoesqueleto

En este proyecto, el diseño del exoesqueleto está basado exclusivamente en el desarrollo de las extremidades superiores (ambos brazos). Debido a esto, en esta sección se realizarán los diagramas de cuerpo libre, elemento a elemento, con el fin de conocer la fuerza en el extremo de la articulación que permite el movimiento de abducción-aducción del hombro.

Es preciso señalar que las fuerzas obtenidas al final del análisis (las fuerzas en el extremo del hombro), sirven de punto de partida para un posterior diseño del sistema torso-espalda, el cual recibe las fuerzas provenientes de los miembros superiores, para luego transmitir las hacia tierra a través del sistema de piernas, de este modo es el exoesqueleto en sí mismo el que soporta y transmite gran parte de las fuerzas internas generadas al elevar el objeto. Por ende, el sistema de torso-espalda y piernas no está comprendido dentro de los alcances de este trabajo, pero si en la propuesta de un proyecto de mayor alcance y complejidad.

En la Figura 3.13 se muestra el diseño completo del exoesqueleto. Este cuenta con cuatro motores que permitirán el movimiento de flexión y extensión en las articulaciones del hombro, codo y muñeca, y el movimiento de abducción y aducción en el hombro. Cuenta además con un movimiento que no es actuado, este es el movimiento de rotación lateral y medial del hombro, este movimiento se realiza de manera natural por la persona. El elemento resaltado en verde corresponde a un diseño tentativo de la espalda, el cual es mostrado para indicar la unión del conjunto motor-reductor con el exoesqueleto.

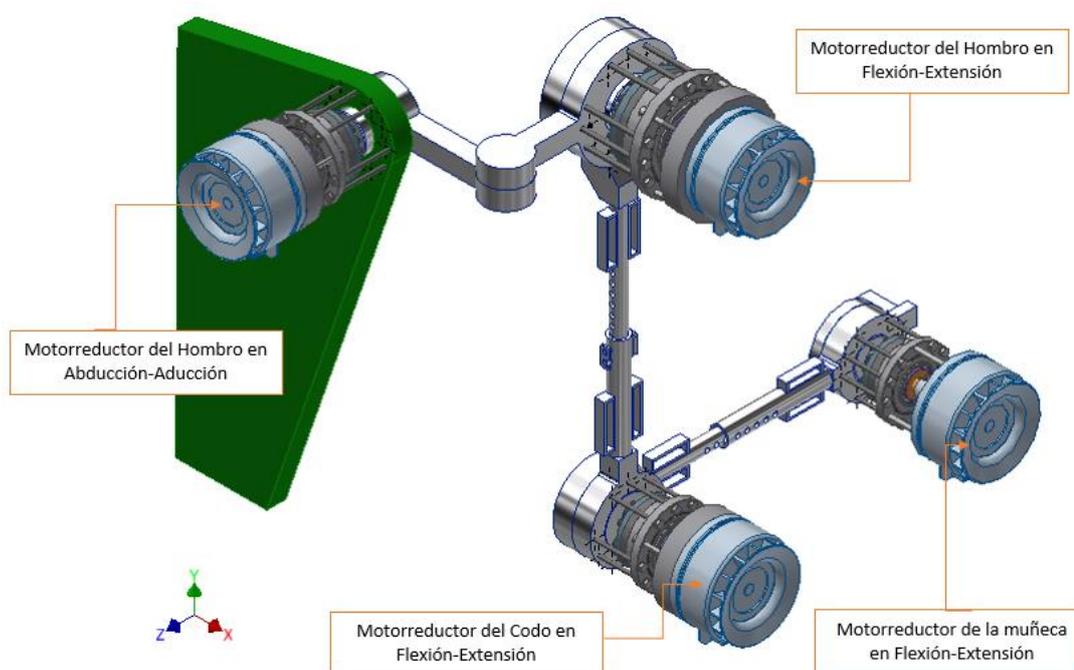


Figura 3.13: Esquema del diseño del exoesqueleto

En la Tabla 3.6 se muestra una lista con el peso de la estructura del exoesqueleto, el peso de los actuadores y cajas reductoras

Tabla 3.6: Pesos de los principales componentes del exoesqueleto

Componente	Masa (kg)	Peso (N)
Exoesqueleto	2.73	26.81
Conjunto Hombro ABAD	1.47	15.93
Conjunto Hombro FE	1.96	19.23
Conjunto Codo FE	1.62	15.89
Conjunto Muñeca FE	1.47	14.42
Total	9.25	90.74

El cálculo de fuerzas y momentos se realizó con las Ecuaciones 3.22 y 3.23, las cuales permiten conocer las fuerzas y momentos internos cuando no existen aceleraciones en el sistema.

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.22)$$

$$\sum \vec{M} = 0 \quad (3.23)$$

Asimismo, en la Figura 3.14 se muestra una representación del brazo de la persona y el exoesqueleto y como es se esquematizará en los diagramas de cuerpo libre.

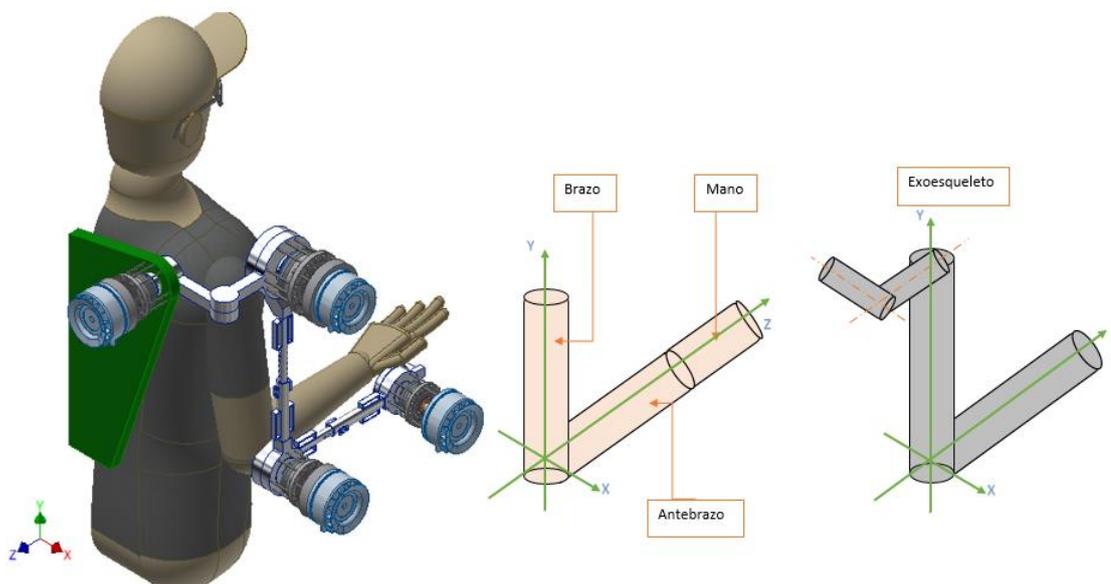


Figura 3.14: Diagrama esquemático entre el brazo de persona y el exoesqueleto

En la Figura 3.15 se muestra el diagrama de cuerpo libre desde la articulación de la muñeca hasta el extremo en donde se aplica la carga, además se consideró la reacción que ejerce el exoesqueleto con la mano de la persona. En el cálculo se consideró el peso máximo que soportará la persona 147.15N (W_{carga} , ubicado a 6cm de la articulación), el peso de la mano 5.98N (W_{mano} , ubicado en el mismo punto que W_{carga}), el peso del exoesqueleto en ese segmento (W_{E1} , ubicado 1cm de la articulación del exoesqueleto) y el peso del conjunto motor-reductor de la muñeca que viene a ser 14.42N (W_{M1}). Los valores a encontrar son la reacción del exoesqueleto con la persona (R_1), el momento que se generará en el exoesqueleto para compensar la carga (T_{M1}) y las reacciones R_M y R_{E1} de la muñeca y el exoesqueleto respectivamente. Por último, se consideró el torque T_{M1} como 6.8Nm , ya que es el máximo torque que el conjunto de motor y reductor en la articulación de la mano puede producir, esto con el fin de conocer cuánto es el torque que la articulación de la muñeca debe generar.

En la Tabla 3.7 se muestra a modo de resumen las fuerzas que interactúan en el sistema y que son conocidas, con su respectiva posición donde se aplican.

Tabla 3.7: Resumen de fuerzas del sistema de la muñeca

Fuerza	Valor (N)	Centroide (m)
W_{carga}	147.15	0.06
W_{mano}	5.98	0.06
W_{E1}	2.1	0.01
W_{M1}	14.42	0

A continuación, en la Figura 3.15 se muestra el diagrama de cuerpo libre entre el exoesqueleto y la persona, desde la articulación de la muñeca hacia la mano. El análisis de fuerzas se adapta a un sistema de fuerzas coplanares, esto debido a que se analiza el esfuerzo cuando el objeto ya ha sido levantado del suelo y la posición del exoesqueleto y el brazo se encuentran en una posición en concreto. Se toman en cuenta el torque que los actuadores logran ejercer para mantener el equilibrio, y obteniendo el torque que la persona debe ejercer, por ende se logra obtener qué porcentaje del peso del objeto, siente realmente la persona.

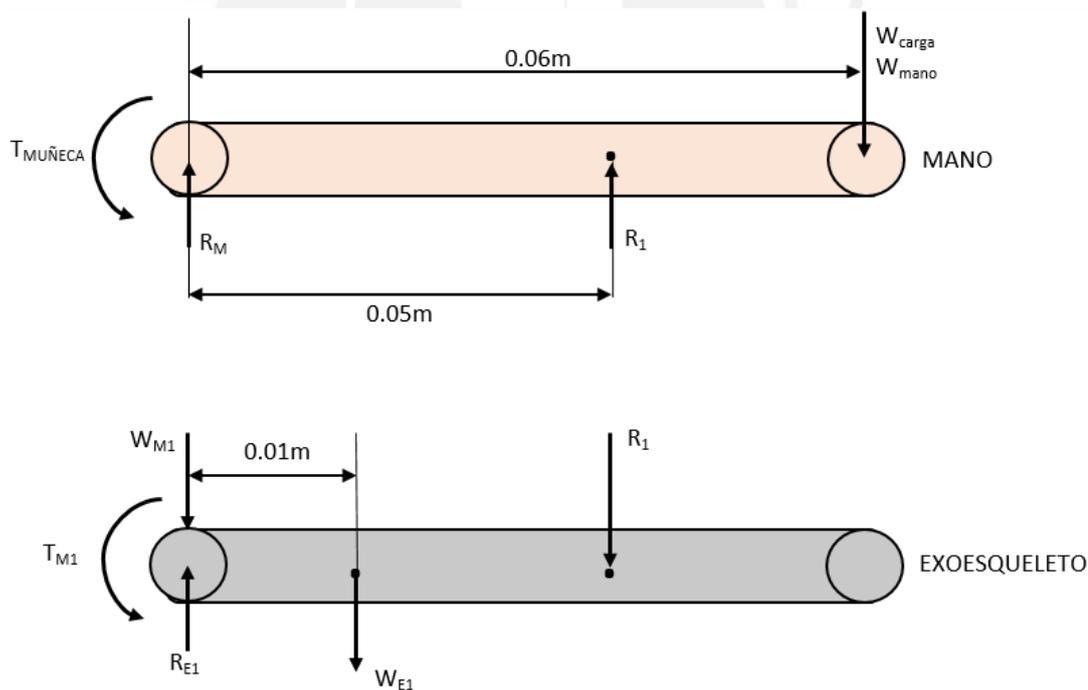


Figura 3.15: Diagrama de cuerpo libre de la muñeca con el exoesqueleto

Con las Ecuaciones 3.22 y 3.23 se obtienen cuatro ecuaciones de equilibrio estático, luego de resolver dicho sistema se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resultados del diagrama de cuerpo libre de la muñeca

Fuerza	Valor
R_M	17.55N
R_1	135.58N
R_{E1}	152.1N
$T_{MUÑECA}$	2.4Nm

El desarrollo del diagrama del cuerpo libre del antebrazo, tanto de la persona como del exoesqueleto, se muestra en la Figura 3.16. En dicho análisis se consideró el análisis previo del cálculo de las fuerzas en la articulación de la muñeca. Además, se consideró el peso del antebrazo $W_{AB} = 16.87N$ a 12cm del codo, las fuerzas de reacción de la sección de la mano de 17.55N y 2.4Nm a 30cm del codo, el peso del exoesqueleto para este segmento $W_{E2} = 4.2N$ ubicado a 1.3cm de la articulación del codo en el exoesqueleto; el peso del segundo segmento del exoesqueleto $W_{E3} = 2.2N$ a 2.5cm de la articulación de la muñeca; y el peso del conjunto del actuador del codo, $W_{M2} = 15.89N$. Los valores a obtener son la reacción del exoesqueleto con la persona R_2 ubicado a 7cm del codo, la reacción R_3 ubicado a 7cm de la muñeca, la reacción R_C del codo en la persona, la reacción R_{E2} que se ejerce en la articulación del codo en el exoesqueleto y T_{CODO} que viene a ser el torque que debe generar la persona en la articulación del codo. Asimismo, se consideró que el torque que el conjunto motor-reductor en el codo (T_{M2}) es de 39Nm, con el fin de poder calcular el torque que se genera en la articulación de la persona en base al máximo valor que el actuador puede otorgar. En la Tabla 3.9 se detalla de forma resumida las fuerzas conocidas en el sistema del codo.

Tabla 3.9: Resumen de fuerzas del sistema del codo

Fuerza	Valor (N)	Ubicación desde el codo(m)
R_M	245.17	0.3
R_{E1}	152.1	0.3
W_{AB}	16.87	0.12
W_{E1}	4.2	0.013
W_{E2}	2.2	0.0275
W_{M2}	15.98	0

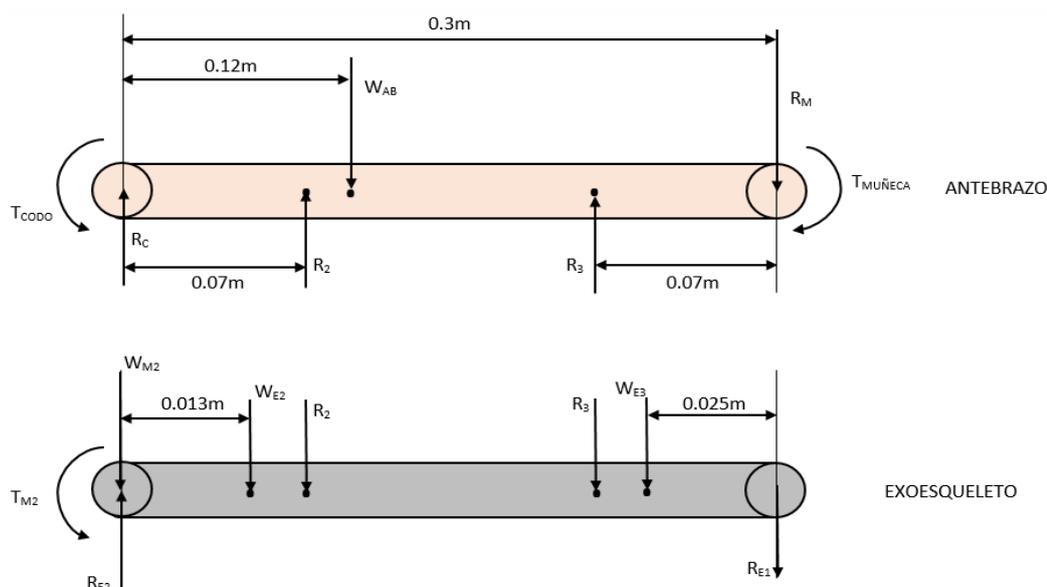


Figura 3.16: Diagrama de cuerpo libre del antebrazo con el exoesqueleto

Usando las ecuaciones de equilibrio estático, Ecuaciones 3.22 y 3.23, y resolviendo este el sistema de ecuaciones, los resultados se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo

Fuerza	Valor
R_C	92.91N
R_2	19.73N
R_3	39.46N
R_{E2}	99.31N
T_{CODO}	16.Nm

El desarrollo del diagrama de cuerpo libre del brazo acompañado de la estructura del exoesqueleto, se muestran en la Figura 3.17. Los valores R_C , R_{E2} , T_{M2} y T_{CODO} se usaron del cálculo del antebrazo. Para el cálculo de las fuerzas A_Y , A_Z , B_Y , B_Z , R_4 y R_5 , se consideró el torque de 108Nm (T_{M3}), que es el torque máximo que puede dar el actuador en el hombro. Además, se consideró el peso del antebrazo 24.51N (W_B), el peso del exoesqueleto en ese segmento 9.7N (W_{E4}), el peso del actuador en el hombro 19.23N (W_{M3}) ubicados como se muestra en la Figura 3.17. En este caso el torque que el actuador del hombro otorga es suficiente para elevar la carga, con lo cual el usuario no ejercería un par para equilibrar la carga. Estas fuerzas se muestran resumidas en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Resumen de fuerzas del sistema del hombro

Fuerza	Valor (N)
W_B	24.51
W_{E3}	9.7
W_{M3}	19.23

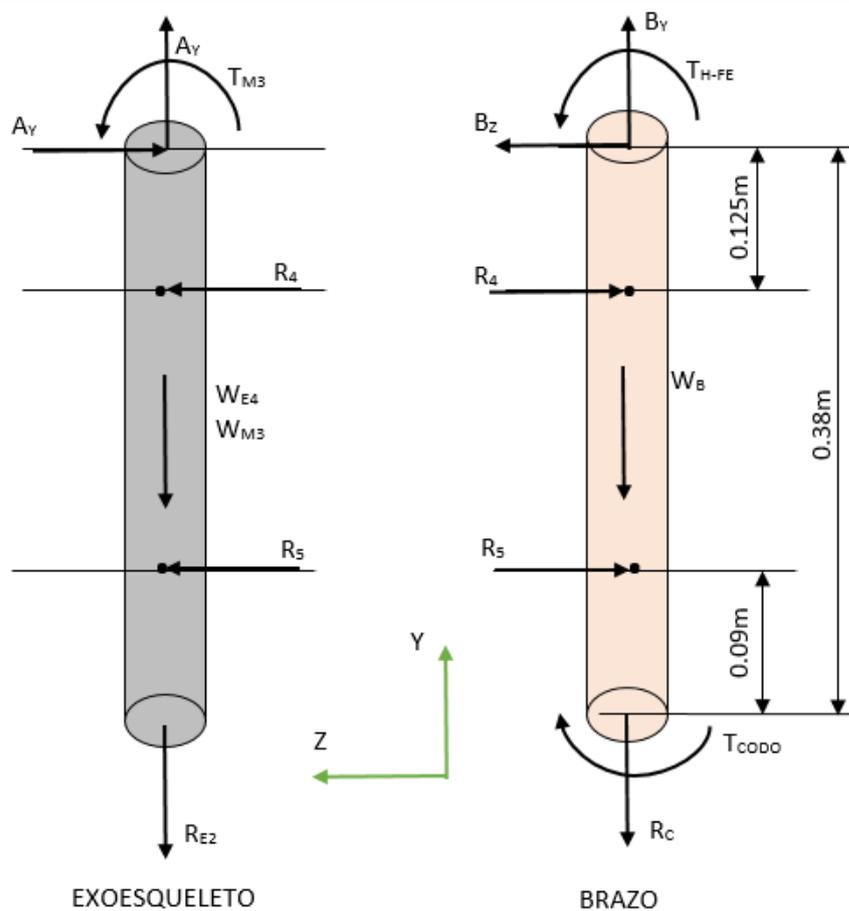


Figura 3.17: Diagrama de cuerpo libre del brazo con el exoesqueleto

Mediante las Ecuaciones 3.22 y 3.23 se resuelve el sistema de ecuaciones, y el resultado es mostrado en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo

Fuerza	Valor
A_y	128.24N
A_z	449.43N
B_y	117.42N
B_z	449.43N
R_4	314.06N
R_5	135.37N

Con las reacciones obtenidas del cálculo previo, se calculan las reacciones en la articulación del hombro para el movimiento de abducción-aducción. En la Figura 3.18 se muestra el diagrama de cuerpo libre de dicho sistema. Donde AB y BC corresponden a los eslabones que unen el motorreductor del hombro en abducción-aducción y el motorreductor del hombro en flexión-extensión (Figura 3.14). En dicho diagrama se muestran las reacciones del análisis previo R_H los cuales se refieren a las fuerzas internas en la articulación del hombro (obtenidas en el análisis del brazo), siendo esta un vector de fuerzas. Los pesos de ambos segmentos W_1 y W_2 (3.56 y 5.17N respectivamente) y el peso del actuador del hombro W_{MA} , que posee un valor de 15.93N. Dichas fuerzas se encuentran ubicadas tal como se muestra en la Figura 3.17, mostradas de manera resumida en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Resumen de fuerzas del sistema del hombro

Fuerza	Valor (N)
W_1	3.56
W_2	5.17
W_{M4}	15.93

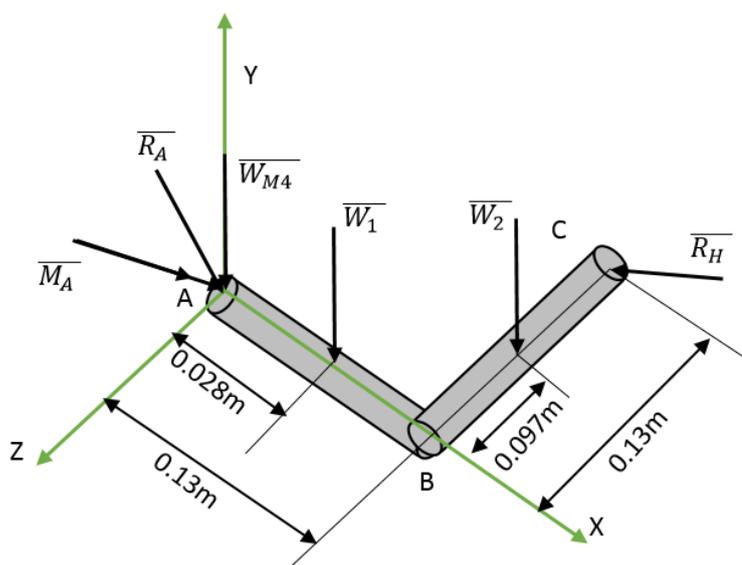


Figura 3.18: Diagrama de cuerpo libre del hombro del exoesqueleto

Mediante las Ecuaciones 3.22 y 3.23 se resuelve el sistema de ecuaciones con el fin de obtener las reacciones en el extremo A, y el resultado es mostrado en la tabla 3.14.

Tabla 3.14: Resultados del diagrama de cuerpo libre del antebrazo

Fuerza	Valor
A_X	0N
A_Y	151.29N
A_Z	-449.43N
M_{AX}	17.17Nm
M_{AY}	58.42Nm
M_{AZ}	17.44Nm

A partir de los resultados obtenidos se obtiene que las articulaciones de la muñeca, codo y hombro, deben generar un torque menor al que deberían generar cuando no se usa exoesqueleto, es decir, la sensación que percibiría el usuario al usar el exoesqueleto y elevar la carga, sería mucho menor que si la persona realiza la misma actividad sin el exoesqueleto.

3.3.5 Cálculo de resistencia y deformación

El análisis se efectuó mediante el análisis por elementos finitos (CAE) el cual tiene por finalidad identificar el esfuerzo máximo generado en el elemento, el factor de seguridad (FS) y la deformación máxima que ocasionará las fuerzas.

En este análisis se considera el material definido en la sección previa, así como la fuerza máxima de 150N, se consideró el peso de cada conjunto del motor y su caja reductora, adicionalmente se consideró el momento que estos generan. Por último, se acondicionó como extremo fijo al elemento que permite el movimiento de abducción-aducción del hombro. El mallado del ensamble se afino de acuerdo a las recomendaciones del fabricante del software Inventor.

El análisis consideró las fuerzas y momentos descritos en la Tabla 3.15. Las fuerzas F_1, F_2, F_3 y F_4 corresponden a la acción del peso de cada motorreductor en la articulación que corresponde. F_5 corresponde a la carga en el extremo operativo del sistema. Los torques M_1, M_2, M_3 y M_4 se refieren al momento que cada motorreductor produce para mantener la carga en estado estático.

Tabla 3.15: Fuerzas y Momentos en el análisis de resistencia.

Fuerza	Valor
G (Gravedad)	9.81N
F ₁	15.93N
F ₂	19.23N
F ₃	15.89N
F ₄	14.42N
F ₅	150.00N
M ₁	39.00Nm
M ₂	108.00Nm
M ₃	39.00Nm
M ₄	6.80Nm

El análisis muestra que el esfuerzo máximo generado es de 116.3MPa utilizando la tensión de Von Mises. El análisis del desplazamiento de cada eslabón se obtuvo simulando el desplazamiento de cada eslabón en el plano YZ con respecto a cada articulación (aproximando a una viga en voladizo).

En primer lugar, el desplazamiento del eslabón de la muñeca es de 2.702mm para una longitud de dicho eslabón de 67.5mm, lo que corresponde a una deformación unitaria de 4%. El siguiente eslabón corresponde al antebrazo, en el cual el desplazamiento resultó de 2.228mm para una longitud de dicho eslabón de 280mm, entonces la deformación unitaria es de 0.8%. Luego, en el eslabón del brazo se obtuvo un desplazamiento de 0.705mm para una longitud de 387mm, por lo que la deformación unitaria en este caso es de 0.2%.

En el caso del hombro se tienen dos eslabones, ambos con una longitud de 130mm. El eslabón que se encuentra unido al motorreductor del hombro en flexión-extensión se desplaza 0.456mm, mientras que el eslabón que se conecta con el motorreductor del hombro en abducción aducción se desplaza 0.131mm. Por lo tanto, las deformaciones unitarias son 0.35% y 0.11% respectivamente. Asimismo, el mínimo factor de seguridad del dispositivo, que resultó en este análisis, es de 2.36 (Figura 3.20).

Por consiguiente, con los resultados obtenidos, se puede mencionar que el exoesqueleto, bajo las condiciones propuestas, satisface las exigencias mecánicas de resistencia y rigidez.

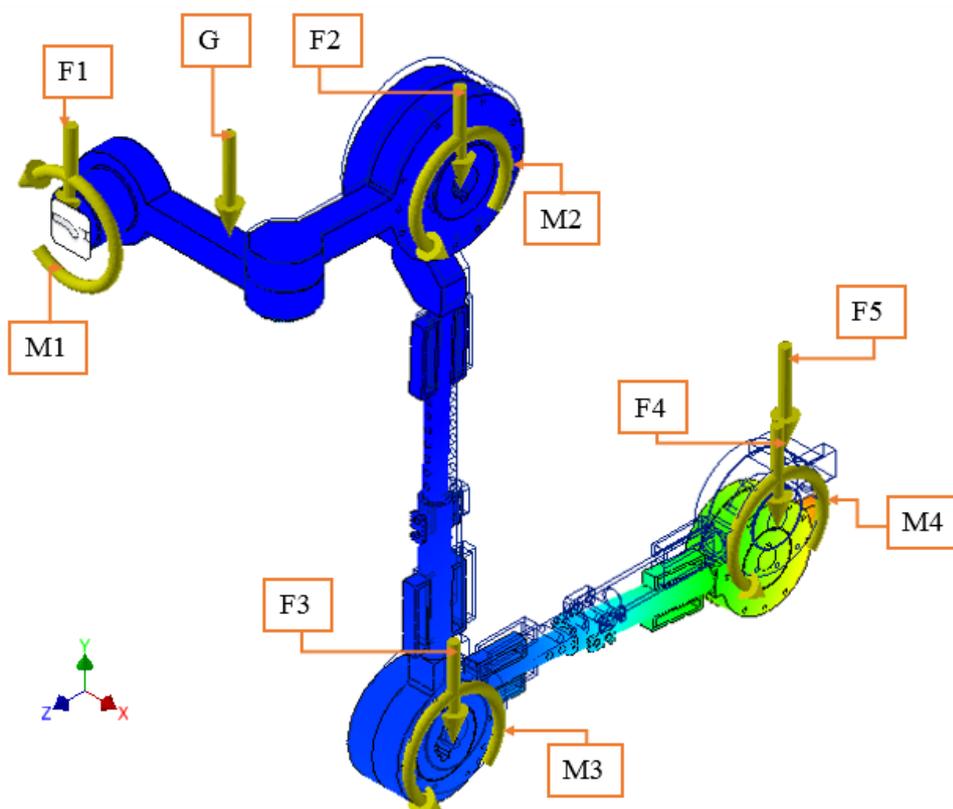


Figura 3.19: Desplazamiento de la estructura del exoesqueleto

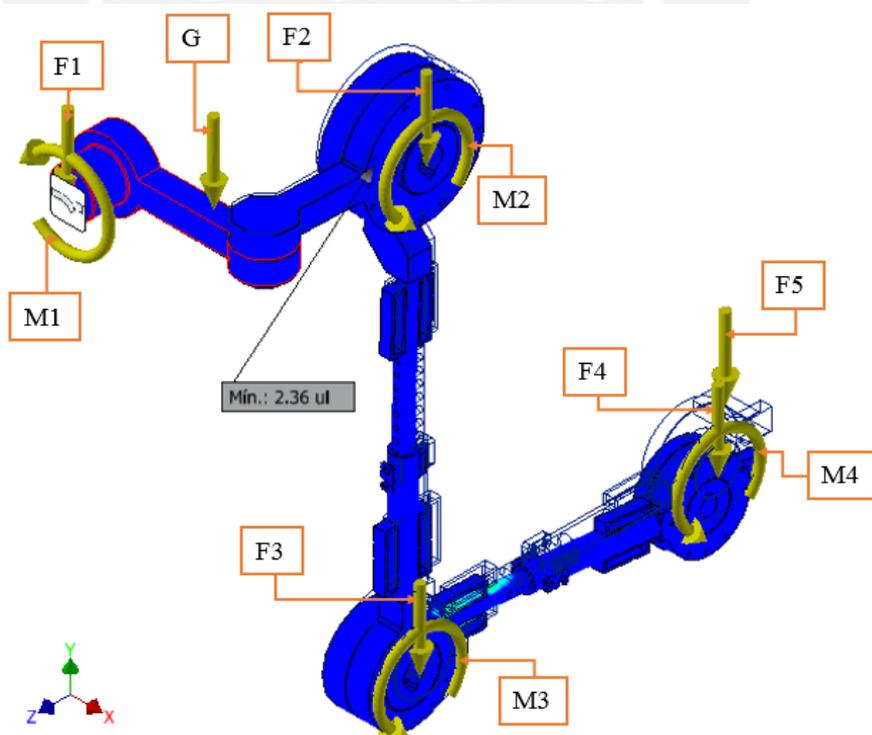


Figura 3.20: Factor de seguridad de la estructura del exoesqueleto

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

En el presente capítulo se presentan el cálculo, el análisis y las consideraciones de todos los elementos principales que conformarán la parte electrónica y de control del diseño conceptual, así como la selección de los componentes electrónicos y eléctricos.

Inicialmente, se realizará la propuesta del sistema de control para el exoesqueleto y diagramas de flujo (propuesta del control del sistema) para el funcionamiento del sistema. Luego se detallará el cálculo energético del exoesqueleto y se propondrá como alimentar todo el sistema. Finalmente, se realiza la selección de componentes electrónicos y eléctricos según catálogo, y los diagramas de conexiones

4.1 Propuesta de sistema de control para el exoesqueleto

El alcance dentro del sistema de control de este proyecto consiste en la identificación, organización y la unión de funciones, mediante diagramas de bloques y de flujo. Para lo cual en la Figura 4.1 muestra el diagrama de bloques que engloba todo el sistema.

El diagrama de bloques de la Figura 4.1 muestra al controlador principal o master, que gobierna sobre el controlador de los cuatro actuadores presentes en el dispositivo, los cuales reciben la instrucción de movimiento. El controlador principal recibe además

información sobre el peso que la persona está levantando mediante sensores de fuerza. Cada motor del exoesqueleto cuenta con un controlador el cual recibe la información sobre la posición angular a la que se encuentra, y envía la información del movimiento realizado hacia el controlador principal.

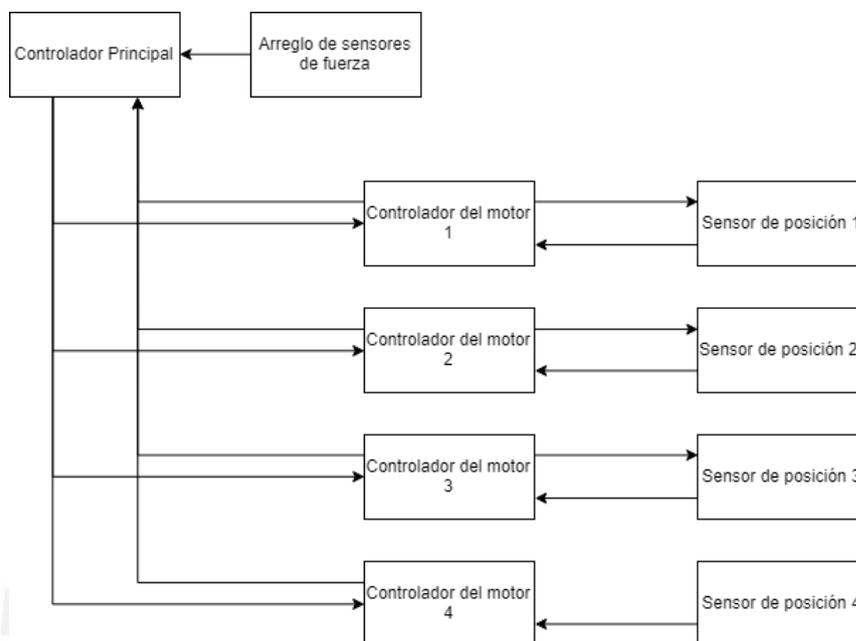


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema de control

En el caso del control de los motores, se propone el uso de un algoritmo de control basado en la compensación de torque, es decir, mediante la información que se obtendrá de los sensores de fuerza se calculará el torque que cada motor deberá proporcionar en la ejecución del movimiento, esto lo hará variando la velocidad a la cual rotará el motor. La compensación de torque resulta la más óptima en este entorno ya que se busca mover una carga, siendo necesario ejercer un momento que sea capaz de superar el momento generado por la carga, entonces es necesario el poder controlar directamente el torque que el motor es capaz de otorgar.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo para el control de los motores. Cada controlador recibe la información del controlador principal acerca de la carga que se está desplazando verticalmente, y en base a esa data ejecuta un algoritmo de control con el fin de obtener el torque que deberá entregar cada motor. Así mismo, cada controlador de los motores notificará al controlador principal, sobre el estado de los

motores, con el fin de que en todo momento el sistema reconozca el movimiento que cada motor viene realizando. La información correspondiente a la carga en el caso de que la persona no este levantando ningún objeto, será la del peso del exoesqueleto.

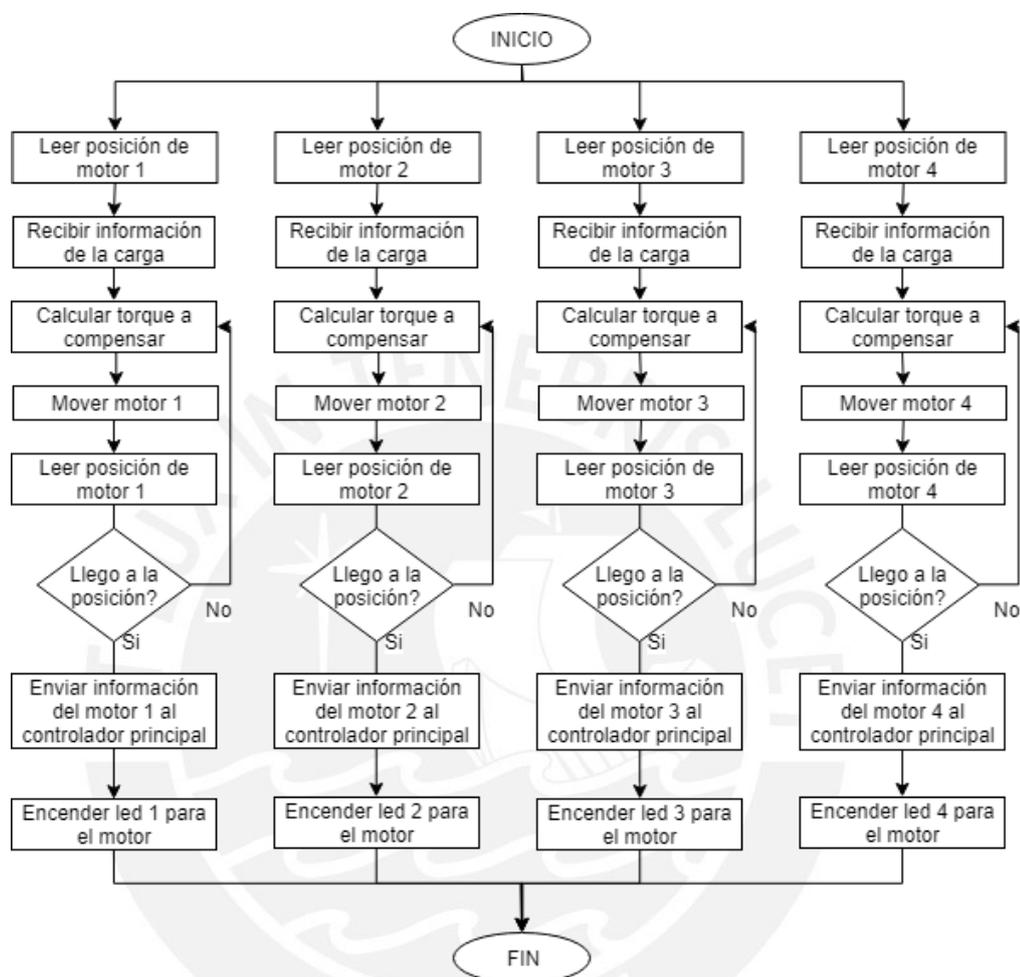


Figura 4.2: Diagrama de flujo del control de los motores

El controlador principal es el encargado de recibir las señales provenientes del arreglo de sensores de fuerza ubicados en la mano. Estas señales se procesan con el fin de calcular el peso que el usuario está levantando, y se envían a cada controlador de los motores. Como funcionamiento paralelo, el controlador principal también se encargará del monitoreo del nivel de batería. El seguimiento al nivel de batería tiene como objetivo informar cuando el nivel de batería se encuentre por debajo del 30%, y al no cumplir este permisivo de funcionamiento el sistema de control emite las señales correspondientes e indica mediante un led que necesita ser conectado al sistema de

carga de las baterías. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo de lo expuesto previamente.

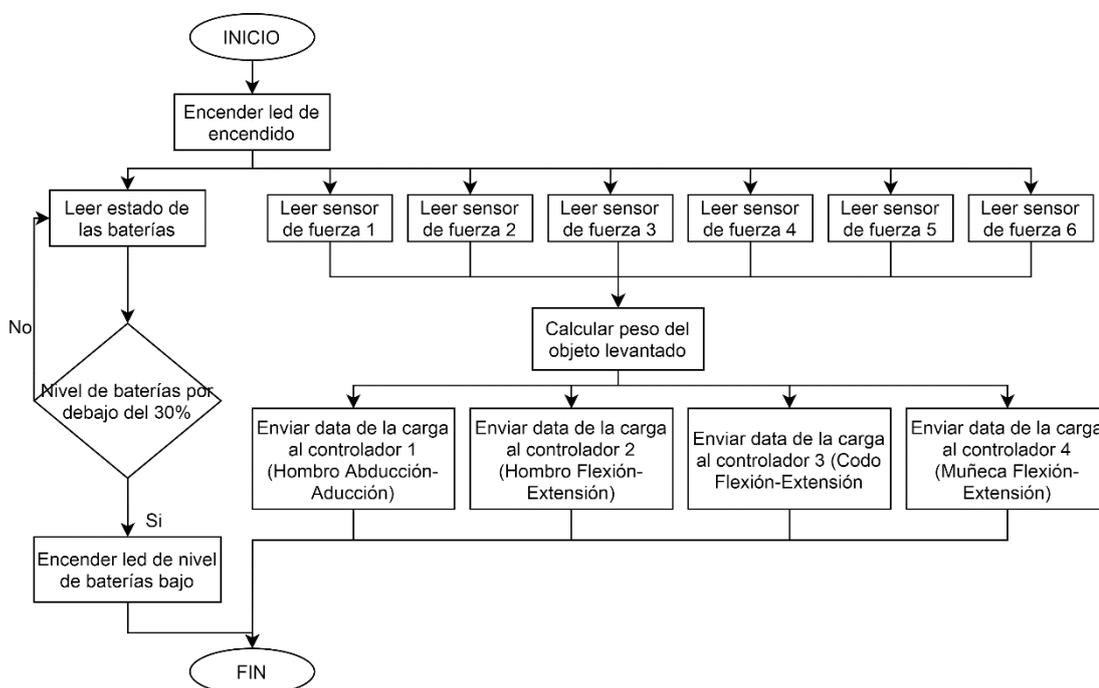


Figura 4.3: Diagrama de flujo del controlador principal

4.2 Diseño del sistema eléctrico-electrónico

En la sección 4.1 se identificaron las funciones las cuales el sistema debe satisfacer. Es por esto, que en esta sección se seleccionarán los componentes que permiten cumplir con lo establecido en la sección previa. Se realizará un cálculo de la potencia eléctrica que necesita el exoesqueleto para su funcionamiento, se seleccionarán los componentes eléctricos y se mostrarán los esquemáticos del sistema de control, potencia y el unificado.

Cabe remarcar, que dentro de los alcances de este proyecto no se contempla la ubicación de los componentes que se seleccionan en esta sección, pero se propone en base a literatura sobre exoesqueletos, que dichos componentes se ubiquen en el sistema espalda torso del exoesqueleto (Tablero de control).

4.2.1 Cálculo de potencia del dispositivo

El motor seleccionado, de la empresa Maxon Motors, funciona con un voltaje nominal de 18V y con una corriente nominal de 18^a y la potencia consumida por cada motor es de 600W (Ecuación 4.1) de acuerdo a la información del fabricante, la cual es la que se tomará en el cálculo. Siendo la potencia máxima consumida por los motores 2400W.

$$P = V_N * I_N \quad (4.1)$$

Debido a que el circuito de control consume un porcentaje pequeño con respecto al circuito de potencia, es que se aplicará un factor de seguridad a la potencia obtenida de los motores, la cual será de 1.2. Por ende, la potencia total que se necesitará para el accionamiento de los miembros superiores será de 2880W.

Con el requerimiento energético obtenido, y considerando que dentro de los alcances del proyecto no se consigna el diseño de una fuente de energía para lograr suplir el requerimiento energético, es que se propone el diseño de un arreglo de pilas de litio, la cual debe estar considerado en futuros proyectos, al integrar con el sistema de torso-espalda y el sistema de piernas.

Debido a que este requerimiento energético no es convencional, y tampoco se encuentra dentro de los alcances del proyecto, el diseño y selección de la fuente de alimentación, basado en un arreglo de baterías de litio, está proyectado realizarse cuando se tenga el diseño definitivo del exoesqueleto de cuerpo completo.

4.2.2 Selección de componentes del circuito de control

En las siguientes líneas se presenta la selección de los componentes electrónicos que en conjunto constituyen el circuito de control.

- a. El controlador principal del exoesqueleto debe poseer diez pines analógicos (seis sensores de fuerza y cuatro señales para enviar y recibir la información del estado de los motores), pines digitales para la conexión de indicadores leds y permitir el

uso de interrupciones en sus pines, por ello se seleccionó la tarjeta STM32F103C8T6 (Figura 4.4). Además, esta tarjeta cuenta con una frecuencia de 72MHz y con un procesador Cortex-M3, la cual garantiza una velocidad de procesamiento lo suficientemente rápida para la transferencia y lectura de datos.



Figura 4.4: Tarjeta STM32F103C8T6⁸

- b. Los sensores de fuerza deberán ser ligeros y contar con un tamaño reducido, tal que puedan ser acoplados en un juego de seis sensores por mano. Con estos requerimientos se seleccionaron los FSR o sensores por resistencia de detección de fuerza (Figura 4.5). Estos sensores pueden resistir una carga entre 0.1-10kg los cuales nos permitirán conocer la carga y determinar la compensación que deberá realizar cada actuador. Estos sensores se ubicarán en la mano del usuario a través de un guante para garantizar que la carga se distribuya y se pueda obtener eficientemente la carga. El diseño tentativo de dicho guante se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.5: FSR⁹

⁸ Fuente: www.ebay.com. Consulta: 30 de junio de 2020

⁹ Fuente: www.digikey.com. Consulta: 30 de junio de 2020.

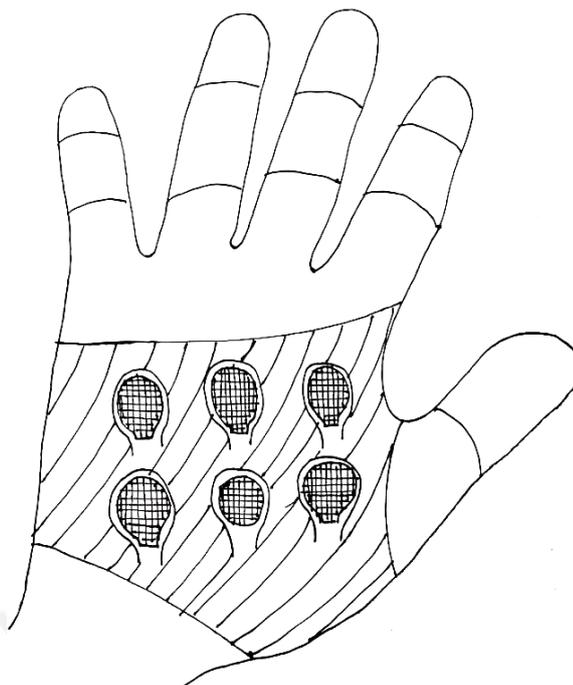


Figura 4.6: Diseño tentativo de la posición de los sensores de fuerza¹⁰

- c. Durante el movimiento de los actuadores, es importante poder conocer la posición a la cual estos se mueven, por esto es que se elige el uso de un sensor de posición de tipo hall, el cual viene incluido con el motor seleccionado. Debido a la reducción de velocidad que se realizó, es preciso realizarla también al sensor de posición.
- d. El controlador de cada motor es seleccionado del mismo fabricante de los motores, debido a que los motores requieren de un sistema de control y alimentación que solo el fabricante otorga. El controlador es el ESCON Module 50/8 HE 4Q (Figura 4.7), el cual permite controlar motores de potencia por encima de 400W, con salida de corriente de hasta 15A y un voltaje de entrada variable entre 10 y 50VDC. Este driver posee conexión directa entre el motor seleccionado. Para la programación del controlador, el fabricante ofrece el software ESCON Setup, el cual permite mediante conexión USB a una computadora poder configurar y programar las entradas y salidas del controlador.

¹⁰ Fuente: www.digikey.com. Consulta: 30 de junio de 2020.



Figura 4.7: Controlador del motor¹¹

- e. La alimentación del controlador principal debe ser capaz de recibir como entrada un voltaje variable, y contar con una salida continua a 5V. Con esto, el convertidor seleccionado es un DC-DC Step-Up (Figura 4.8) Este componente permite regular un voltaje de entrada entre 3.5 a 32VDC, y regularlo hasta un valor regulable entre 1.25 a 35VDC, con una salida máxima de 1.5A.



Figura 4.8: Regulador de voltaje¹²

- f. Las señales de entrada tales como el encendido, se realizarán mediante conmutadores (switch), como se muestra en la Figura 4.9. Además, se contará con indicadores tipo leds, para indicar el estado de las baterías, el encendido del dispositivo y para indicar el estado de los actuadores.



Figura 4.9: Switch¹³

¹¹ Fuente: www.maxonmotor.es. Consulta: 05 de julio de 2020.

¹² Fuente. <https://naylampmechatronics.com/>. Consulta: 05 de julio de 2020

¹³ Fuente. <https://naylampmechatronics.com/>. Consulta: 05 de julio de 2020

4.2.3 Diagrama de conexiones del exoesqueleto

El accionamiento de los motores, está dado por el controlador que el fabricante recomienda usar, ya cada motor posee tres fases y no dos como los motores convencionales. El sensor hall de cada motor va conectado al mismo controlador, debido a que el controlador está diseñado para recibir las conexiones del sensor. Por último, el controlador del motor también recibirá una señal que se relaciona al peso que la persona está levantando. En la Figura 4.10 se muestra el diagrama de conexiones que el fabricante recomienda y en la Figura 4.11 se muestra el esquema de conexiones para el exoesqueleto en el caso de un solo motor.

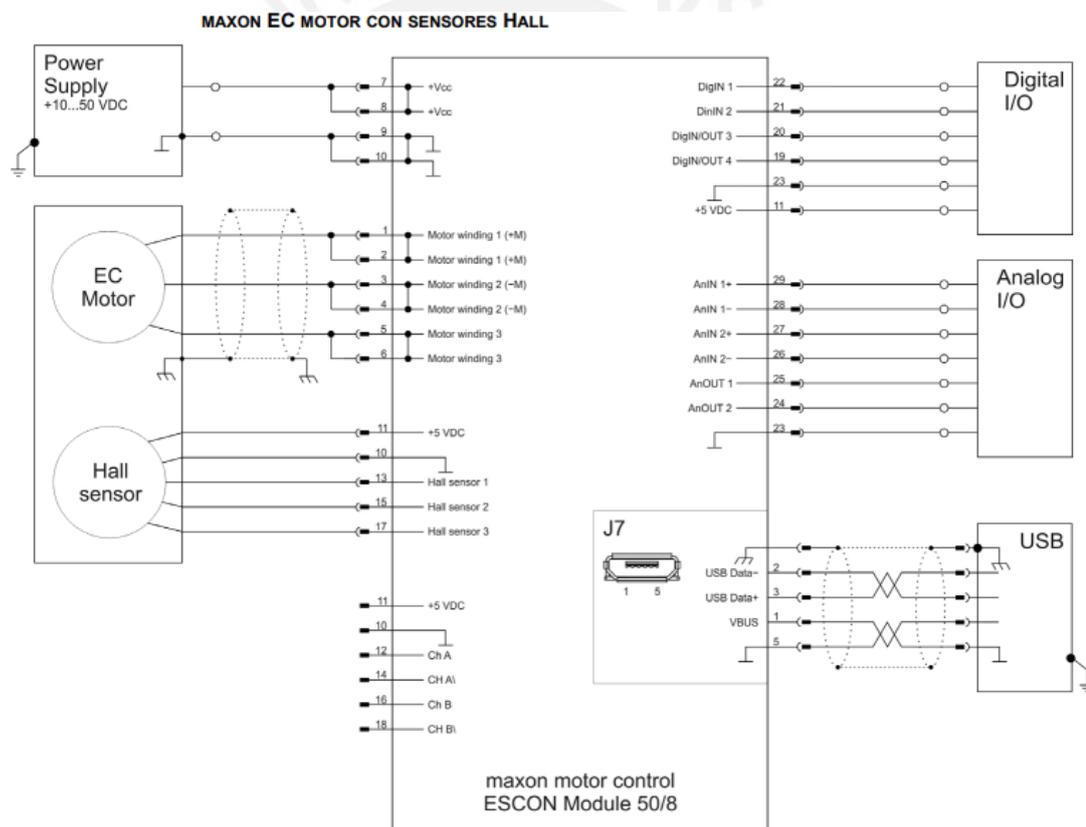


Figura 4.10: Cableado recomendado por el fabricante.¹⁴

¹⁴ Fuente: www.maxonmotor.es. Consulta: 08 de julio de 2020.

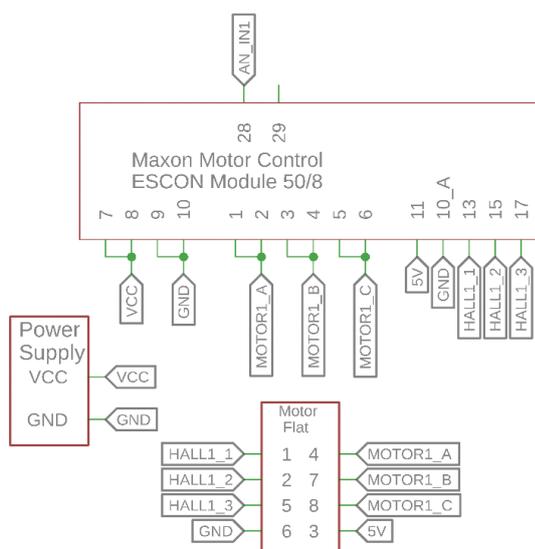


Figura 4.11: Esquema de conexiones para un motor

El controlador de todo el sistema recibe energía a través de un módulo Step-Up DC-DC el cual permite regular el voltaje de la fuente (Power Supply) y rectificarlo a un valor de 5V. Además, el controlador principal (STM32F103) recibirá la señal proveniente de los sensores de fuerza (FSR) para luego del procesamiento enviar mediante señales analógicas la señal hacia los controladores de los motores. Se cuenta también con un conmutador el cual se encargará del encendido del dispositivo. Por último, existirán seis indicadores, de los cuales uno indicará el si el exoesqueleto esta energizado, otro indicará si la energía de las baterías se encuentra por debajo de un 30% (permisivo de funcionamiento) y los cuatro últimos mostrarán cuando los motores estén funcionando, por ello están conectados a pines de propósito general para que el controlador decida cuando deban ser encendidos.

Debido a que es necesario conocer el tipo de batería, su capacidad y condiciones de instalación, es que en el circuito no se ha indicado el circuito que permitirá estimar el nivel de batería, ya que como se indicó en la introducción de la sección 4.2.1 dado el alcance de este proyecto, se entrega el requisito energético.

En la Figura 4.12 se muestra el diagrama de conexiones, mientras que el esquema eléctrico de todo el sistema se detalla en el siguiente capítulo.

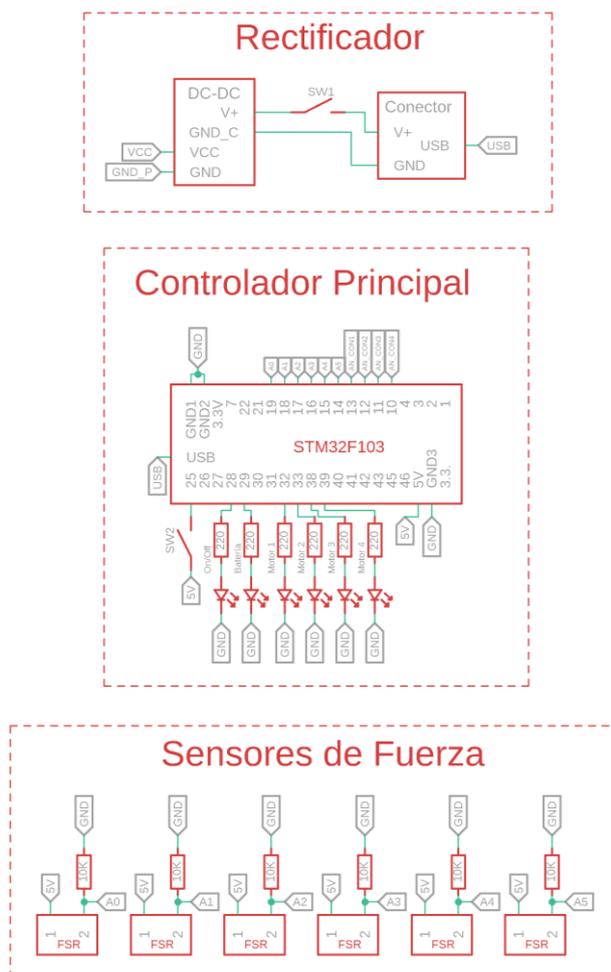


Figura 4.12: Esquema de conexiones del circuito de control

En la Figura 4.13 se muestra de manera esquemática el diseño del exoesqueleto colocado sobre una persona. Es preciso remarcar que el diseño presentado en las siguientes figuras corresponde al diseño de ambas extremidades del exoesqueleto. Debido a esto es que en las secciones previas se calcularon las fuerzas en el extremo del hombro (abducción-aducción), esto con el fin de continuar con el diseño del exoesqueleto de cuerpo entero, ya que las fuerzas que se generan no las debe soportar la persona. Estas fuerzas deben ser enviadas a un sistema de referencia inercial (tierra), y esto se logrará con el diseño del torso y piernas para así tener el exoesqueleto de cuerpo completo.

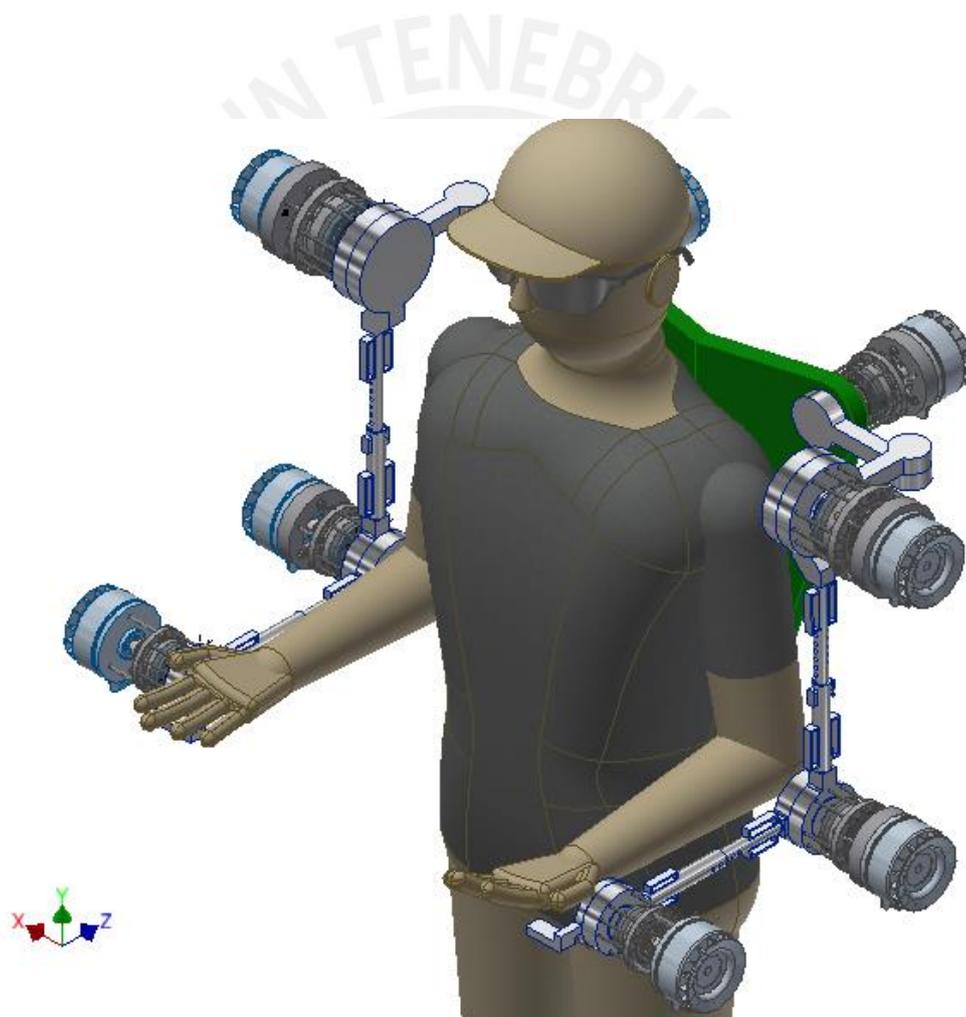


Figura 4.13: Esquema del exoesqueleto de miembros superiores

Finalmente, el exoesqueleto diseñado cuenta con un peso 9.25kg por extremidad, en conjunto el exoesqueleto puede soportar una carga de 30kg. Asimismo los rangos de movilidad en el hombro comprenden el movimiento de flexión-extensión (0° - 45°),

abducción-aducción (0° - 90°) y rotación lateral-medial (-10° - 50°); en el caso del codo posee el movimiento de flexión-extensión (0° - 120°) y el de la muñeca posee flexión-extensión (-60° - 60°). Dichos rangos de movilidad son mostrados en la sección 3.1.3 donde se muestra de manera gráfica el área de trabajo.



CAPÍTULO 5

PLANOS Y COSTOS

En este capítulo se detallarán la lista de planos mecánicos del exoesqueleto, estos incluyen planos de ensamble como de despiece. Además, se realizará una lista con los costos que involucran el desarrollo y fabricación del exoesqueleto, así como los costos de componentes eléctricos y electrónicos.

5.1 Lista de Planos

El dispositivo diseñado requiere de 25 planos, 7 de ensamble y 18 de despiece. Estos se nombrarán según la siguiente nomenclatura:

MSE-YXX-AZ

Donde:

MSE: Miembros Superiores del Exoesqueleto.

Y: Tipo de plano. (E: Ensamble, D: Despiece, ELE: Electrónico)

XX: Número de plano.

AZ: Tamaño de plano.

En la Tabla 5.1 se presenta la lista de planos con su respectiva nomenclatura y descripción. El resto de componentes del exoesqueleto pertenecen a elementos estandarizados, los cuales pueden ser obtenidos de diferentes proveedores.

Tabla 5.1: Lista de planos

Nomenclatura	Descripción
MSE-E01-A2	Miembros superiores del exoesqueleto
MSE-E02-A0	Sub-Ensamble de la extremidad superior
MSE-E03-A1	Sub-Ensamble del Hombro A
MSE-E04-A1	Sub-Ensamble del Hombro B
MSE-E05-A1	Sub-Ensamble del Codo
MSE-E06-A1	Sub-Ensamble de la Muñeca
MSE-D01-A3	Estructura del Hombro A
MSE-D02-A3	Estructura del Hombro B
MSE-D03-A2	Estructura del Brazo A
MSE-D04-A2	Estructura del Brazo B
MSE-D05-A2	Estructura del Antebrazo A
MSE-D06-A2	Estructura del Antebrazo B
MSE-D07-A2	Estructura de la Muñeca
MSE-D08-A4	Seguro del Brazo A
MSE-D09-A4	Seguro del Brazo B
MSE-D10-A3	Despiece de Ejes
MSE-D11-A3	Despiece de Acoples
MSE-D12-A3	Despiece de Bridas
MSE-ELE01-A3	Sistema Electrónico

5.2 Costos

El desarrollo del exoesqueleto contempla principalmente los costos de diseño y los de fabricación. En el caso del costo de diseño, que involucra los costos de comprensión de la necesidad, revisión del estado del arte, diseño conceptual, realización de cálculos, selección de componentes y materiales, elaboración de la memoria técnica y planos.

Por otro lado, se tienen los costos de fabricación, que son los componentes que se fabricarán o se adquirirán por algún proveedor de manera local o internacional; se incluye además los costos de ensamble, esto de acuerdo a las horas hombre que se requerirán para el ensamble del dispositivo por algún operario; los costos logísticos para la adquisición de los componentes y los costos por imprevistos. Por otro lado, los costos de fabricación se refieren a los costos de los componentes que deberán ser fabricados o adquiridos por algún proveedor, tanto local como internacional.

5.2.1 Costos de diseño

El cálculo del costo por la ingeniería desarrollada, es proporcional a la cantidad de horas invertida en el desarrollo del proyecto y el costo por cada una de esas horas. Se considera como costo de diseño al desarrollo y la revisión de dicha ingeniería. Para la realización de este proyecto se estima su desarrollo en 8 semanas de 5 días cada una y 8 horas al día, asimismo su revisión se estima en 4 horas a la semana. La Tabla 5.2 muestra el cálculo del costo de diseño, el cual es estima en S/ 19,200.

Tabla 5.2: Estimación de costos de diseño

Servicio	Costo por Hora	Duración (h)	Total (S/.)
Desarrollo de ingeniería	50	320	16,000
Revisión de ingeniería	100	32	3,200

5.2.2 Costos de componentes comerciales

Los costos que se estimarán en esta sección consisten en los elementos comerciales. En la Tabla 5.3 se muestra la lista de los motores, cajas reductoras, sensores y controladores. El tipo de cambio se consideró de 3.55S/. por cada dólar (\$), y 4.17S/. por cada euro (€), dichas cotizaciones se realizaron el 21 de setiembre del 2020.

En el caso de los motores y los controladores ESCON, su pedido y envío se realiza directamente de la página de Maxon-Motor. En dicha página la empresa ofrece un costo por envío de S/ 454. Las cajas reductoras de tipo Harmonic-Drive, se adquieren de la empresa Ebay, la cual ofrece un costo de envío de S/ 135.20. Por último, los demás componentes se adquieren en el mercado local y no presentan algún tipo de impuesto, salvo el IGV (18%).

Es preciso indicar que según información de aduanas, todo producto al ingresar al Perú que cuente con un precio de compra superior a los 200 dólares, debe pagar un impuesto del 18% sobre el precio de compra del producto¹⁵.

Tabla 5.3: Estimación de costos de elementos comerciales

Componente	Costo Unitario (S/.)	Cantidad	Subtotal (S/.)
Motor EC de tipo Flat, Maxon	964.39	4	3,857.56
Controlador ESCON Module 50/8 HE 4Q	852.72	4	3,410.88
Costo por envío - Maxon	590.00	1	590.00
HFUC-17-100-2UH	1,108.50	1	1,108.50
HFUC-25-100-2UH	942.62	1	942.62
HFUC-17-50-2UH	1,058.05	1	1,058.05
HFUC-14-30-2UH	1,008.50	1	1,008.50
Costo por envío - Ebay	180.20	1	180.20
Tarjeta STM32F103C8T6	39.00	1	39.00
Sensores de Presión (FSR)	32.05	6	192.33
Convertidor de Voltaje DC-DC Step-Up	18.00	1	18.00
		Subtotal	12,405.64
		IGV (18%)	2,233.02
		Total	14,638.66

Es preciso remarcar que el precio de S/ 14,638.66 corresponde al costo por un solo miembro superior, al ser 2, el costo total sería S/ 29,277.32.

5.2.3 Costos de materia prima y fabricación

En esta sección se muestra una lista estimada de los materiales a usar durante la fabricación de los componentes, incluyendo los elementos de unión, acoples y chavetas, los que se listan en la Tabla 5.4.

En la estimación de las barras primero se calcula el volumen de cada elemento, para luego calcular el bloque de material que cubra todo el volumen de la pieza a fabricar. Una vez obtenido el bloque de material que englobe todo el volumen de la pieza, se asigna su precio de acuerdo a proveedores locales.

¹⁵ Fuente: <http://www.sunat.gob.pe/orientacionaduanera/importaFacil/index.html>. Consulta: 15 de julio de 2020.

El costo estimado por materia prima es de S/. 482.53, el cual corresponde al precio por cada extremidad, el costo total por ambas extremidades sería de S/. 965.06.

Tabla 5.4: Estimación de costos de materia prima

Componente	Costo Unitario (S/.)	Cantidad	Subtotal (S/.)
Barra rectangular de acero 20x100x200mm	45.00	2	90.00
Barra rectangular de acero 40x50x250mm	26.00	4	104.00
Barra circular acero Ø10x50mm	15.00	2	30.00
1kg de aluminio para fundición	7.00	3	21.00
Chaveta Paralela 4x4x16mm	3.33	1	3.33
Chaveta Paralela 5x5x10mm	6.66	1	6.66
Chaveta Paralela 5x5x12mm	6.66	1	6.66
Chaveta Paralela 6x6x12mm	6.66	1	6.66
Chaveta Paralela 6x6x20mm	6.66	1	6.66
Acople Flexible 10-8mm	12.00	2	24.00
Acople Flexible 14-10mm	12.00	1	12.00
Acople Flexible 10-6mm	12.00	1	12.00
Tornillo Prisionero Socket Allen M3x3	1.73	2	3.46
Tornillo Prisionero Socket Allen M3x4	1.73	8	13.84
Tornillo Prisionero Socket Allen M3x5	1.73	10	17.30
Tornillo Prisionero Socket Allen M3x6	1.73	2	3.46
Arandela M4	0.20	27	5.40
Arandela M5	0.20	18	3.60
Tornillo Allen M4x10	0.30	6	1.80
Tornillo Allen M4x40	0.30	6	1.80
Tornillo Allen M4x55	0.30	9	2.70
Tornillo Allen M4x60	0.30	9	2.70
Tornillo Allen M4x65	0.30	9	2.70
Tornillo Allen M5x10	0.50	12	6.00
Tornillo Allen M5x30	0.50	9	4.50
Tornillo Allen M5x40	0.50	4	2.00
Tornillo Allen M5x60	0.50	3	1.50
Tornillo Allen M5x75	0.50	12	6.00
Tornillo Allen M8x12	0.90	8	7.20
		Subtotal	408.93
		IGV (18%)	73.60
		Total	482.53

Los procesos de manufactura que se realizarán para la obtención son fundición, torneado y fresado. Estos procesos se realizan con proveedores locales. En la Tabla 5.5 se muestran los costos estimados de las operaciones que se realizarán para la fabricación de un brazo del exoesqueleto. Además, el costo de fabricación de las tarjetas tanto de control como de potencia se realizarán localmente, los que también se incluyen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Estimación de costos de manufactura de elementos comerciales

Componente	Subtotal (S/.)
Torneado	250.00
Fresado y taladrado	2,000.00
Fundición de aluminio	15.00
Tarjeta de control	300.00
Tarjeta de potencia	300.00
Subtotal	2265.00
IGV (18%)	407.70
Total	3,272.70

El costo estimado de manufactura de elementos comerciales para una extremidad del exoesqueleto se estima en S/. 3,272.70, por lo tanto, para ambas extremidades este costo sería de S/. 6,545.40.

5.2.4 Costos Total de Fabricación

El costo total de fabricación contempla los montos estimados en las tablas 5.3 a 5.5. Además, se considera el costo por el ensamble del exoesqueleto que se estima en un total de cincuenta (50) horas, con un costo de S/. 20 por hora para el ensamblaje de un brazo del exoesqueleto. Por ello, el costo de ensamble por brazo se estima en S/. 1,000.

La Tabla 5.6 muestra el listado del costo de fabricación por cada extremidad del exoesqueleto, en la que se adiciona un monto del 10% para imprevistos.

Tabla 5.6: Estimación de costos del exoesqueleto

Concepto	Subtotal (S/.)	
Costos de Fabricación (por cada extremidad prototipo)	Costo de Productos Comerciales	14,638.66
	Costo de Materia prima	482.53
	Costo de Manufactura	3,272.70
	Costo de Ensamble	1,000.00
	Costo de Imprevistos (10%)	1,912.39

En conclusión, el costo de diseño se estima en S/. 19,200; mientras que el costo de la fabricación (por cada extremidad del prototipo) se estima en S/. 21,306.28 por cada extremidad superior. Por lo tanto, el costo total de fabricación de ambas extremidades estaría alrededor de los S/. 43,000.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la elaboración del estado del arte, realizada para el entendimiento de la anatomía, la antropometría de las personas y la tecnología existente de los exoesqueletos, se observó que para lograr que una persona pueda aumentar sus capacidades físicas en la acción de levantar un objeto se recomienda que el exoesqueleto cubra todo el cuerpo. Sin embargo, debido a la complejidad del desarrollo de un exoesqueleto de cuerpo entero, es que este diseño solo está enfocado en el desarrollo de un exoesqueleto para los brazos, y no abarca el diseño de los sistemas de torso-espalda, ni el de piernas.

Durante el proceso de diseño del exoesqueleto se obtuvo las fuerzas y momentos resultantes en la zona de la espalda (Ver Tabla 3.15), en específico, en el lugar que se acopla el sistema de torso-espalda. Por lo tanto, se recomienda, para un futuro trabajo, tener en cuenta dichas fuerzas resultantes ya que estas fuerzas deben ir hacia un sistema inercial conveniente, en este caso a tierra, es decir, transferirse a través del exoesqueleto de torso-espalda y de los miembros inferiores. Además, se entrega el requerimiento energético del sistema y no se diseña una fuente de energía y tampoco la ubicación del tablero de control, debido a que este proyecto es parte del desarrollo de un exoesqueleto de cuerpo entero, por ende, no se puede diseñar una fuente de energía sin conocer el requisito energético de todo el exoesqueleto.

Asimismo, en el diseño no se consideró un análisis de fuerzas dinámicas durante el movimiento, esto se da porque se considera que el movimiento es coplanar desde el inicio y que la velocidad con la que se eleva el objeto es baja, la cual no representaría una carga dinámica considerable.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha diseñado un exoesqueleto de miembros superiores el cual permite aumentar las capacidades físicas de la persona. El exoesqueleto cuenta con cinco grados de libertad de los cuales cuatro son actuados y reproducen los principales movimientos durante la acción de elevar una carga desde el suelo (flexión-extensión del hombro, codo y muñeca, y rotación lateral-medial del hombro). El dispositivo está diseñado para soportar levantar una carga de hasta 30kg.

Además, se determinó, mediante análisis estático de fuerzas, las fuerzas y momentos resultantes en el extremo del hombro del exoesqueleto (Ver Tabla 3.15). Estos valores servirán para el posterior diseño de los sistemas de espalda-torso y de miembros inferiores, ya que las fuerzas y momentos que se generan al soportar la carga máxima no puede ir hacia la persona, sino que deben ir dirigidas a tierra.

Se logró obtener los modelos matemáticos de la cinemática directa y diferencial, los cuales sirven de base en la realización del algoritmo de control por compensación de torque propuesto. Además, el modelo de la cinemática diferencial permite predecir si los movimientos que realizará el exoesqueleto generan singularidades.

El exoesqueleto cuenta con mecanismos que permiten la adaptabilidad a las características físicas del usuario, ya que se diseñó tomando en cuenta parámetros antropométricos, lo cual garantiza que un 75% de la población pueda ser capaz de portar el exoesqueleto.

Se obtuvo un costo próximo a los S/. 20,000 y un costo de fabricación de los miembros superiores del exoesqueleto de S/. 43,000.

BIBLIOGRAFÍA

- [Adrien, 2017] Adrien, M. (2017). Are we reaching the limits of Homo sapiens? *Frontier in Physiology*, 8(Art. 812).
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2017.00812/full>
- [Ávila, 2007] Ávila Chaurand, R., Prado León, L. R. y González Muñoz, E. L. (2007). *Dimensiones Antropométricas de Población Latinoamericana*. Guadalajara, Jal: Universidad de Guadalajara, Centro de Arte, Arquitectura y Diseño.
- [Congreso de la República, 2009] Congreso de la República. Ley N.º29088: Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Estibadores Terrestres y Transportistas Manuales(2009). Lima.
- [Crowell, 2002] Crowell, H. P., Boyton, A. C. y Mungiole, M. (2002). Exoskeleton Power and Torque Requirements Based on Human Biomechanics Wearable Robots: Biomechatronic.
- [Ebrahimi, 2017] Ebrahimi, A. (2017). Stuttgart Exo-Jacket: An exoskeleton for industrial upper body applications. *Proceedings - 2017 10th International Conference on Human System Interactions, HSI 2017*, 258–263.
<https://doi.org/10.1109/HSI.2017.8005042>.
- [Fontana, 2014] Fontana, M., Vertechy, R., Marcheschi S., Salsedo, F. y Bergamasco, M. (2014). The Body Extender: A full-body exoskeleton for the transport and Handling of heavy loads. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6990863>
- [Garcés, 2017] Garcés Betrán, A. E. (2017). Diseño de un mecanismo del tipo exoesqueleto de miembros inferiores que permita reproducir patrones de movimiento. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8337>
- [Gopura, 2012] Gopura, R., Kiguchi, K. (2012). Mechanical desings of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5209630>
- [Kapandji, 2012] Kapandji, A. (2012). *Fisiología Articular*. Francia: Editorial Médica Panameri.
- [Mio, 2014] Mio Zaldivar, R. A. (2014). Diseño de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior accionado por una interfaz cerebro-máquina. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/147854>
- [MTPE, 2013] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2013). Anuario Estadístico Sectorial 2013. 111(479), 1110.
- [MTPE, 2018] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo MTPE. (2018). Anuario Estadístico Sectorial 2018. 167.
- [Schiele, 2006] Schiele, A. y Van der Helm, F. (2006). “Kinematic Design to Improve Ergonomics in Human Machine Interaction”. Holanda. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4032758>
- [Sosa, 2017] Sosa Mendez, Deira. (2017). Desarrollo de un exoesqueleto para rehabilitación del hombre. Tesis para obtener el grado de Maestra en Robótica. Huajuapán de León, Oaxaca, México, Universidad Tecnológica de la Mixteca. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/13134.pdf
- [Sui, 2017] Sui, D., Fan, J., Jin, H., Cai, X., Zhao, J., y Zhu, Y. (2017). Desing of a wearable upper-limb exoskeleton for activities assistance of daily living. China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8014123>

- [Tang, 2020] Tang Juy, Javier Antonio. (2020). Estudio comparativo de exoesqueletos de miembros superiores de actuación pasiva basados en técnicas de compensación de carga. Trabajo de investigación para obtener el grado académico de bachiller en ciencias con mención en ingeniería mecánica. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18211>
- [Wiley, 2008] Wiley, J. y Pons, J. L. (2008). Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. España: Madrid: Wiley Editorial.
- [Zhou, 2017] Zhou, S., Song, Q., y Wang, X. (2017). Design and Simulation of Load Dynamic Compensation Controller Base on Dynamic Model for Upper Limb Exoskeleton Robot. China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8278423>



ANEXOS

ANEXO A: Hoja técnica de componentes

La información concerniente a la información técnica de los componentes en el exoesqueleto se muestra a continuación.

En la figura A.1 se muestra la información del motor.

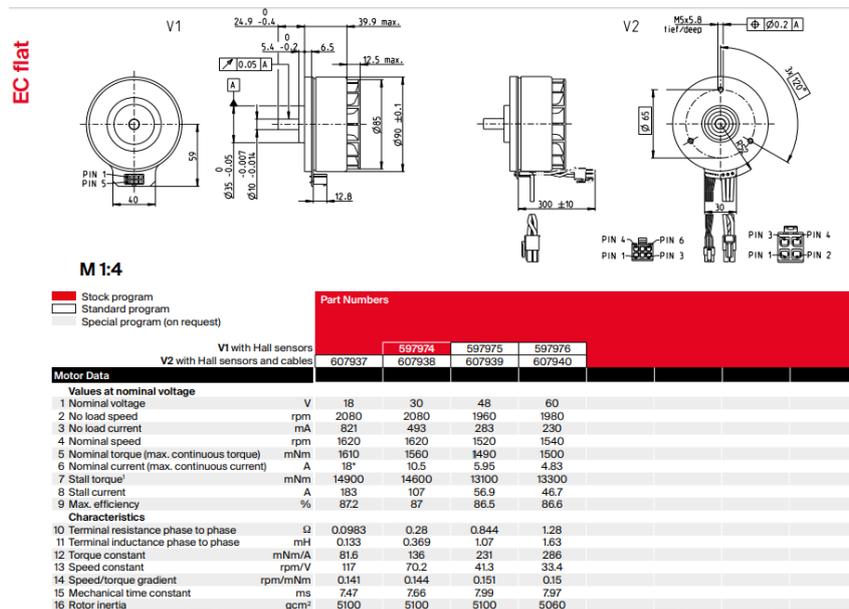


Figura A.1: Motor Maxon Tipo Flat

En la figura A.2 y A.3 se muestra las especificaciones de las cajas reductoras.

	Unit	HFUC-14-2UH				HFUC-17-2UH				
Ratio	i []	30	50	80	100	30	50	80	100	120
Repeatable peak torque	T_R [Nm]	9.0	18	23	28	16	34	43	54	54
Average torque	T_A [Nm]	6.8	6.9	11	11	12	26	27	39	39
Rated torque	T_N [Nm]	4.0	5.4	7.8	7.8	8.8	16	22	24	24
Momentary peak torque	T_M [Nm]	17	35	47	54	30	70	87	110	86
Maximum input speed (oil lubrication)	$n_{in(max)}$ [rpm]	14000				10000				
Maximum input speed (grease lubrication)	$n_{in(max)}$ [rpm]	8500				7300				
Average input speed (oil lubrication)	$n_{av(max)}$ [rpm]	6500				6500				
Average input speed (grease lubrication)	$n_{av(max)}$ [rpm]	3500				3500				
Moment of inertia	J_{in} [$\times 10^{-4}$ kgm ²]	0.033				0.079				
Weight	m [kg]	0.49				0.64				

Figura A.2: Especificaciones de la caja reductora

Table 10.2

	Unit	HFUC-20-2UH						HFUC-25-2UH					
		30	50	80	100	120	160	30	50	80	100	120	160
Ratio	i []	30	50	80	100	120	160	30	50	80	100	120	160
Repeatable peak torque	T_R [Nm]	27	56	74	82	87	92	50	98	137	157	167	176
Average torque	T_A [Nm]	20	34	47	49	49	49	38	55	87	108	108	108
Rated torque	T_N [Nm]	15	25	34	40	40	40	27	39	63	67	67	67
Momentary peak torque	T_M [Nm]	50	98	127	147	147	147	95	186	255	284	304	314
Maximum input speed (oil lubrication)	$n_{in(max)}$ [rpm]	10000						7500					
Maximum input speed (grease lubrication)	$n_{in(max)}$ [rpm]	6500						5600					
Average input speed (oil lubrication)	$n_{av(max)}$ [rpm]	6500						5600					
Average input speed (grease lubrication)	$n_{av(max)}$ [rpm]	3500						3500					
Moment of inertia	J_{in} [$\times 10^{-4}$ kgm ²]	0.193						0.413					
Weight	m [kg]	0.98						1.5					

Figura A.3: Especificaciones de la caja reductora

En la figura A.4 se muestra las especificaciones del controlador de cada motor, y en la figura A.5 se muestra las características del controlador principal

Product	
Weight	16 g
Motor	
DC motors up to	400 W
EC motors up to	400 W
Sensor	
Without sensor (DC motors)	Yes
DC tachometer	Yes
Digital incremental encoder (2-channel, single-ended)	Yes
Digital incremental encoder (2-channel, differential)	Yes
Digital incremental encoder (3-channel, differential)	Yes
Digital Hall sensors (EC Motors)	Yes
Operating modes	
Current controller	Yes
Speed controller (open loop)	Yes
Speed controller (closed loop)	Yes

Figura A.4: Especificaciones del controlador del motor

FEATURES

- STM32 microcontroller with LQFP64 package
- Two types of extension resources
 - Arduino Uno Revision 3 connectivity
 - STMicroelectronics Morpho extension pin headers for full access to all STM32 I/Os
- On-board ST-LINK/V2-1 debugger/programmer with SWD connector
 - Selection-mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2-1
- Flexible board power supply
 - USB VBUS or external source (3.3V, 5V, 7V to 12V)
 - Power management access point
- mbed-enabled (mbed.org)
- Three LEDs
 - USB communication (LD1), user LED (LD2), power LED (LD3)
- Two push buttons: USER and RESET
- USB re-enumeration capability: three different interfaces supported on USB
 - Virtual Com port
 - Mass storage
 - Debug port
- Comprehensive free software HAL library including a variety of software examples
- Supported by wide choice of Integrated Development Environments (IDEs) including IAR, Keil, GCC-based IDEs

Figura A.5: Especificaciones del controlador del motor

ANEXO B: Cotizaciones

En esta sección se muestra imágenes correspondientes a la cotización de los principales componentes que integran este proyecto. En la figura B.1 se muestra la cotización del motor y de su controlador, las cuales nos entrega la empresa Maxon.

maxon motor ag [CH] | <https://www.maxonmotor.es/maxon/view/checkout>

Carrito de la compra

Productos

Artículo	Datos técnicos	Precio por unidad	Cantidad / duración de envío	Precio total
 MOTOR EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 260 W, con sensores Hall N° de artículo: 500269	Diámetro exterior: 90 mm Tipo de potencia: 260 W Tensión nominal: 18 V Velocidad en vacío: 2110 rpm Par nominal (máx. par en continuo): 1010 mNm <input type="checkbox"/> Certificado de Conformidad ⓘ	CHF 223,10	Cantidad: 4 <div style="width: 100%; height: 10px; background-color: green;"></div>	CHF 892,40
 CONTROLADORA ESCON Module 50/8 HE, servocontrolador de 4 cuadrantes para motores DC/brushless, 8/15 A, 10-50 VDC N° de artículo: 586137	<input type="checkbox"/> Certificado de Conformidad ⓘ	CHF 239,10	Cantidad: 4 <div style="width: 100%; height: 10px; background-color: green;"></div>	CHF 956,40
Importe parcial Productos				CHF 1.848,80

[Enter promotion code](#)

Importe de carrito de la compra	CHF 1.848,80
Costes de envío y embalaje	CHF 134,00
IVA	-
Importe total	CHF 1.982,80

Figura B.1: Cotización de motor y controlador

En la figura B.2, B.3 y B.4 se muestra el precio de las cajas reductoras, las cuales fueron consultadas en WWW.EBAY.COM



Unit
HFUC-14-50-2UH-SP
Teile-Nr./Part No.: 60201701
Serie/Text : F30092041-002

Harmonic Drive AG engranajes hfuc - 14-50-2uh-sp 60201701
OVP - mostrar título original

Vendedor: [spares4less_shop](#) (4496 ★) 100% Comentarios positivos
[Guardar este vendedor](#) | [Contactar al vendedor](#) | [Ver otros artículos](#) | [Visitar tienda](#)

Estado: Otros nuevos (consulta los detalles)

Precio: **499.00 EUR**
Aproximadamente S/. 1 912,79

[¡Cómpralo ahora!](#)

[Agregar al carro de compras](#)

Mejor oferta: [Hacer oferta](#)

[Agregar a Lista de favoritos](#)

Figura B.2: Precio de caja reductora

Figura B.3: Precio de caja reductora

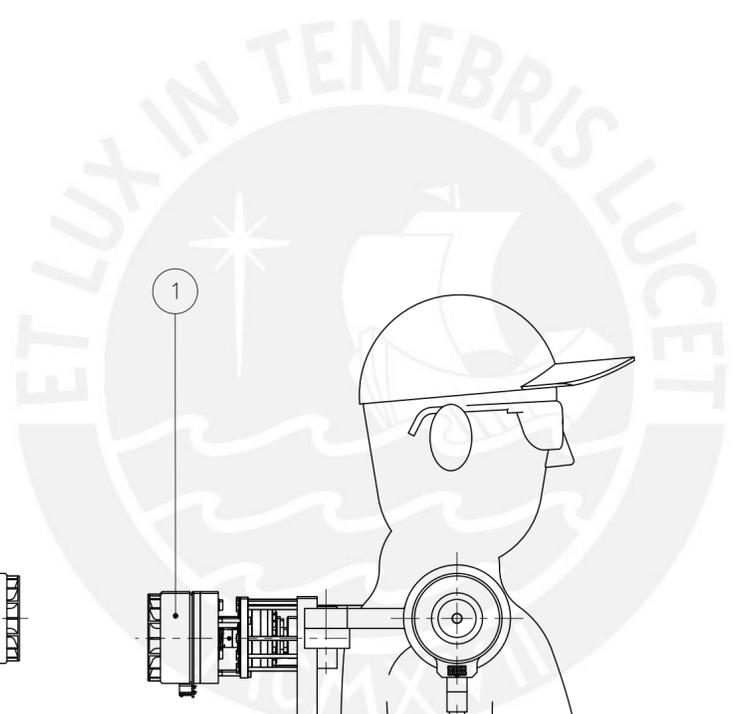
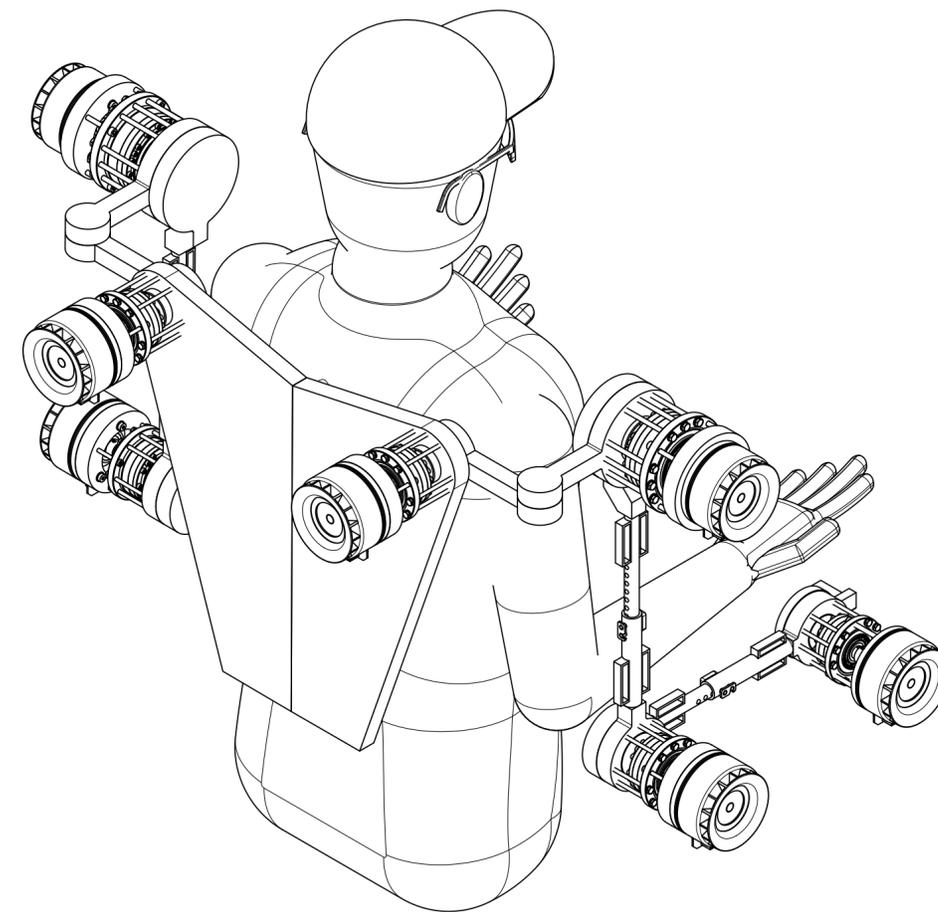
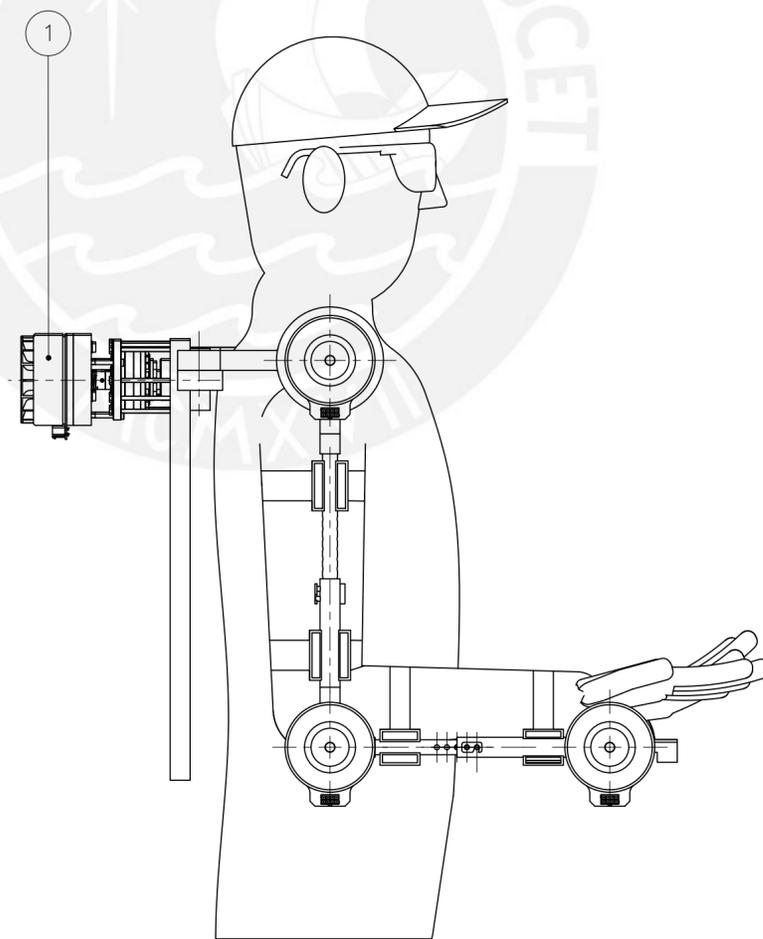
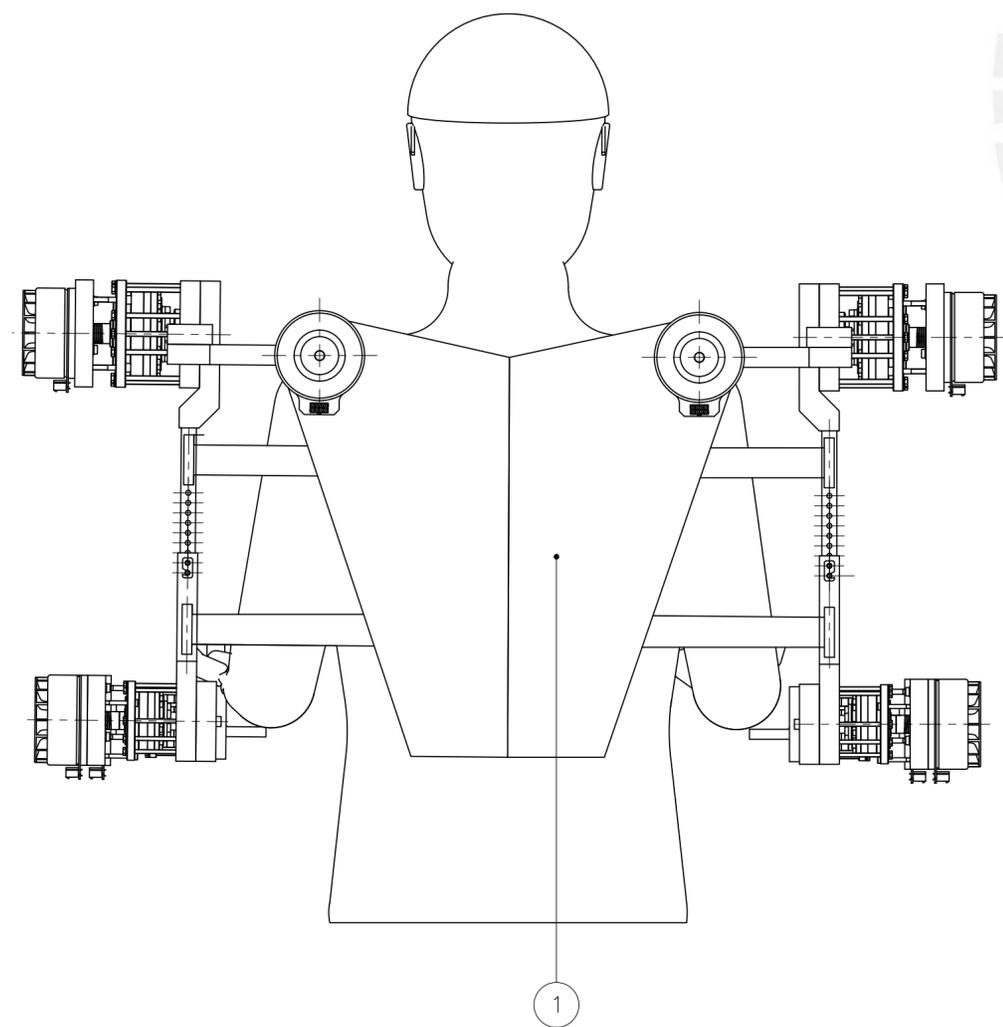
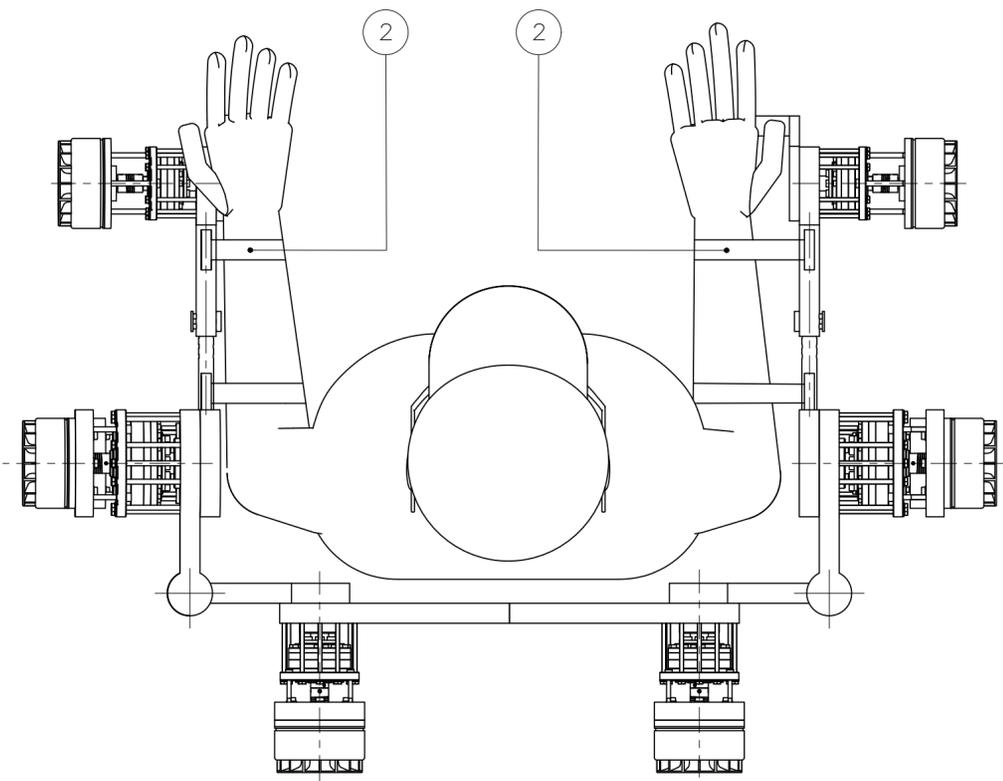
Figura B.4: Precio de caja reductora

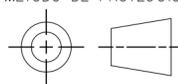
El precio por fundición se tomó como referencia el peso del componente a fundir, y se muestra en la figura B.5.

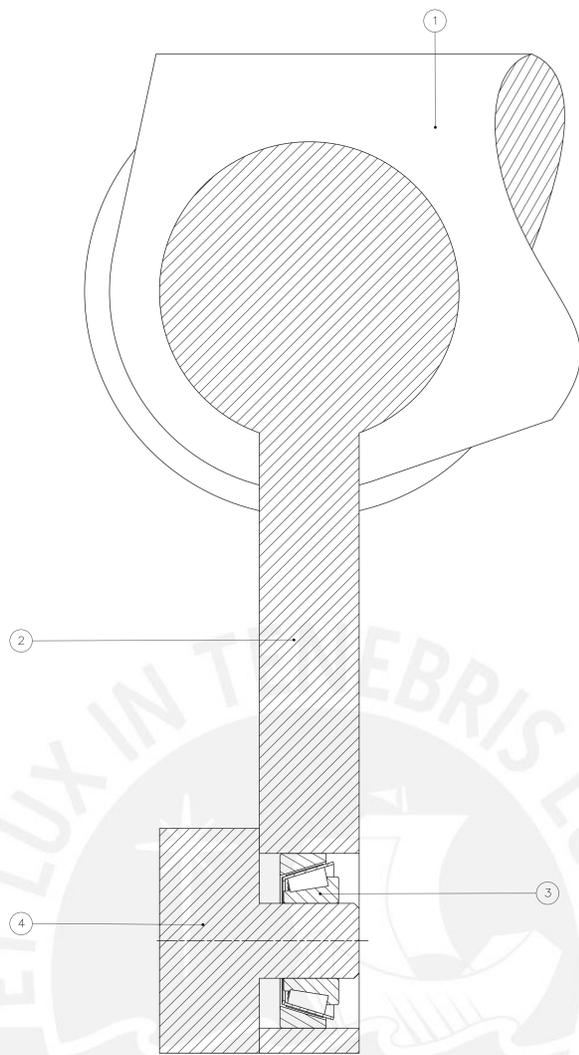
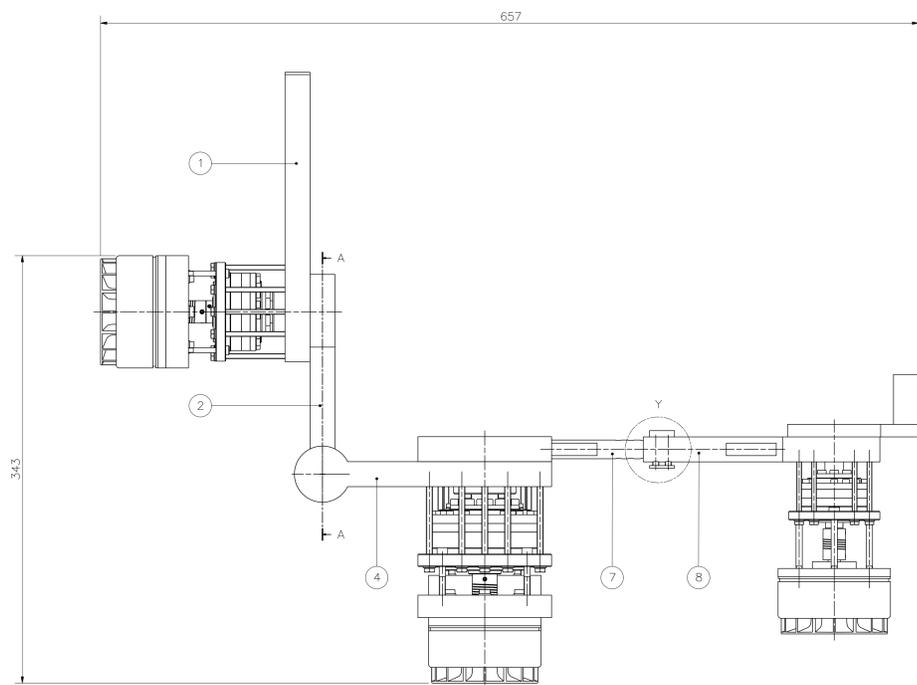
Figura B.5: Precio de fundición de aluminio

En el Perú, el límite el cual un hombre puede elevar una carga desde el suelo es de 25kg y en el caso de mujeres de 12.5kg¹.

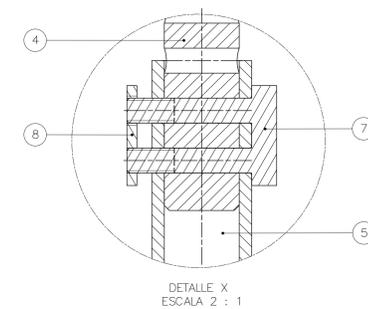
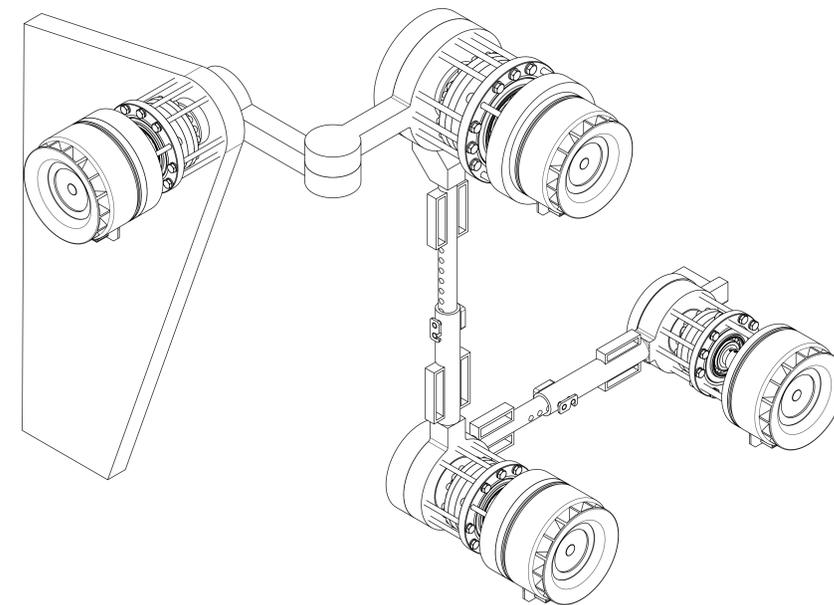
¹Fuente: <http://gacetalaboral.com/cual-es-el-peso-maximo-estibar/>. Consulta: 24 de agosto de 2020.



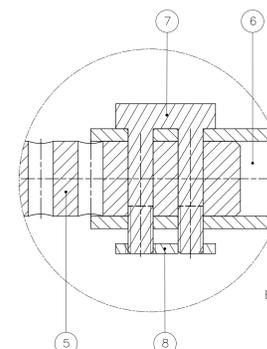
LISTA DE PARTES					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
S2	1	Unión con el Cuerpo		Velcro	
S1	1	Exoesqueleto de Miembros Superiores			EMS-E02-A0
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA <small>DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA</small>					ESCALA 1:5
MÉTODO DE PROYECCIÓN 		MIEMBROS SUPERIORES DEL EXOSQUELETO			FECHA: 2020.08.15
20132019		PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL			PLANO: MSE-E01-A2



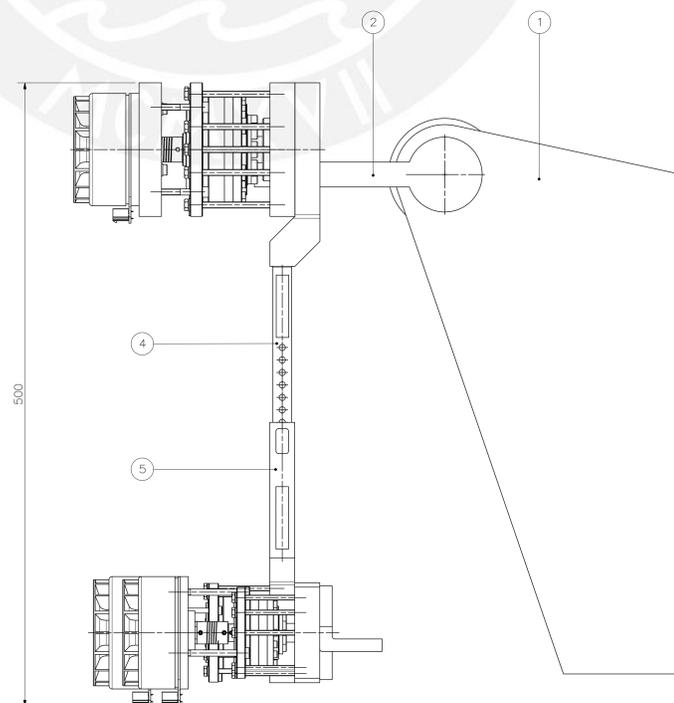
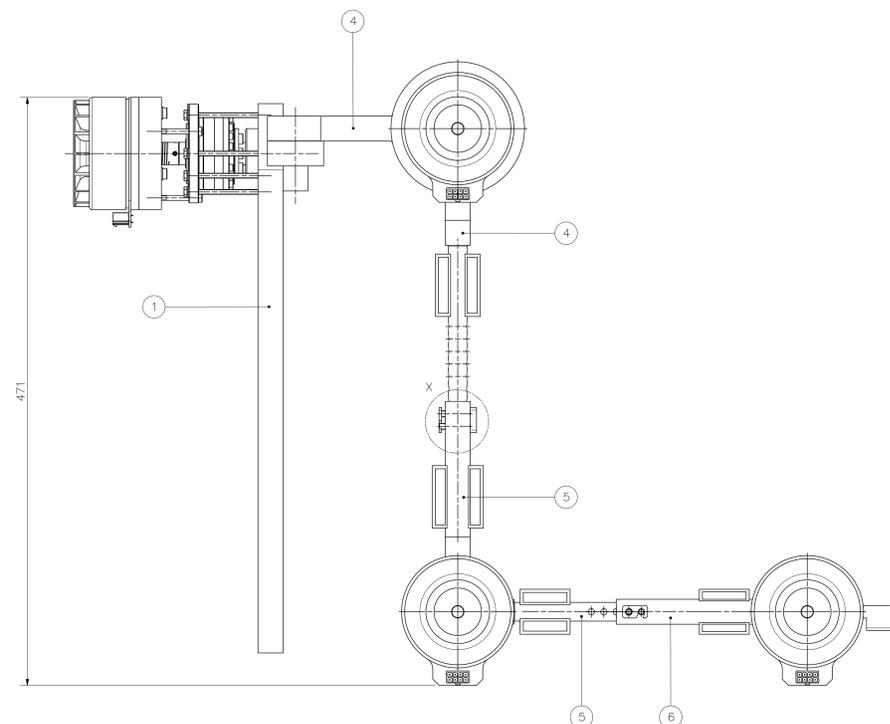
SECCIÓN A-A
ESCALA 2:1



DETALLE X
ESCALA 2 : 1



DETALLE Y
ESCALA 2 : 1



POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
8	2	Seguro B			EMS-209-A4
7	2	Seguro A			EMS-208-A4
6	1	Subensamble de la Muñeca		Aluminio 6061	EMS-E06-A1
5	1	Subensamble del Codo		Aluminio 6061	EMS-E05-A1
4	1	Subensamble del Hombro-B			EMS-E04-A1
3	1	Rodamiento de rodillos cónicos 15x35x11 ISO 335		SKF	
2	1	Subensamble del Hombro-A			EMS-E03-A1
1	1	Esápala			Elemento Referencial

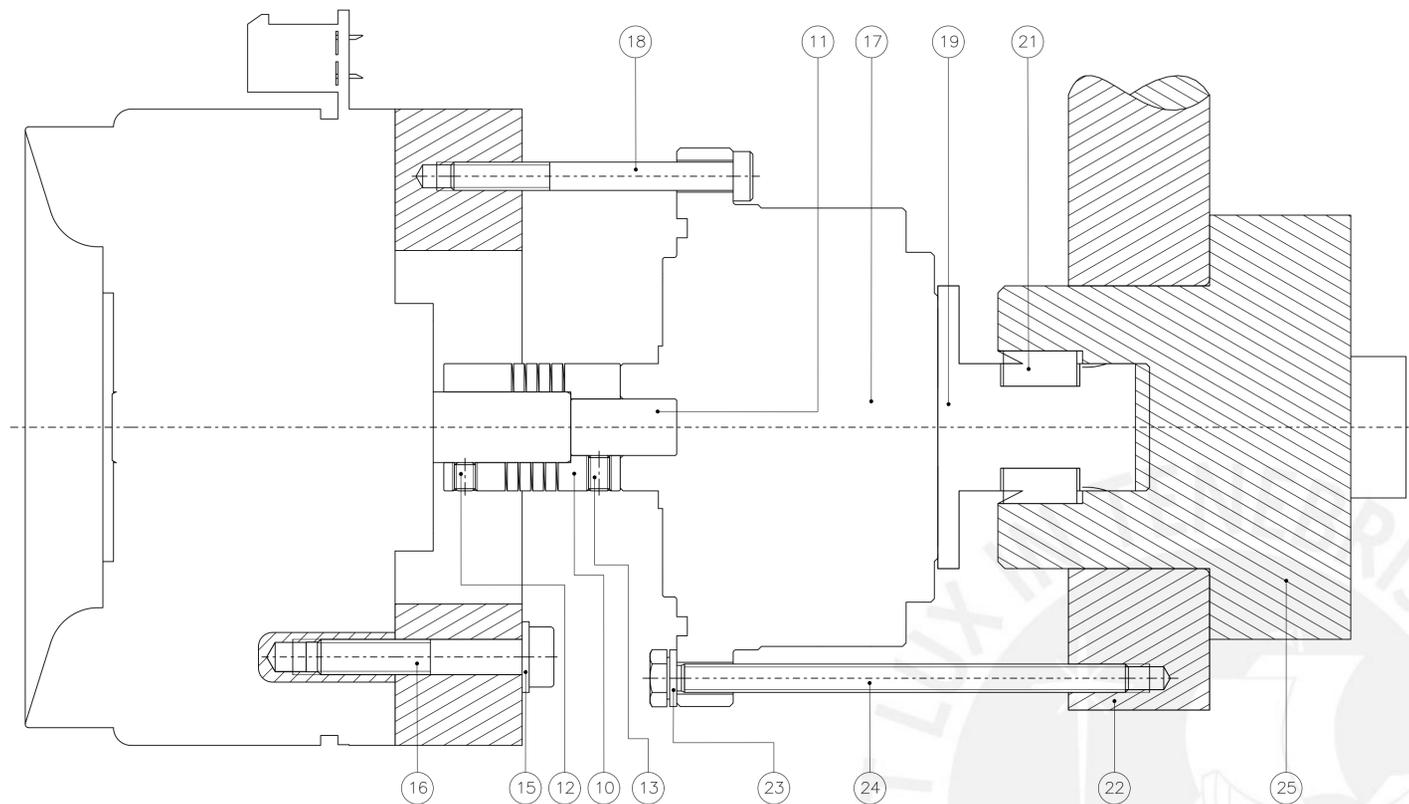
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

METODO DE PROYECCIÓN: ESCALA: 1:2

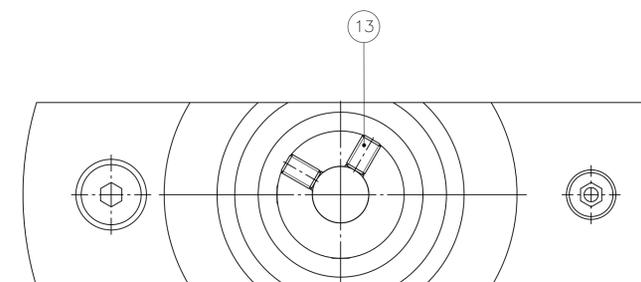
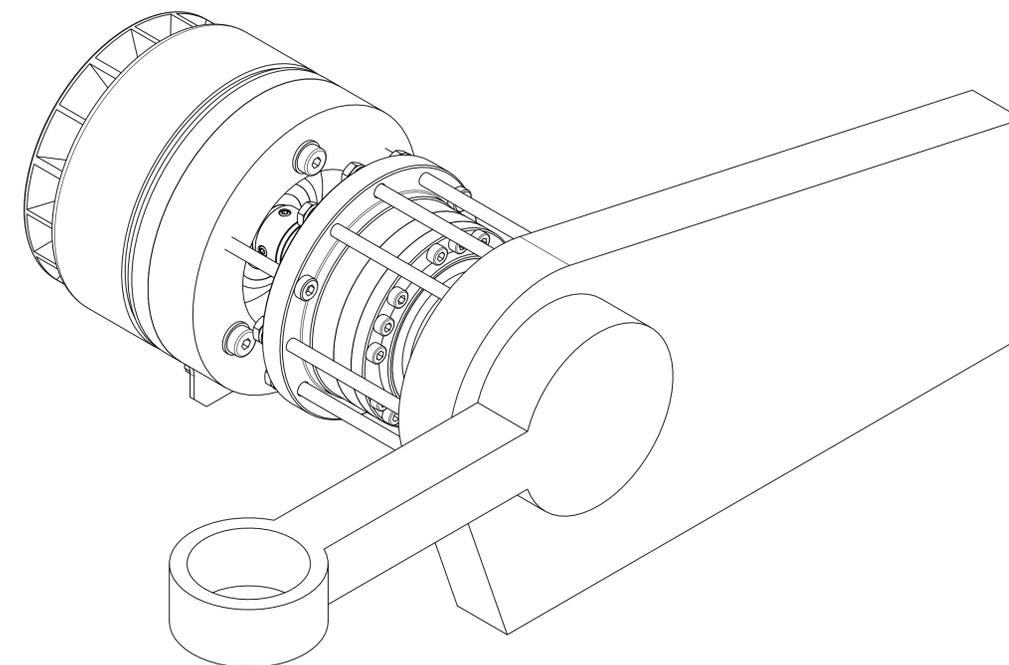
SUBENSAMBLE DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR

FECHA: 2020.10.15
PLANOS: MSE-E02-A0

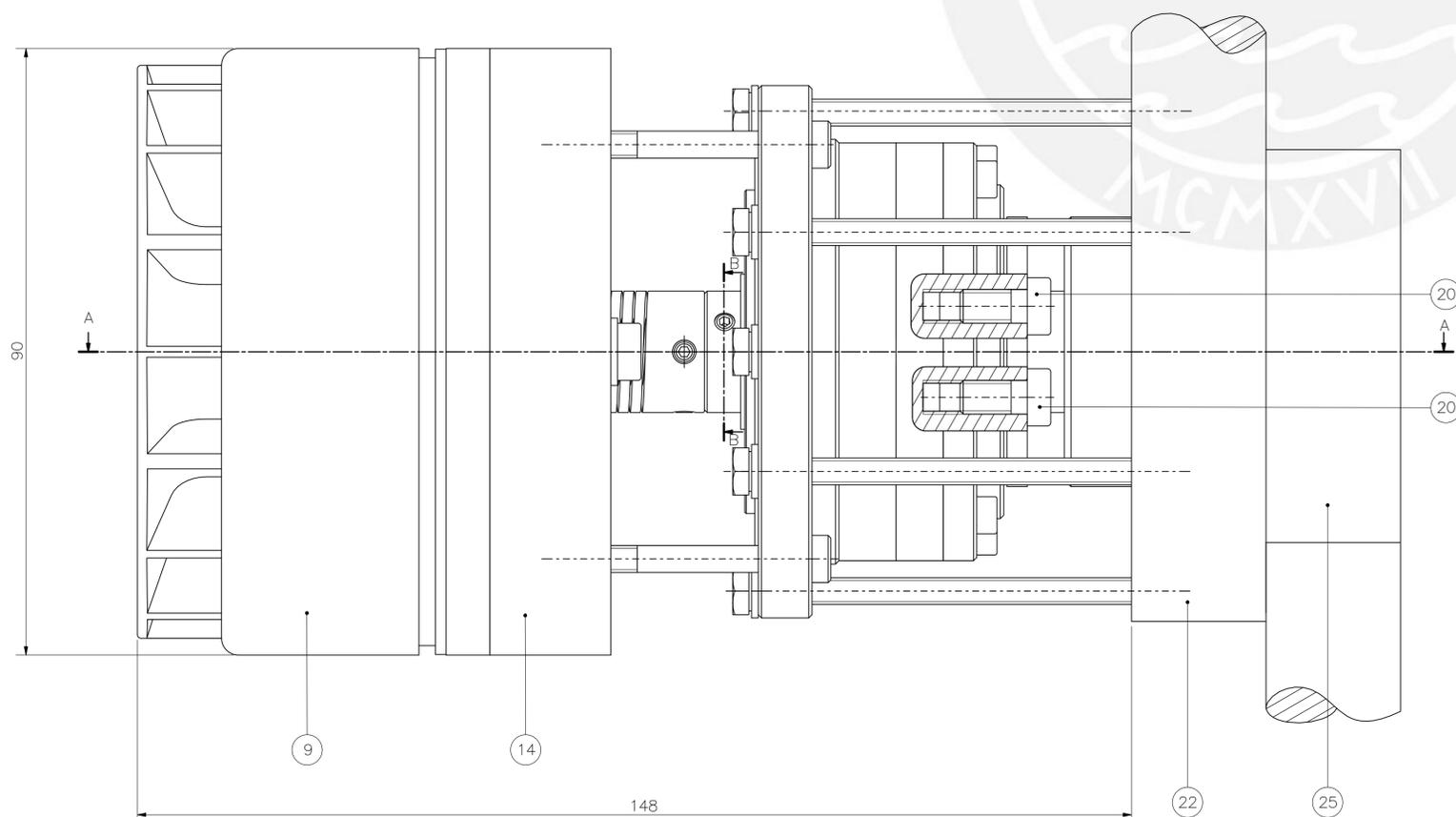
20132019 PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL



SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B



LISTA DE PARTES

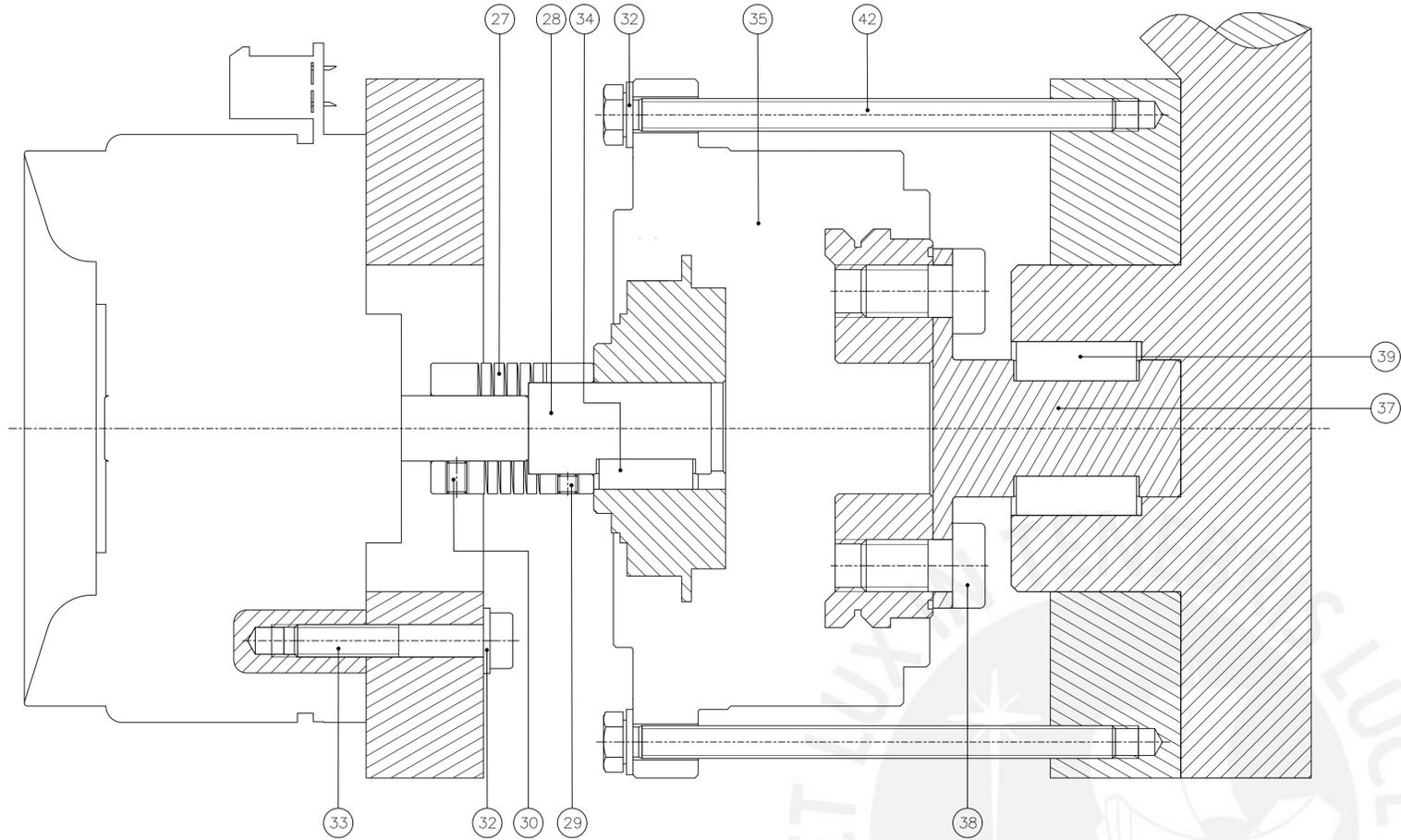
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
25	1	Estructura del Hombro-A		Aluminio 6061	EMS-D01-A3
24	9	Tornillo Hexagonales M4X65	DIN 933	8.8	
23	9	Arandelas M4	DIN 988	CK45	
22	1	Espalda			Elemento referencial
21	2	Chaveta Paralela 6x6x12mm	DIN 6885	CK45	
20	6	Tornillo Socket Allen M5X10	DIN 7984	8.8	
19	1	Brida 1		CK45	EMS-D12-A3
18	3	Tornillo Socket Allen M4X40	DIN 6912	8.8	
17	1	Caja Reductora-HFUC_17_100_2UH			Harmonic Drive
16	3	Tornillo Socket Allen M5X30	DIN 7984	8.8	
15	3	Arandelas M5	DIN 988	CK45	
14	1	Acople del Motor 1		CK45	EMS-D11-A3
13	4	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X5	DIN 913	45H	
12	2	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X4	DIN 913	45H	
11	1	Eje de entrada 1		CK45	EMS-D10-A3
10	1	Acople Flexible 10- 8mm		Aluminio 7075	
9	1	Motor EC Flat			Maxon

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

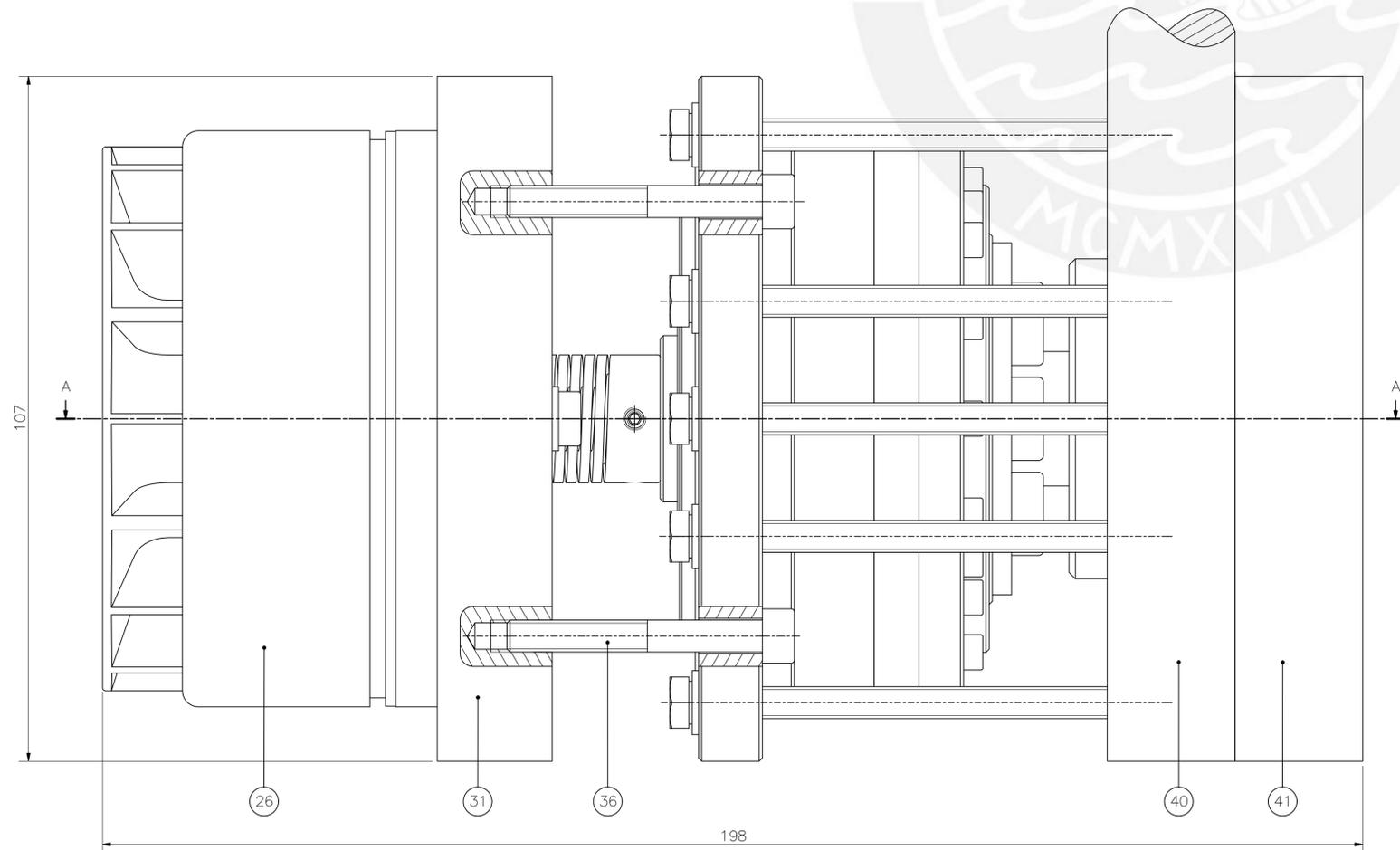
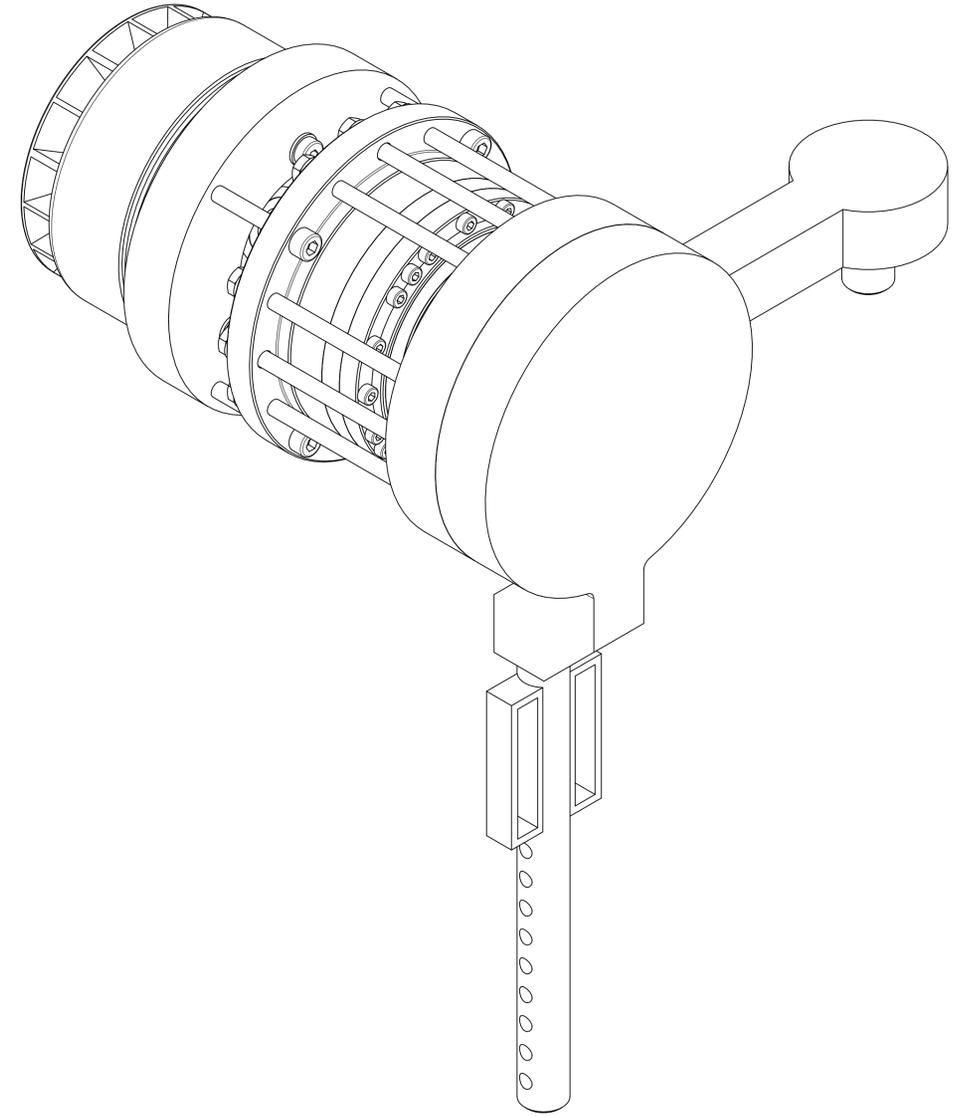
METODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
	2:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL

SUB-ENSAMBLE DEL
HOMBRO A

FECHA:
2020.10.15
PLANO:
MSE-E03-A1



SECCIÓN A-A

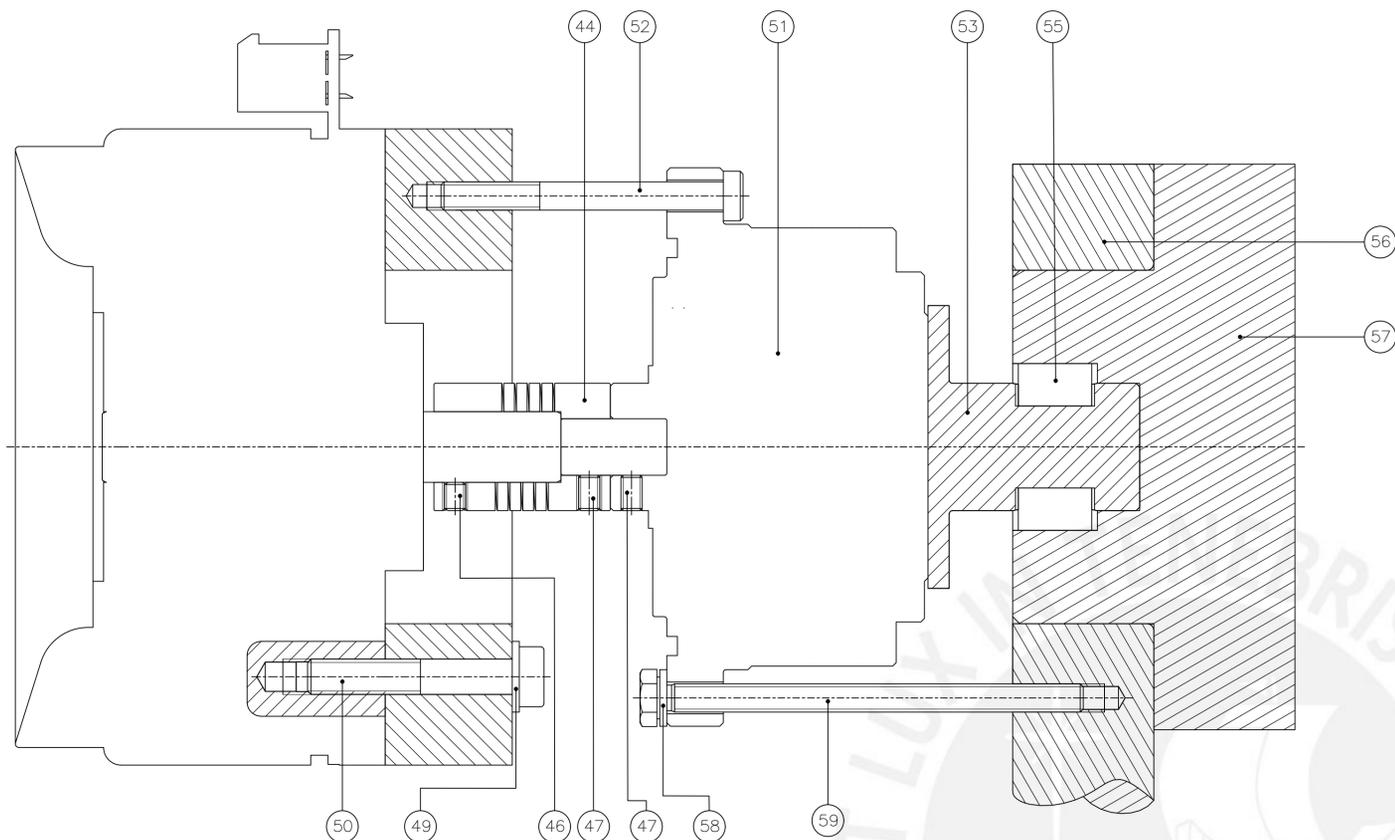


LISTA DE PARTES					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
42	12	Tornillo Hexagonales M5X75	DIN 933	8.8	
41	1	Estructura del Brazo-A		Aluminio 6061	EMS-D03-A2
40	1	Estructura del Hombro-B		Aluminio 6061	EMS-D02-A3
39	2	Chaveta paralela 6x6x20mm	DIN 6885	CK45	
38	8	Tornillo Socket Allen M8X14	DIN 7984	8.8	
37	1	Brida 2		CK45	EMS-D12-A3
36	4	Tornillo Socket Allen M5X40	DIN 912	8.8	
35	1	Caja Reductora-HFUC_25_100_2UH			Harmonic Drive
34	1	Chaveta paralela 4x4x16mm	DIN 6885	CK45	
33	3	Tornillos Socket Allen M5X30	DIN 7984	8.8	
32	15	Arandela M5	DIN 988	CK45	
31	1	Acople del Motor 2		CK45	EMS-D11-A3
30	1	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X5	DIN 913	45H	
29	1	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X3	DIN 913	45H	
28	1	Eje de Entrada 2		CK45	EMS-D10-A3
27	1	Acople Flexible 10-14mm		Aluminio 7075	
26	1	Motor EC Flat			Maxon

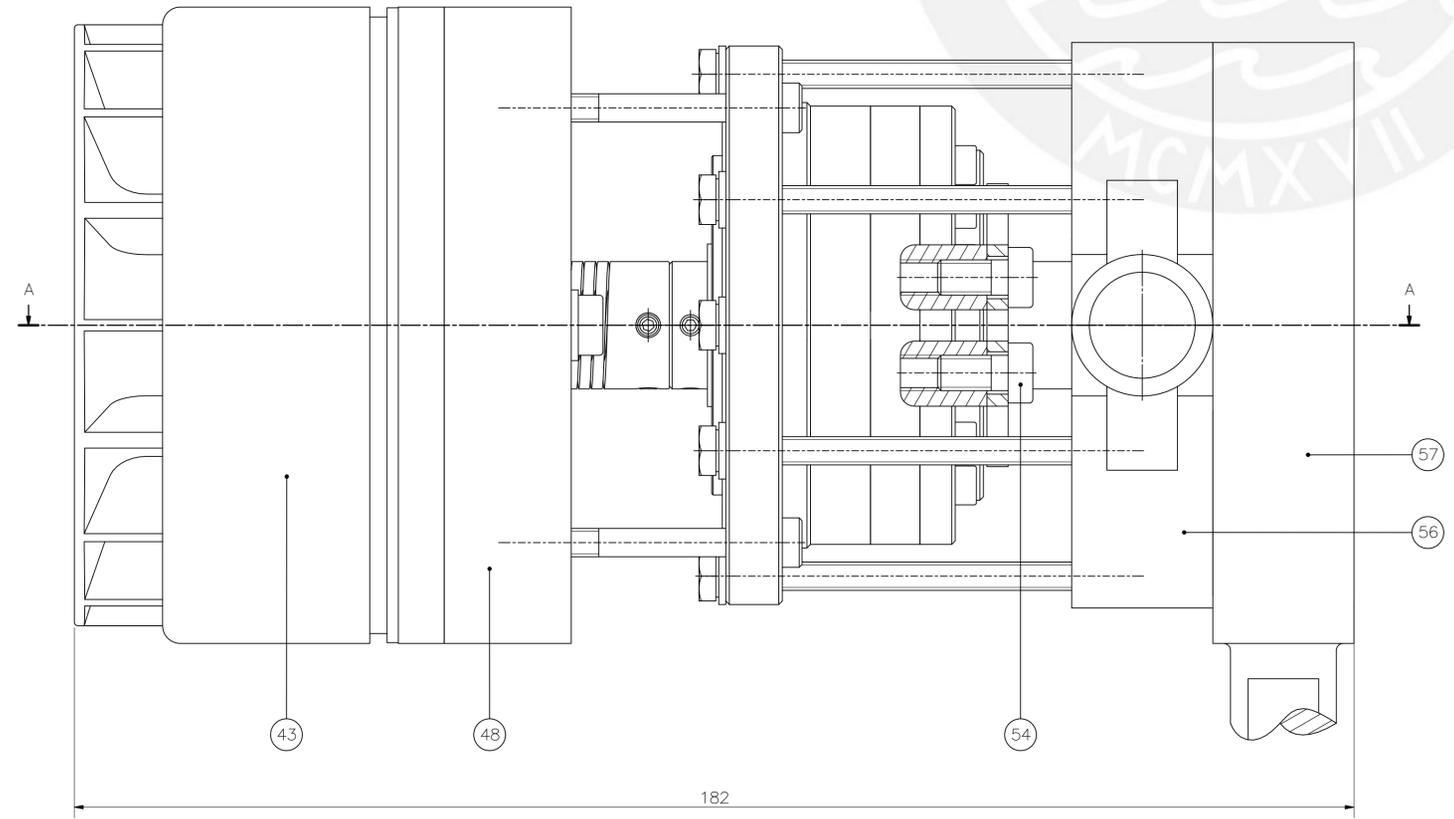
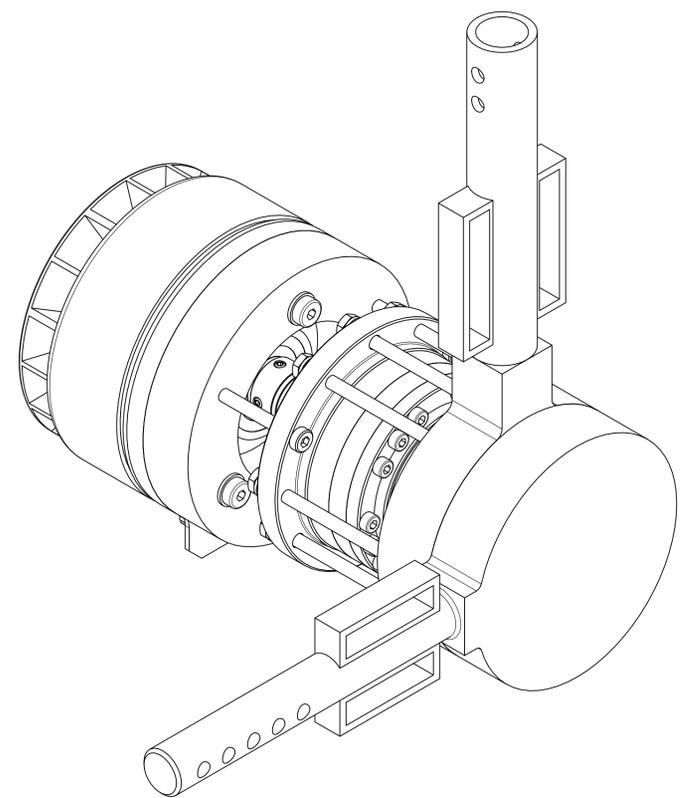
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	SUB-EMSABLE DEL HOMBRO B	ESCALA
		2:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	FECHA: 2020.10.15 PLANO: MSE-E04-A1



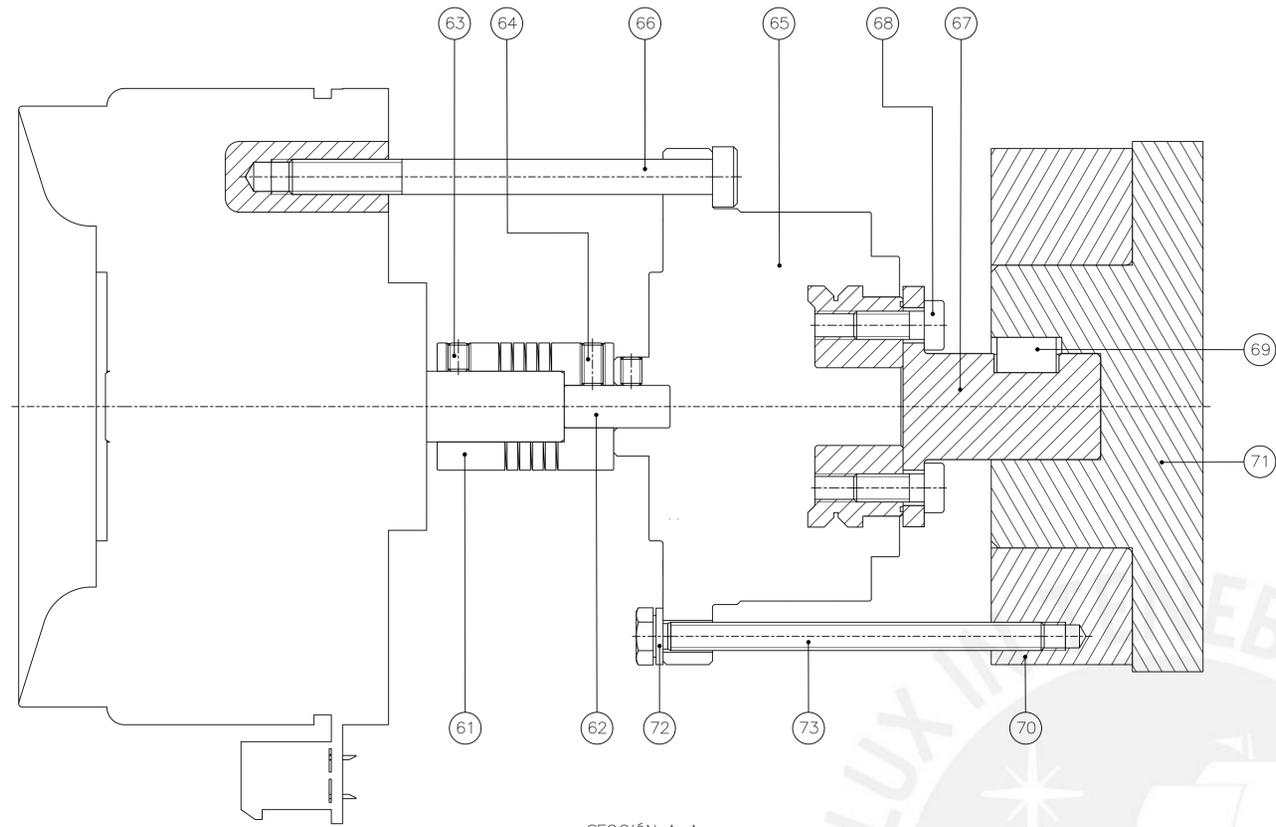
SECCIÓN A-A



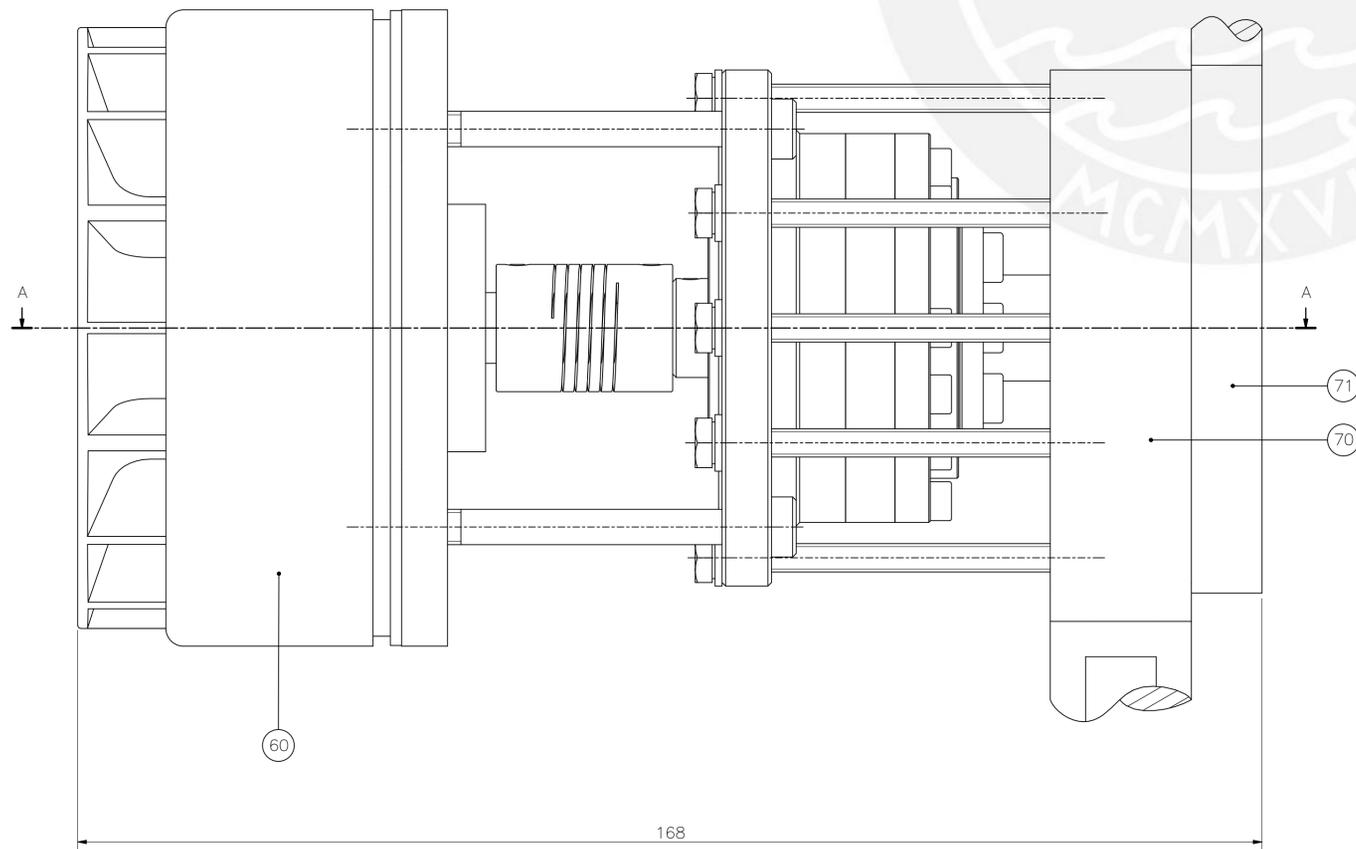
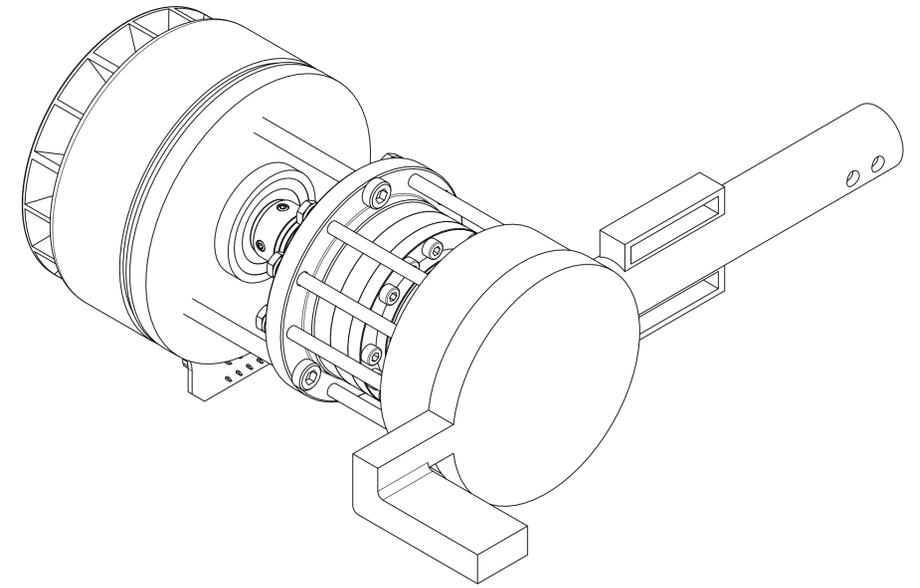
182

LISTA DE PARTES					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
59	9	Tornillo Hexagonales M4X60	DIN 933	8.8	
58	9	Arandelas M4	DIN 988	CK45	
57	1	Estructura del Antebrazo-A		Aluminio 6061	EMS-D05-A2
56	1	Estructura del Brazo-B		Aluminio 6061	EMS-D04-A2
55	2	Chaveta Paralela 6x6x12mm	DIN 6885	CK45	
54	6	Tornillo Socket Allen M5X10	DIN 7984	8.8	
53	1	Brida 1		CK45	EMS-D12-A3
52	3	Tornillo Socket Allen M4X40	DIN 6912	8.8	
51	1	Caja Reductora-HFUC_17_50_2UH			Harmonic Drive
50	3	Tornillos Socket Allen M5X30	DIN 7984	8.8	
49	3	Arandelas M5	DIN 988	CK45	
48	1	Acople del Motor 1		CK45	EMS-D11-A3
47	4	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X5	DIN 913	45H	
46	2	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X4	DIN 913	45H	
45	1	Eje de entrada 1		CK45	EMS-D10-A3
44	1	Acople Flexible 10-8mm		Aluminio 7075	
43	1	Motor EC Flat			Maxon

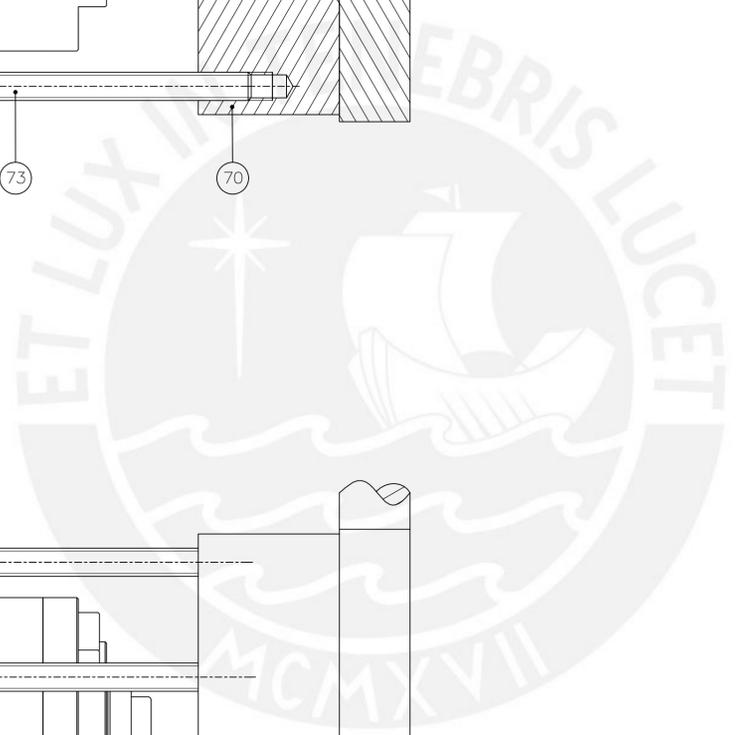
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SUB-ENSAMBLE DEL CODO		ESCALA
			2:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL		FECHA: 2020.10.15 PLANO: MSE-E05-A1



SECCIÓN A-A

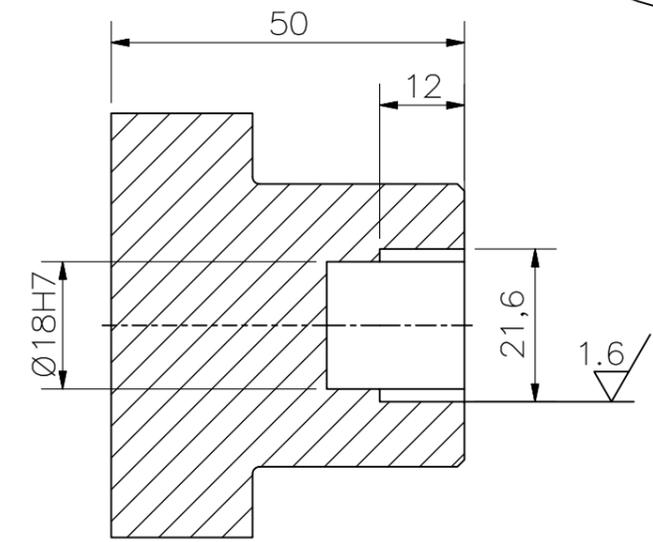
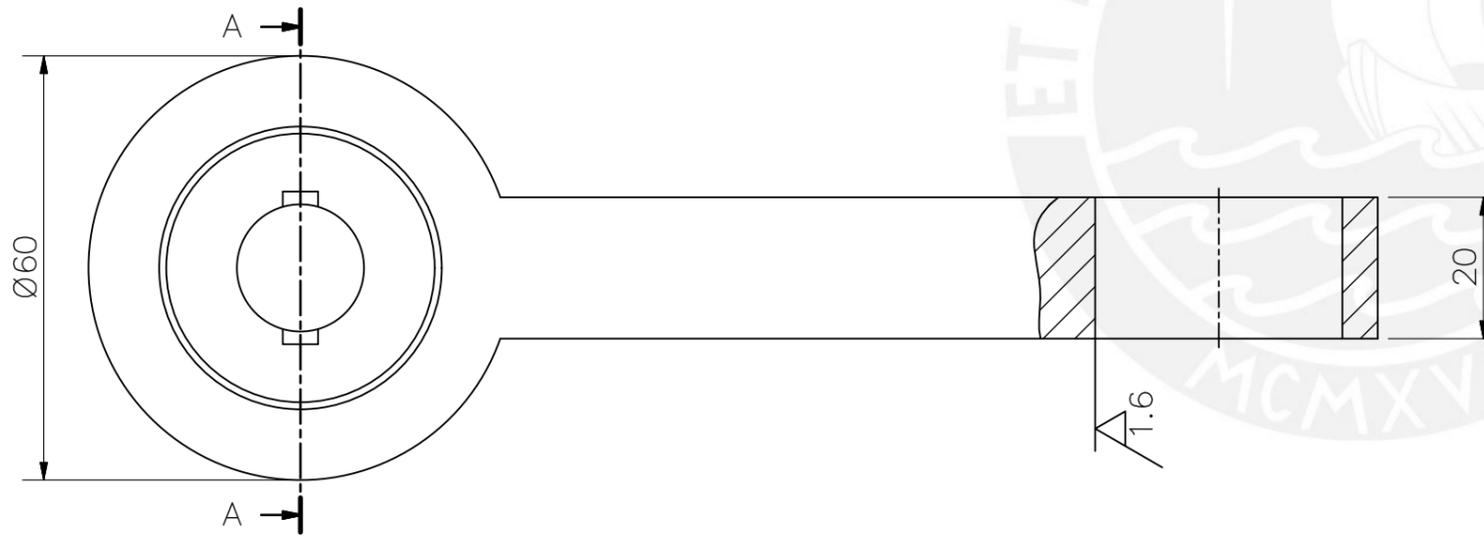
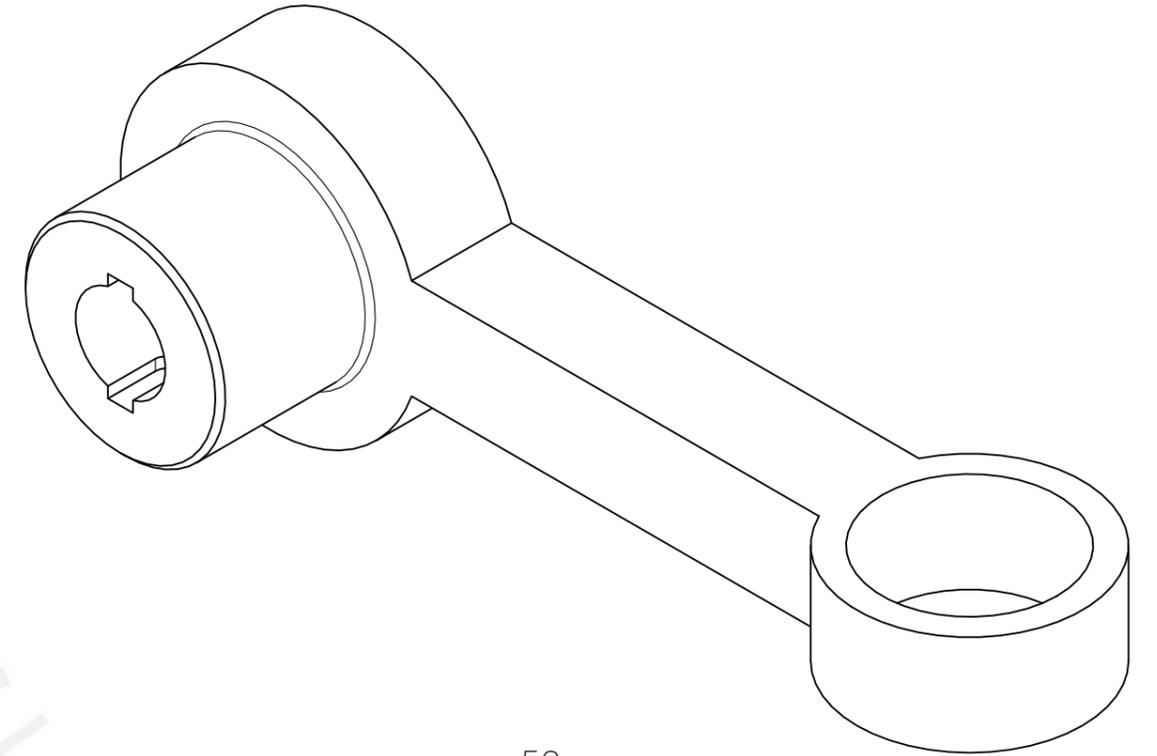
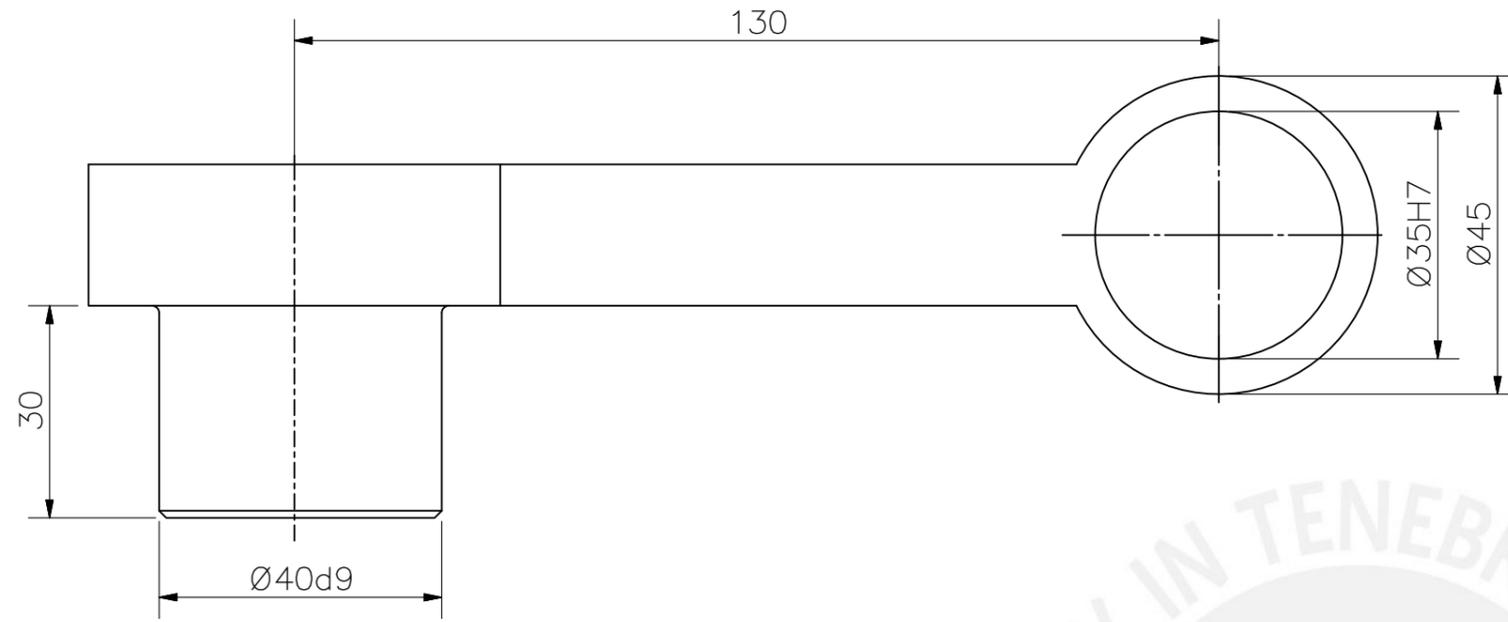


168



LISTA DE PARTES					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
73	9	Tornillos Hexagonales M4X55	DIN 933	8.8	
72	9	Arandelas M4	DIN 988	CK45	
71	1	Estructura de la Muñeca		Aluminio 6061	EMS-D07-A2
70	1	Estructura del Antebrazo-B		Aluminio 6061	EMS-D06-A2
69	1	Chaveta Paralela 5x5x10		CK45	
68	6	Tornillo Socket Allen M4X10	DIN 7984	8.8	
67	1	Brida 3		CK45	EMS-D12-A3
66	3	Tornillo Socket Allen M5X60	DIN 6912	8.8	
65	1	Caja Reductora-HFUC_14_30_2UH			Harmonic Drive
64	2	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X6	DIN 913	45H	
63	4	Tornillo Prisionero Socket Allen M3X4	DIN 913	45H	
62	1	Eje de Entrada 3		CK45	EMS-D10-A3
61	1	Acople Flexible de 10-6mm		Aluminum 7075	
60	1	Motor EC Flat			Maxon

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		ESCALA
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DESIGNO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN ESQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA	2:1
	SUB-ENSAMBLE DE LA MUÑECA	FECHA: 2020.10.15
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	PLANO: MSE-E06-A1



SECCIÓN A-A

CHAFLÁN 1x45°
REDONDEOS R1

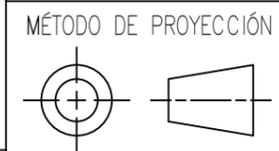
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

18H7	18,02	18,00
35H7	35,02	35,00
40d9	39,92	39,86
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3.2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
------------------------------------	--	------------------------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA



DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA

ESTRUCTURA DEL
HOMBRO A

ESCALA

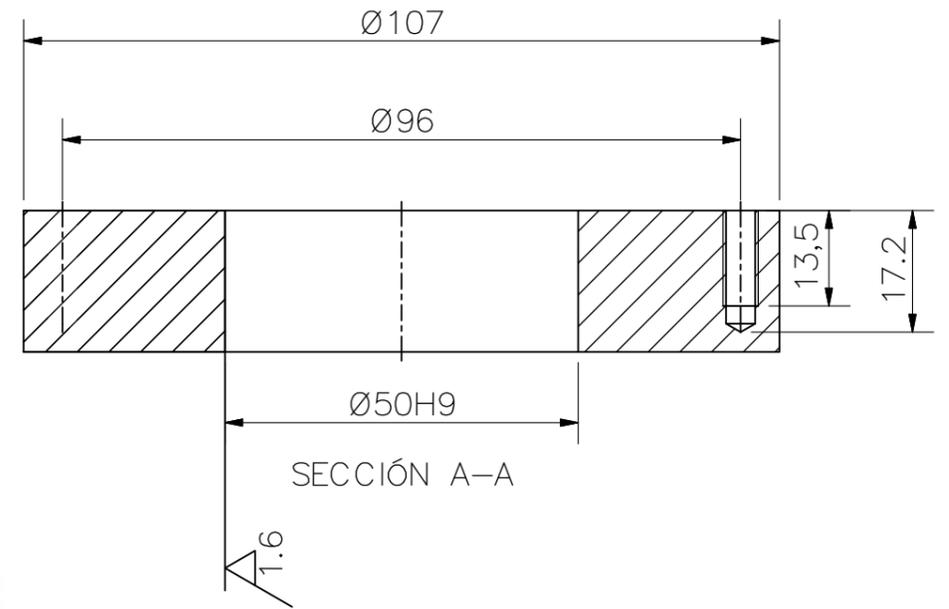
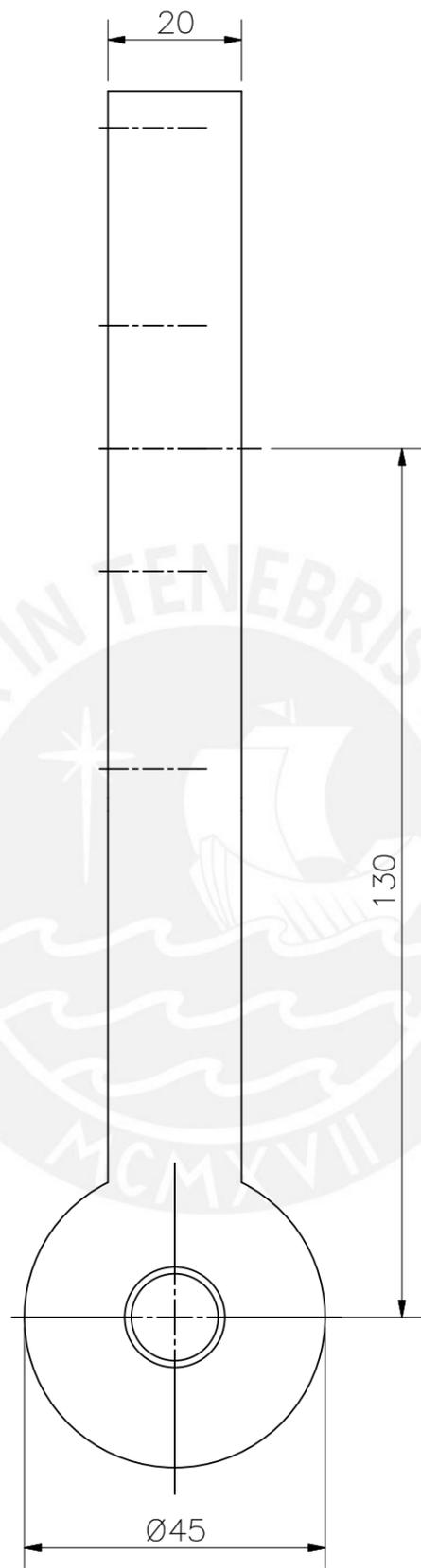
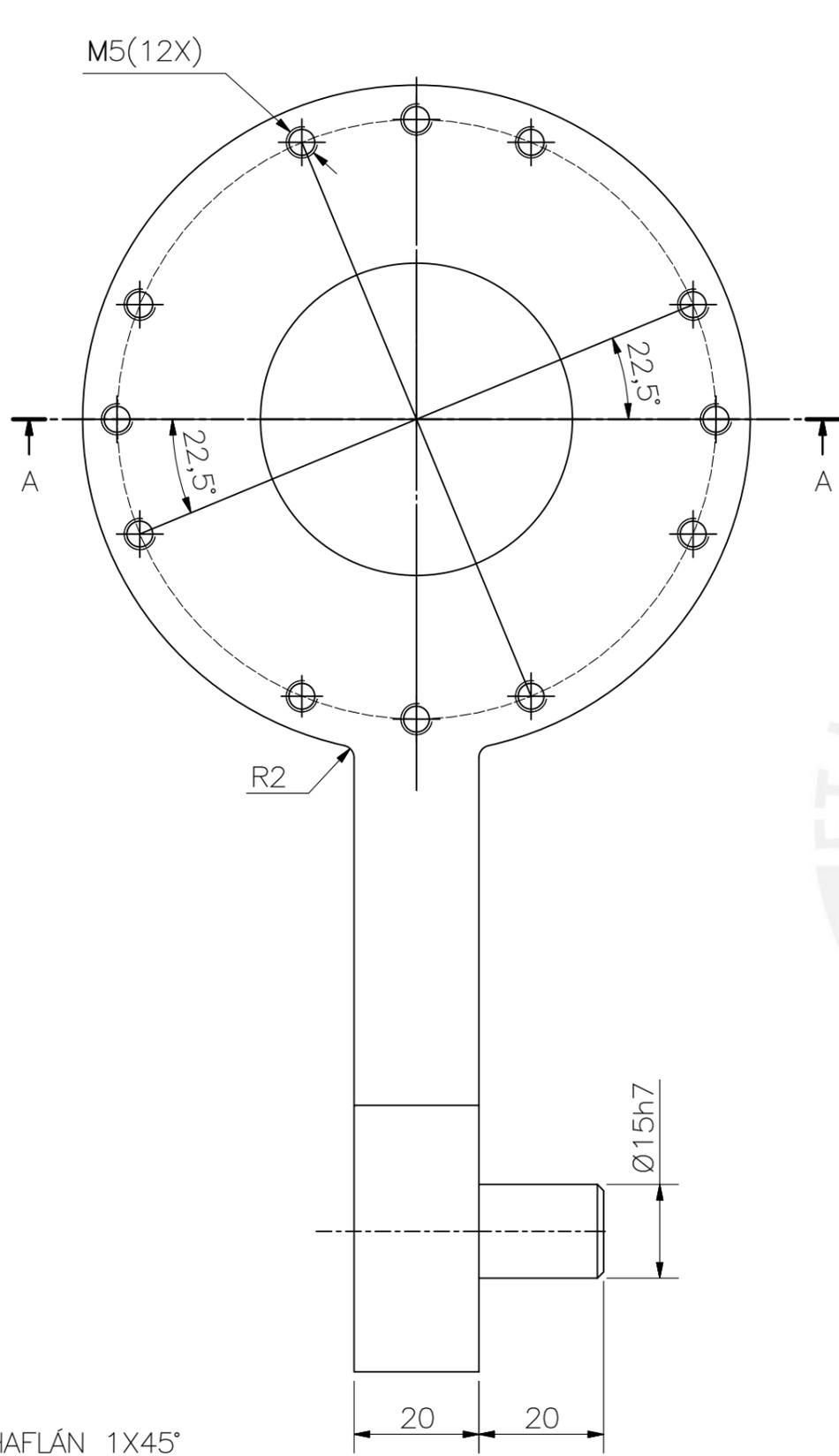
1:1

FECHA:
2020.10.15

20132019

PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL

PLANO:
MSE-D01-A3



CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R1

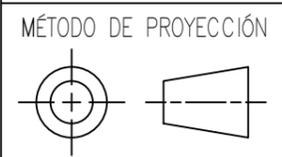
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

15h7	15,02	15,00
50H9	50,06	50,00
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3.2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
------------------------------------	--	------------------------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA



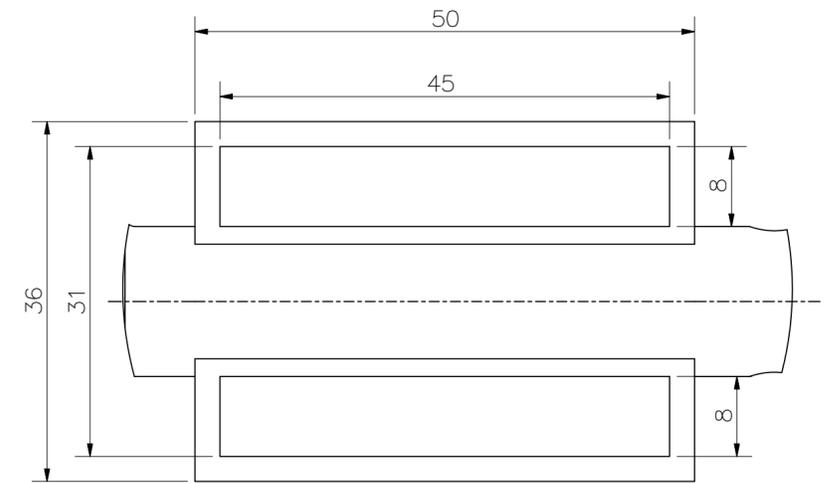
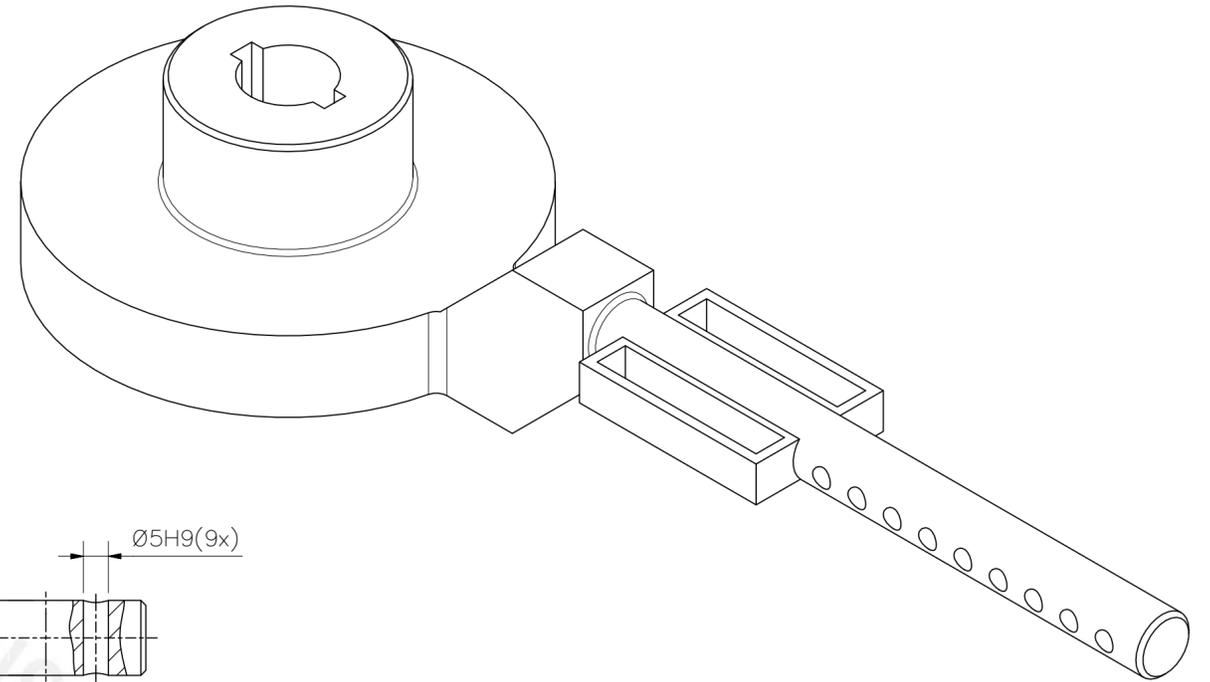
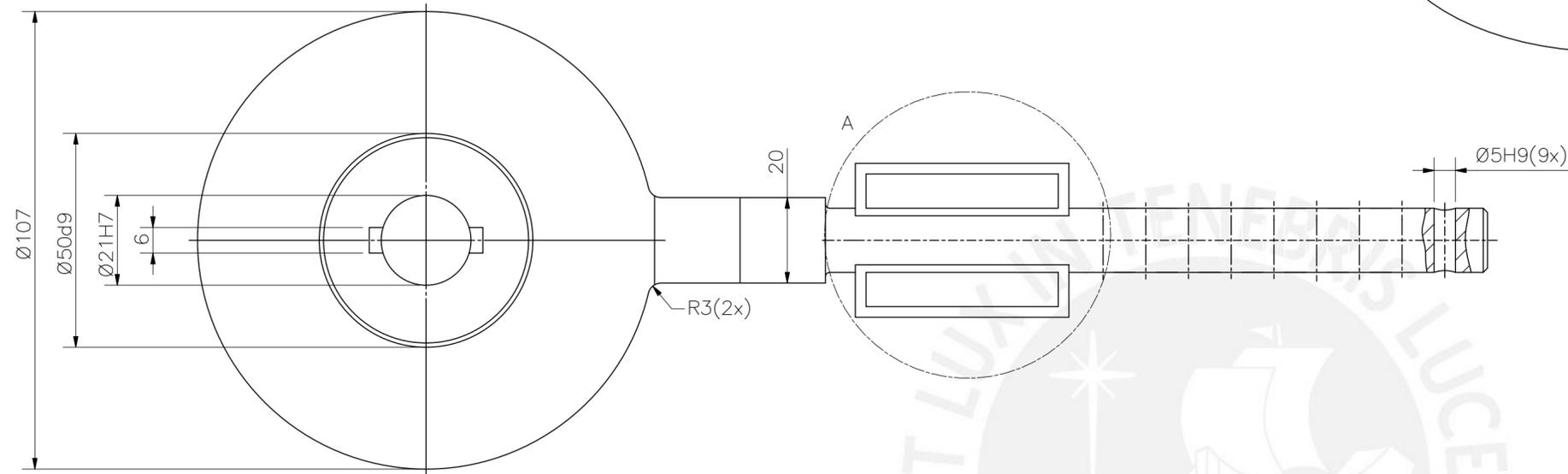
DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA

ESTRUCTURA DEL
HOMBRO B

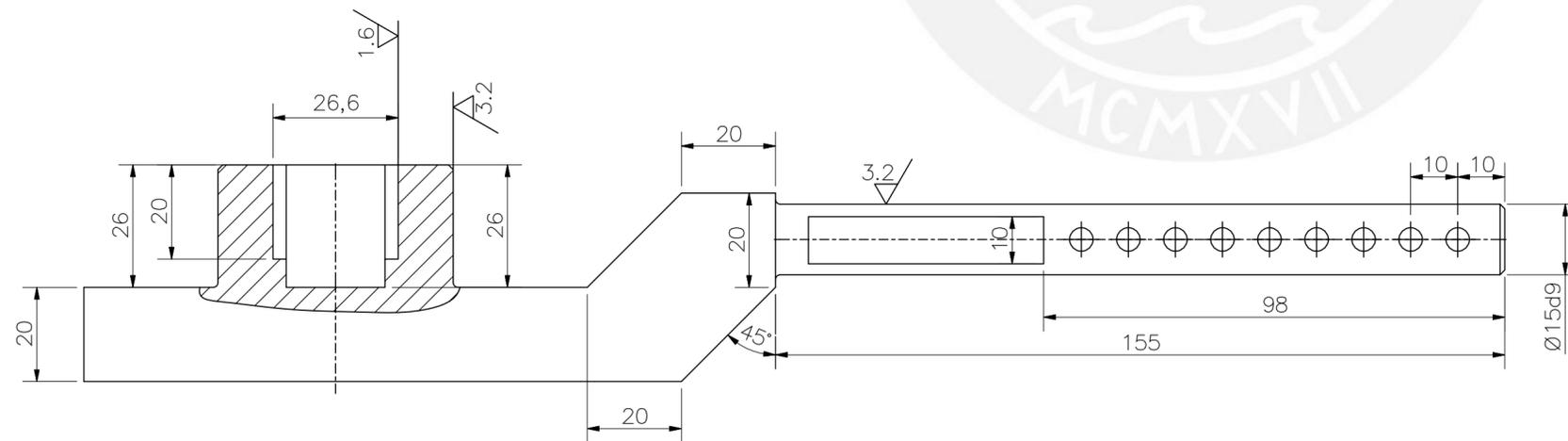
ESCALA 1:1
FECHA: 2020.10.15
PLANO: MSE-D02-A3

20132019

PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

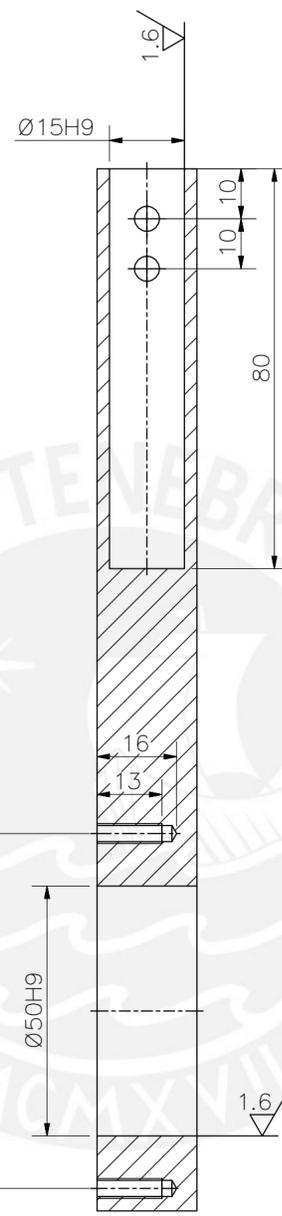
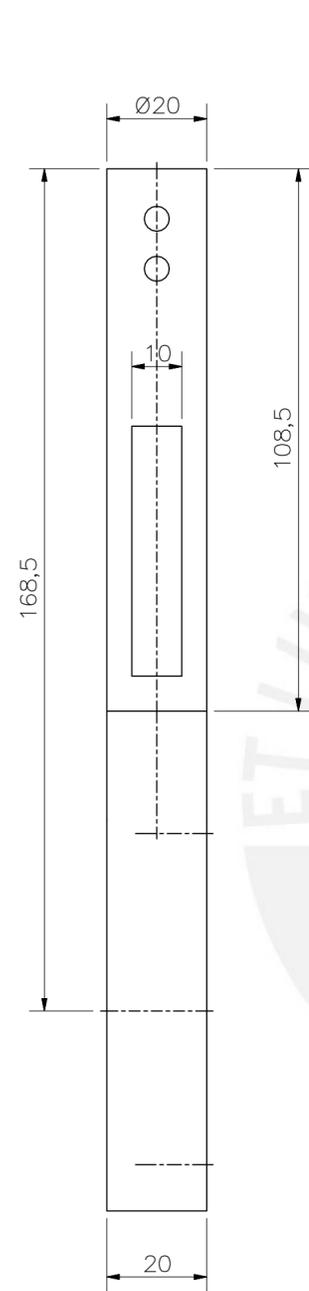
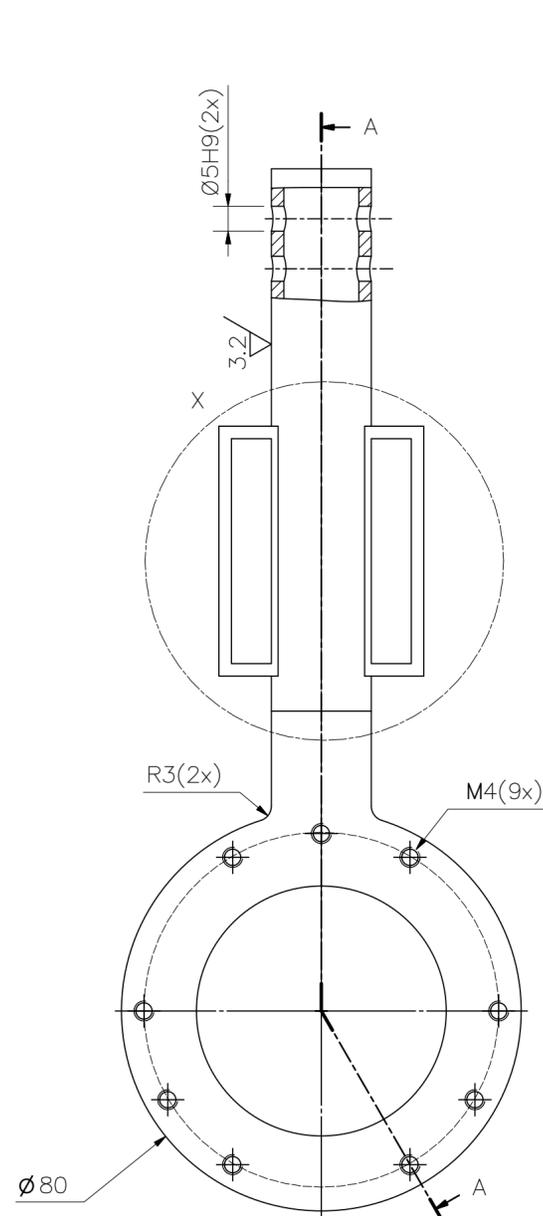


CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R1

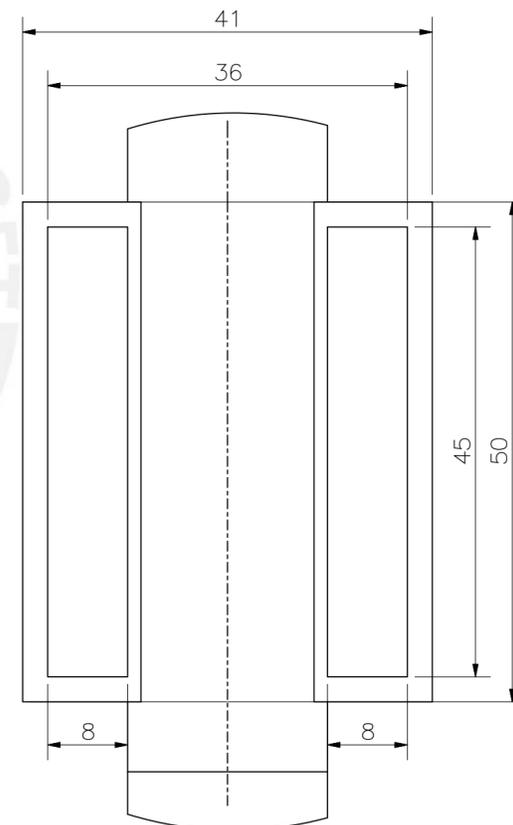
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

5H9	5,03	5,00
15d9	14,95	14,91
21H7	21,02	21,00
50d9	49,92	49,86
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

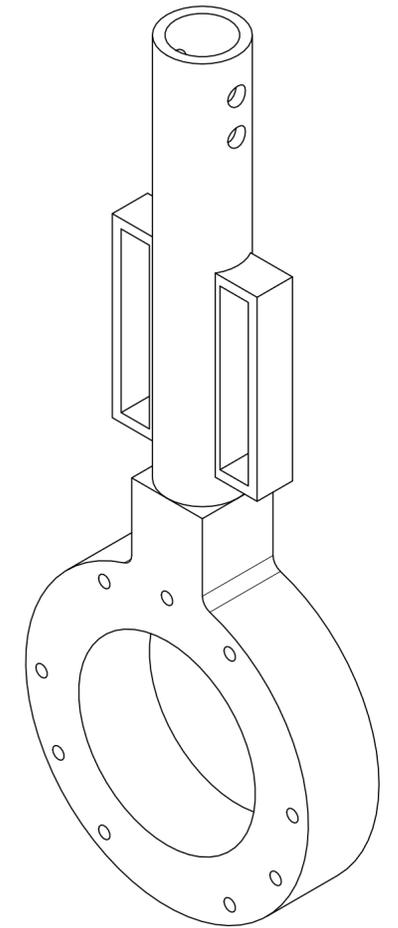
ACABADO SUPERFICIAL 6,4 (3,2, 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F. GRIS DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ESTRUCTURA DEL BRAZO A	ESCALA 1:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	FECHA: 2020.10.15 PLANO: MSE-D03-A2



SECCIÓN A-A



DETALLE X
ESCALA 2 : 1

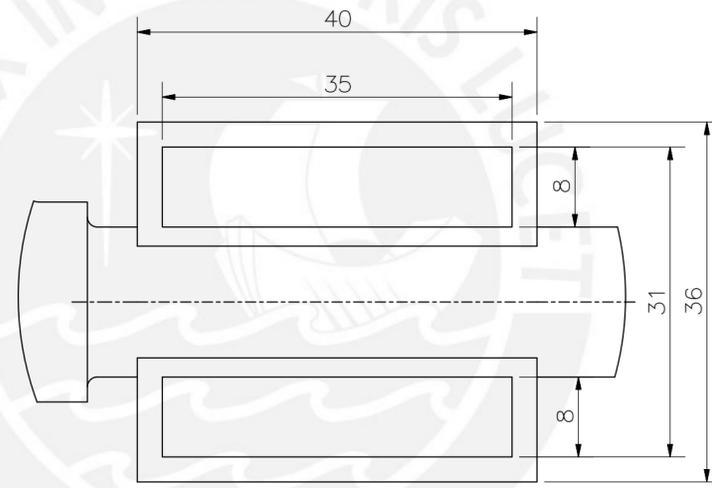
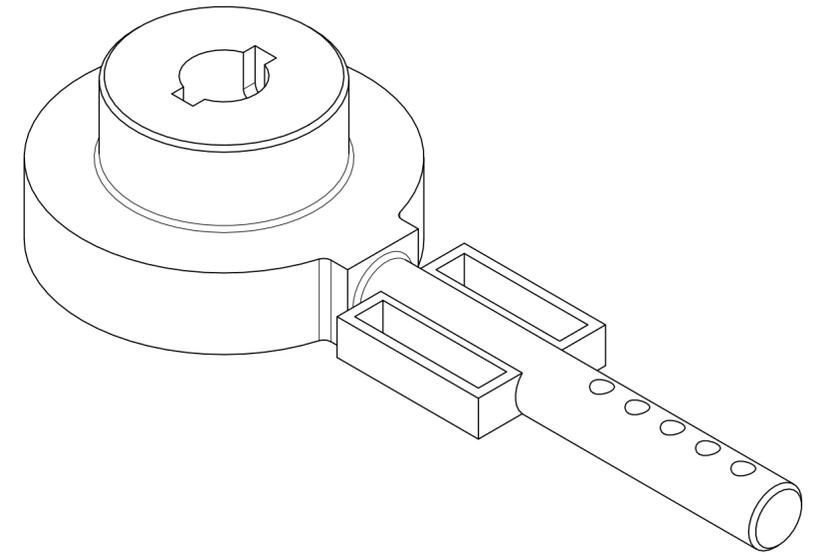
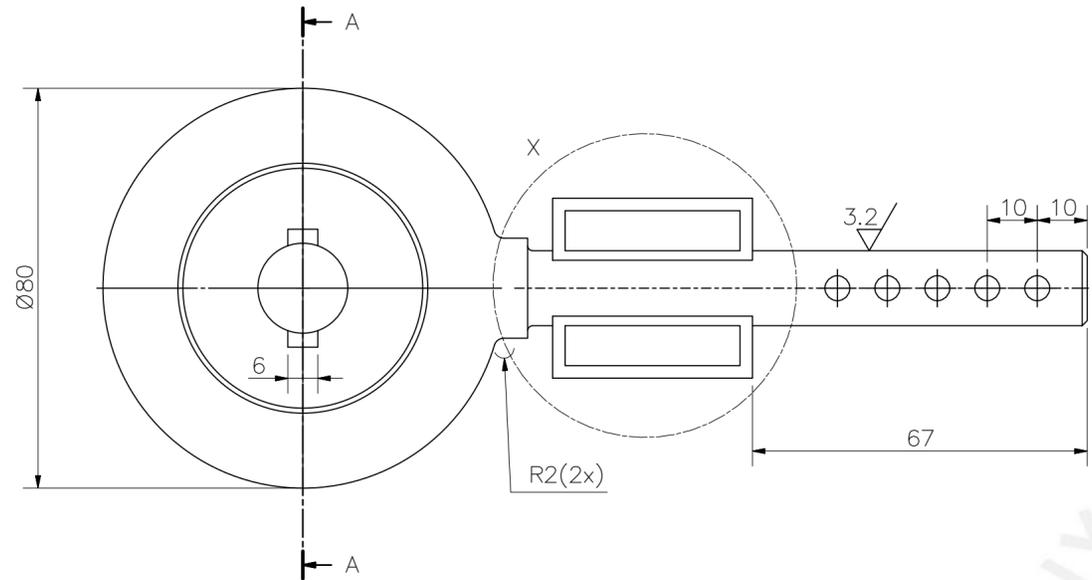


CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R1

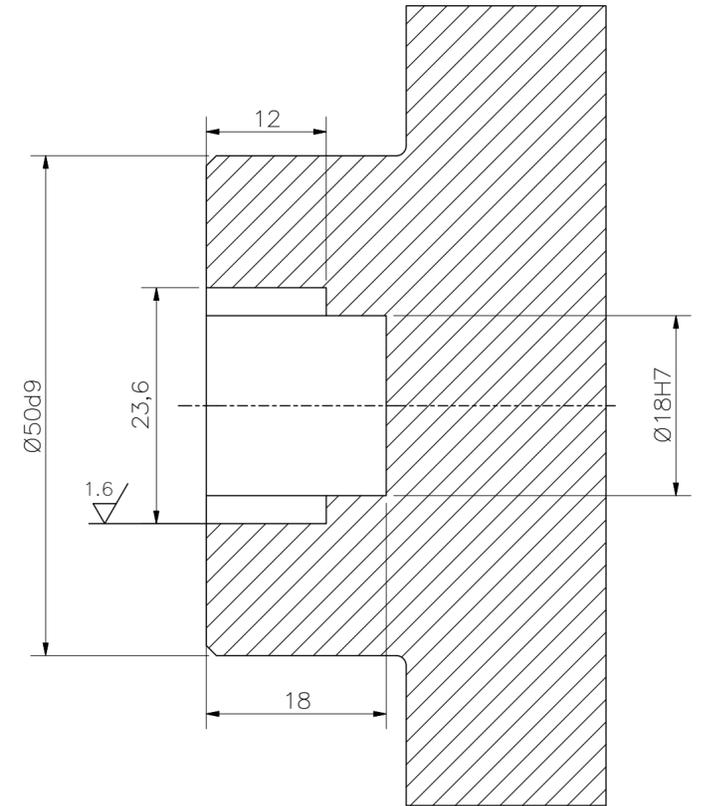
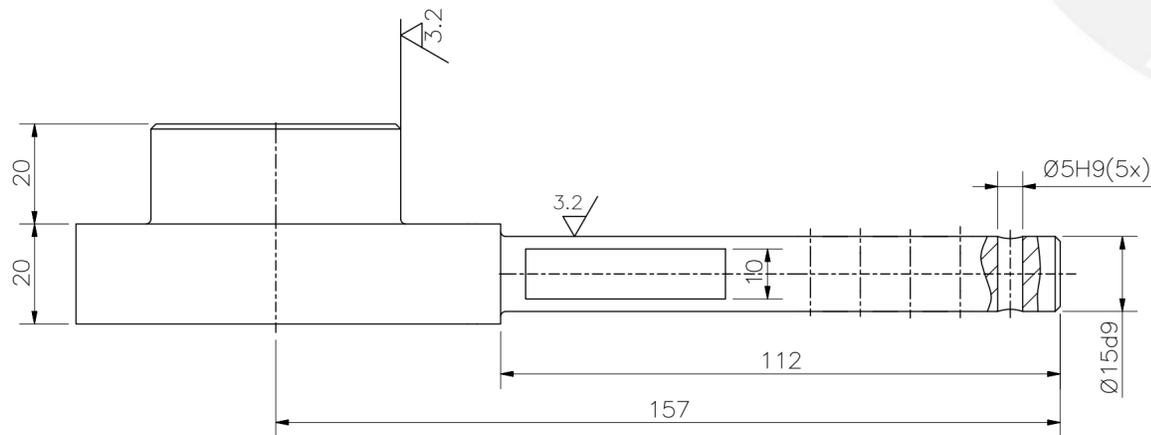
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

ACABADO SUPERFICIAL 6,4 / (3,2 / 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F. GRIS DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA	ESCALA 1:1
ESTRUCTURA DEL BRAZO B		FECHA: 2020.10.15
20132019		PLANO: MSE-D04-A2
PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL		

5H9	5,03	5,00
15H9	15,04	15,00
50H9	50,06	50,00
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



DETALLE X
ESCALA 2 : 1



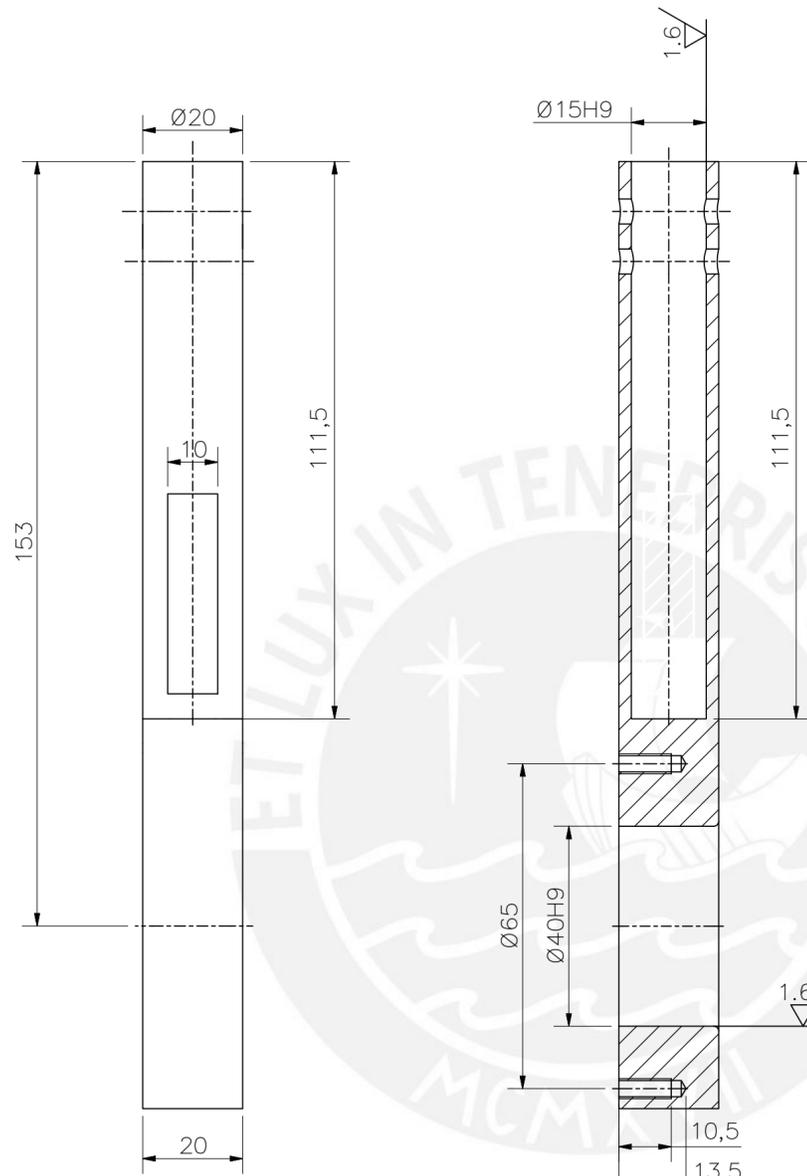
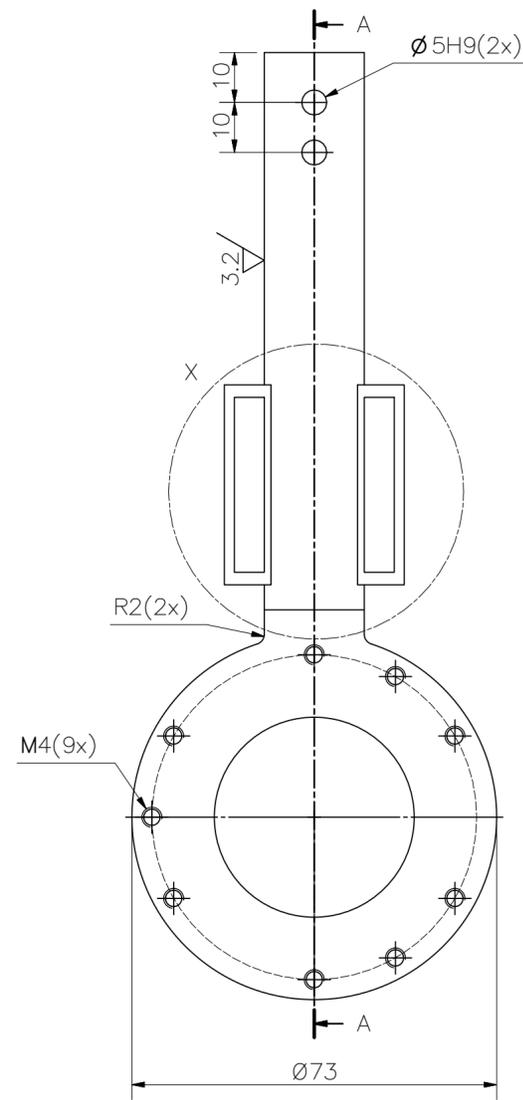
SECCIÓN A-A
ESCALA 2:1

CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R1

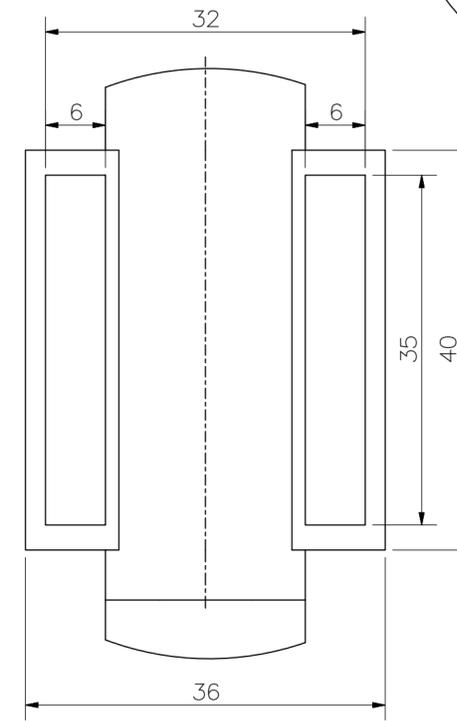
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

ACABADO SUPERFICIAL 6,4 / (3,2 / 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F. GRIS DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA <small>DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA</small>		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ESTRUCTURA DEL ANTEBRAZO A	ESCALA 1:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	FECHA: 2020.10.15 PLANO: MSE-D05-A2

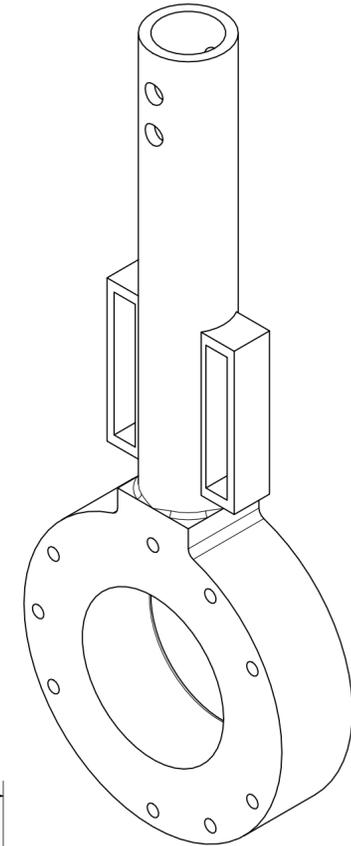
5H9	5,93	5,00
15d9	14,95	14,91
18H7	18,02	18,00
50d9	49,92	49,86
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



SECCIÓN A-A



DETALLE X
ESCALA 2 : 1

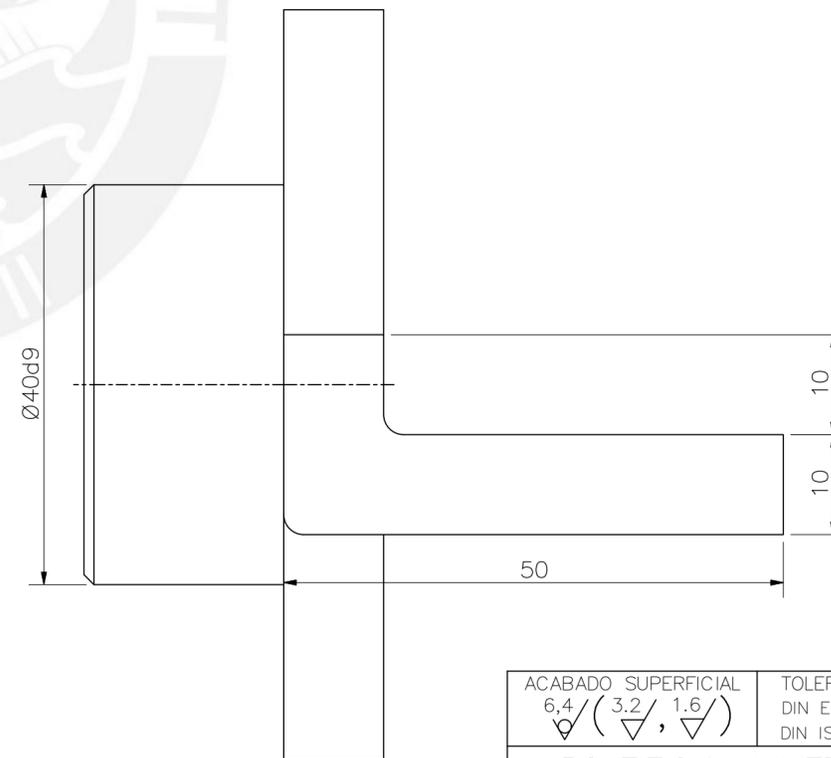
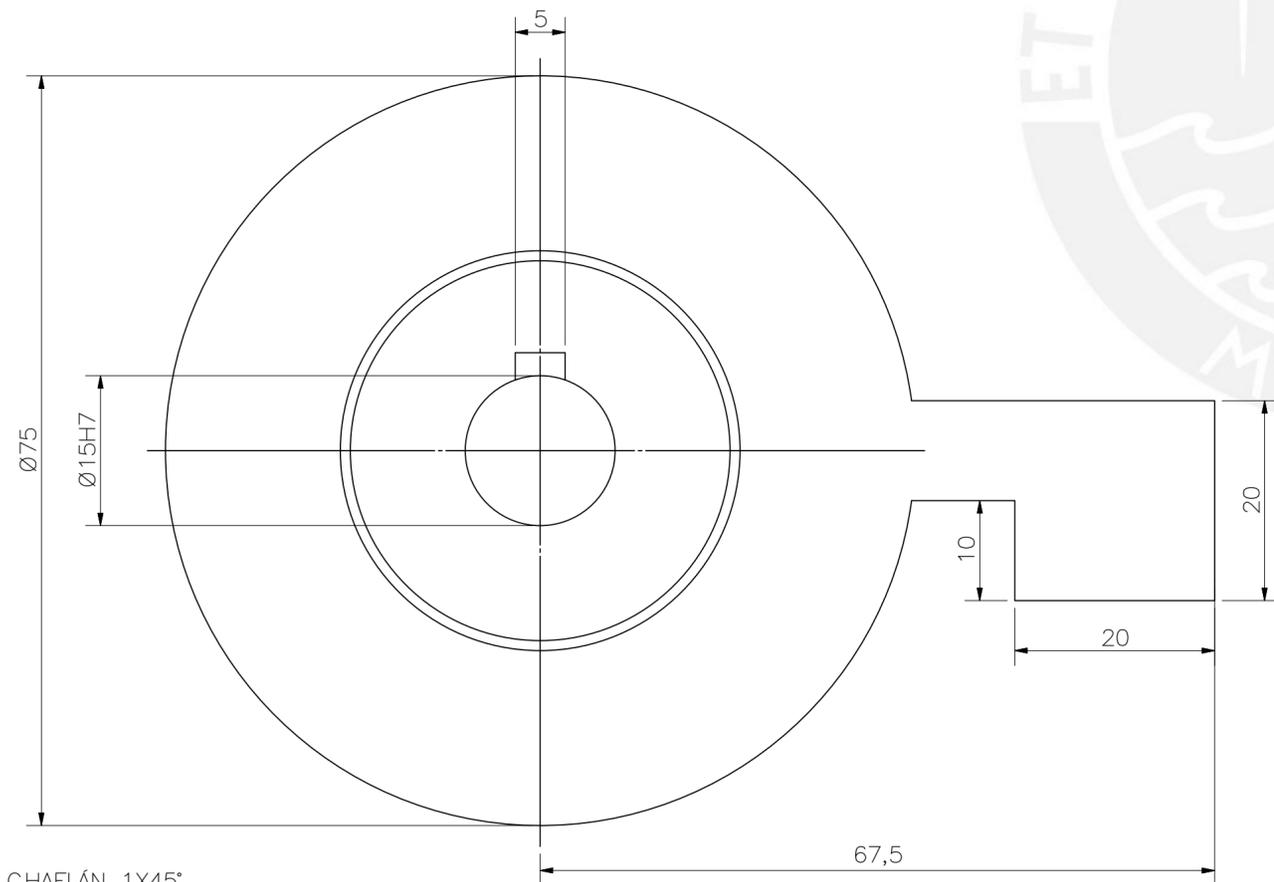
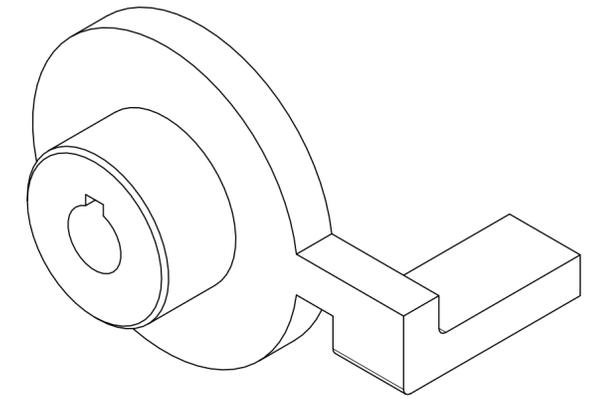
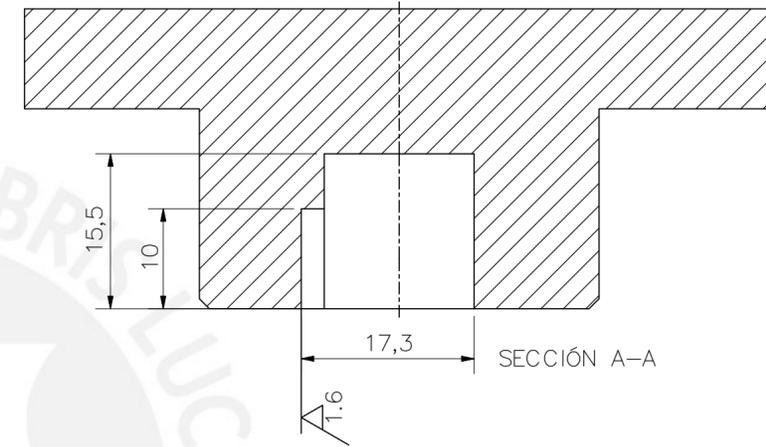
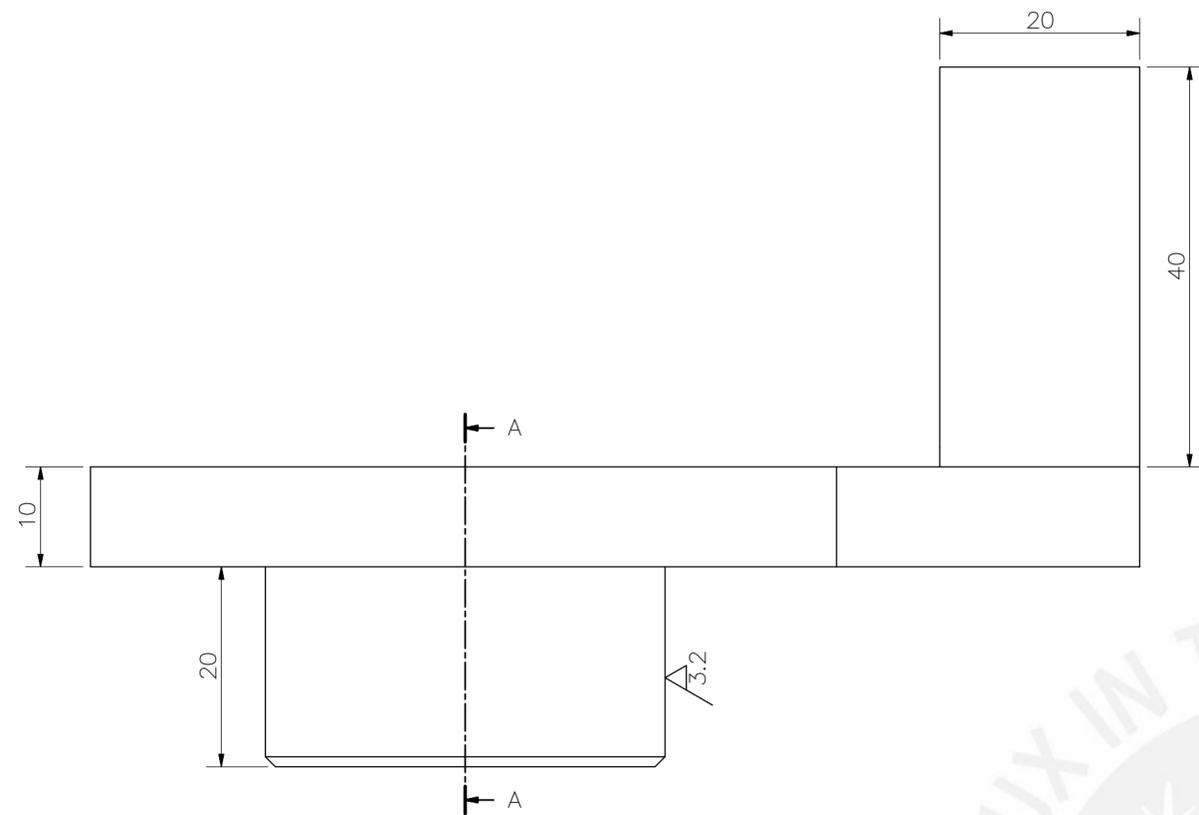


CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R1

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

5H9	5,03	5,00
15H9	15,04	15,00
40H9	40,06	40,00
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 6,4 (3,2 / 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F. GRIS DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA <small>DESIGNO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA</small>		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ESTRUCTURA DEL ANTEBRAZO B	ESCALA 1:1
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	FECHA: 2020.10.15 PLANO: MSE-D06-A2



CHAFLÁN 1X45°
REDONDEOS R2

ACABADO SUPERFICIAL 6,4 / (3,2, 1,6) √ (√, √)	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F. GRIS DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
---	--	------------------------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA



DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA
INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA

ESTRUCTURA DE LA
MUÑECA

ESCALA
1:1

FECHA:
2020.10.15

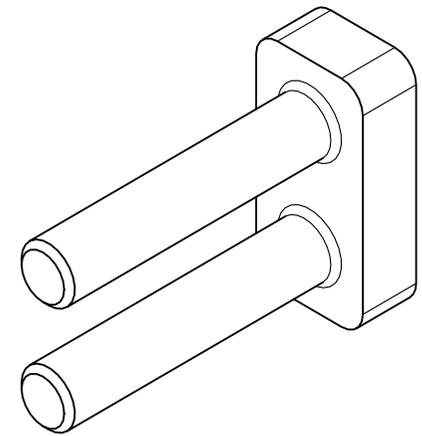
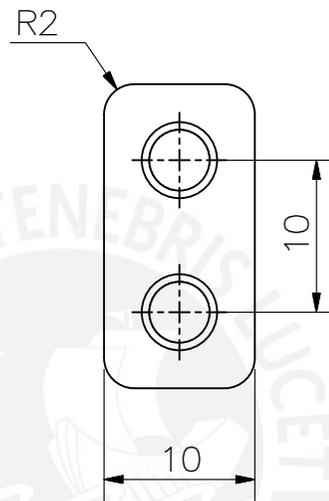
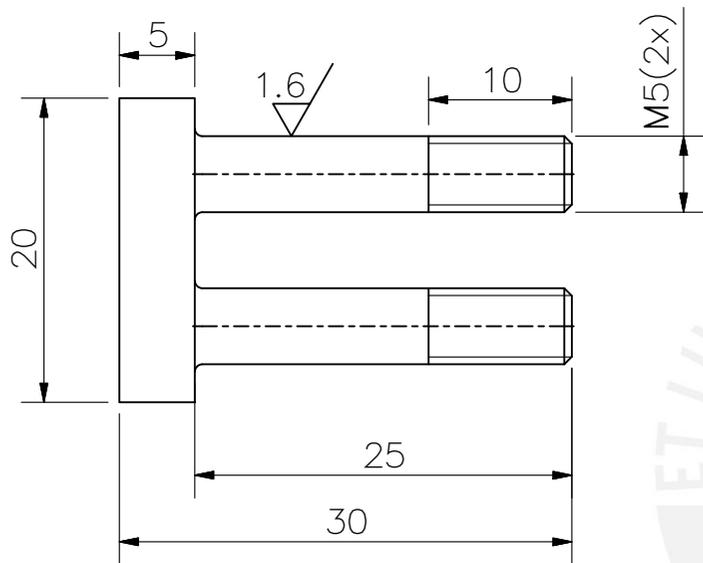
PLANO:
MSE-D07-A2

15H7	15,02	15,00
40d9	39,92	39,86
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

20132019

PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



CHAFLÁN 0,5X45°
REDONDEOS R0,5

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

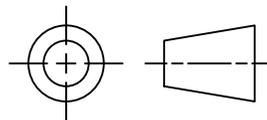
ACABADO SUPERFICIAL
3,2 / (1.6)

TOLERANCIA GENERAL
DIN ISO 2768-1
MECANIZADO MEDIO

MATERIAL
ALUMINIO 6061-T4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN



DISÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA
INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA

SEGURO DEL BRAZO A

ESCALA

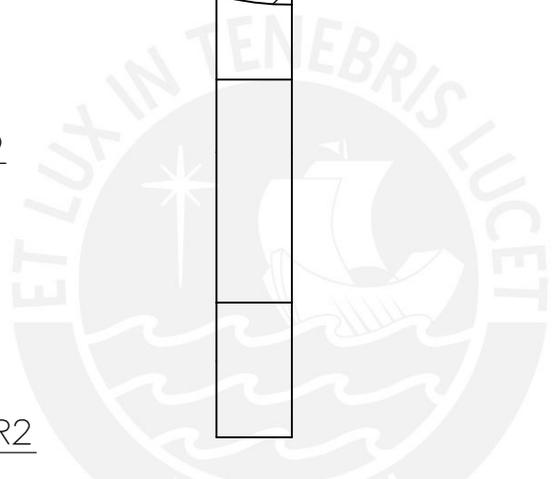
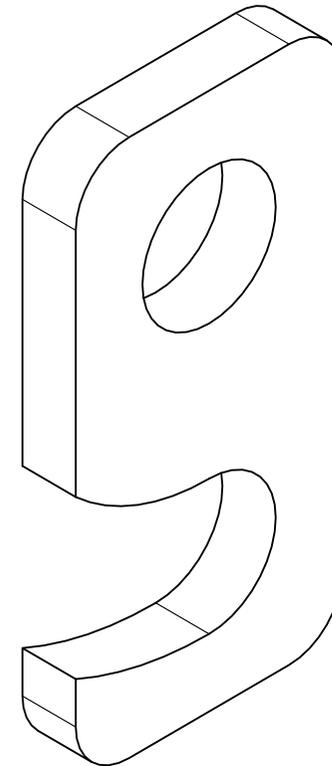
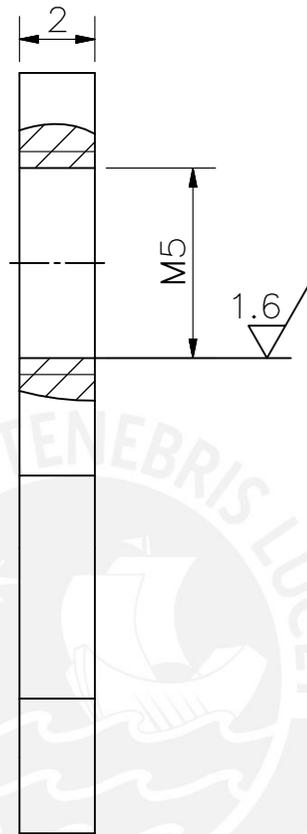
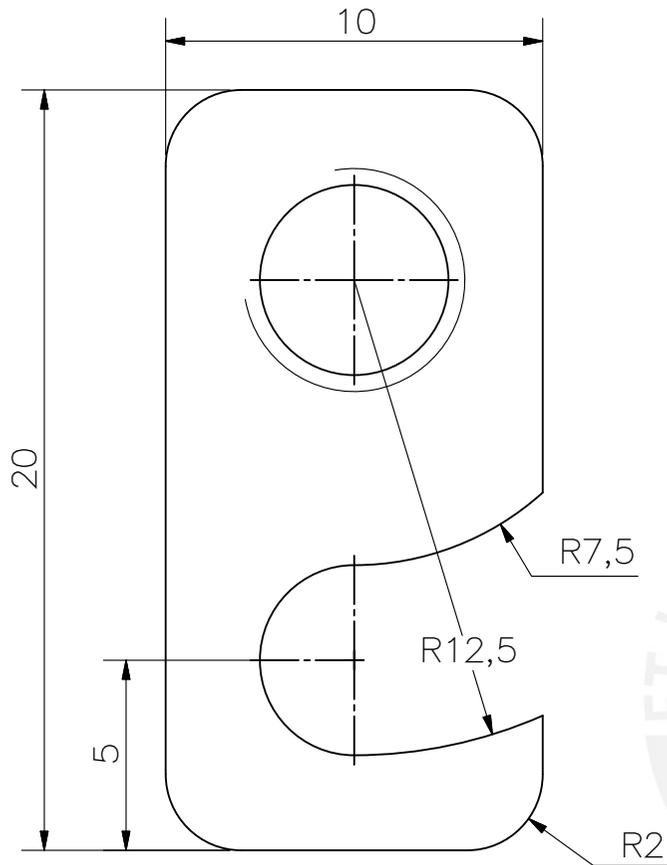
2:1

FECHA:
2020.10.15

20132019

PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL

PLANO:
MSE-D08-A4



ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061-T4
--------------------------------------	--	------------------------------

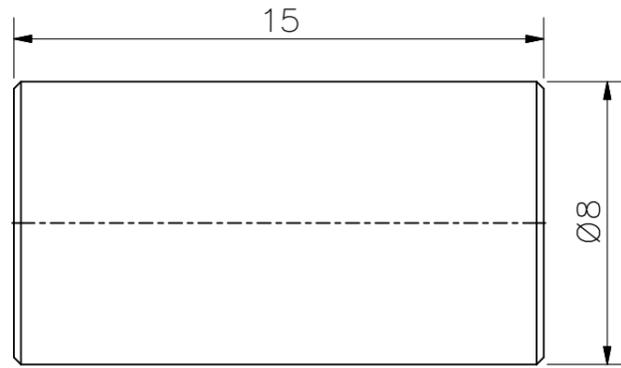
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	<p>DESIGNO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA</p> <p>SEGURO DEL BRAZO B</p>	ESCALA 5:1
		FECHA: 2020.10.15

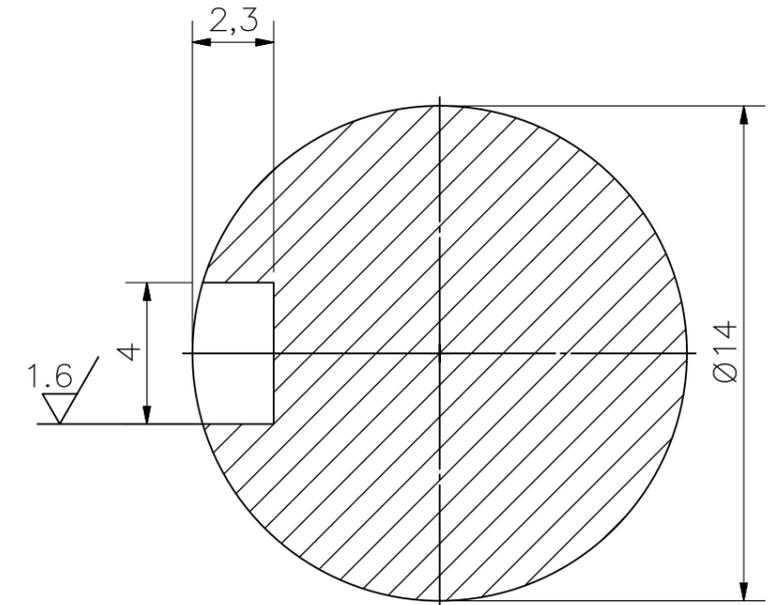
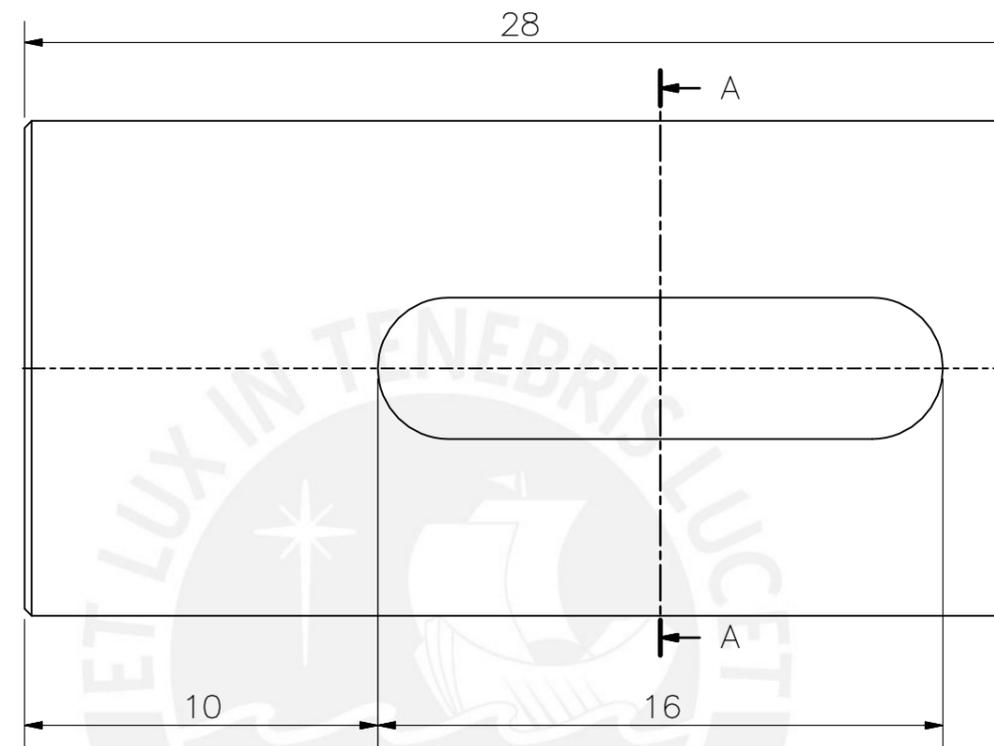
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	PLANO: MSE-D09-A4
----------	--------------------------	----------------------

NOMBRE: EJE DE ENTRADA 1
 POSICIÓN: 1
 CANTIDAD: 2
 ESCALA: 5:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2

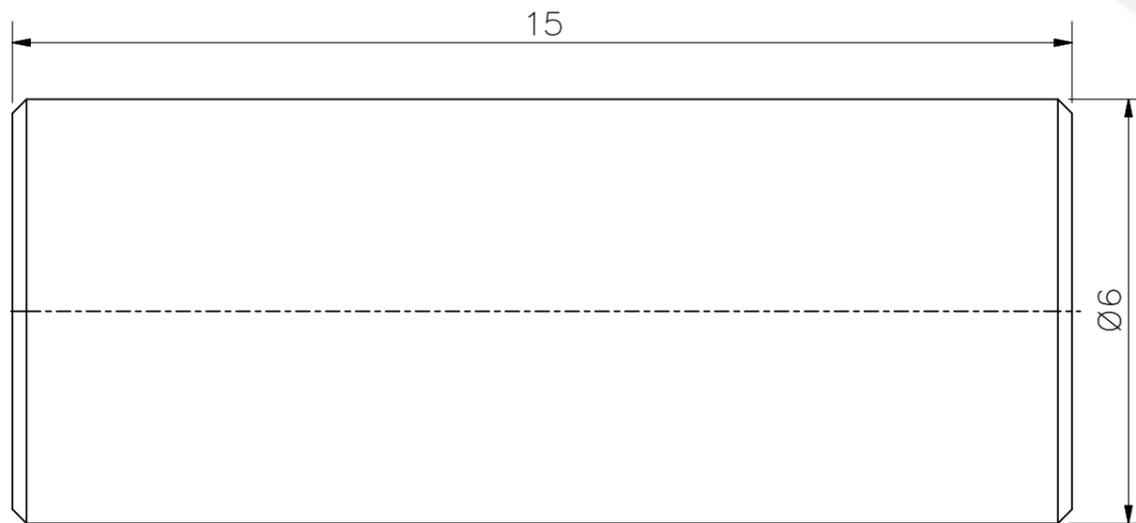


NOMBRE: EJE DE ENTRADA 2
 POSICIÓN: 2
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 5:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2



SECCIÓN A-A

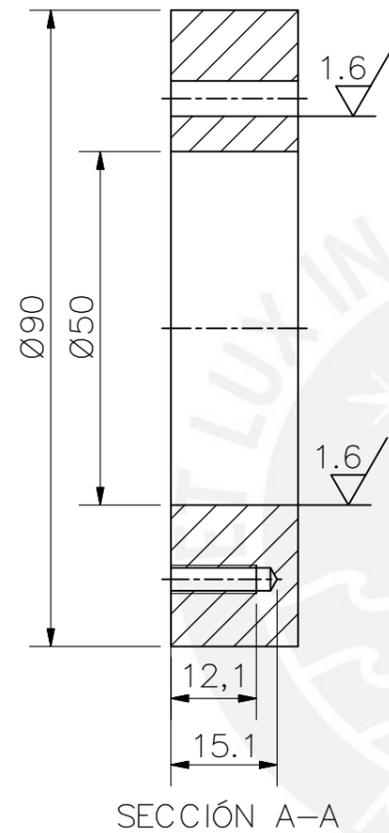
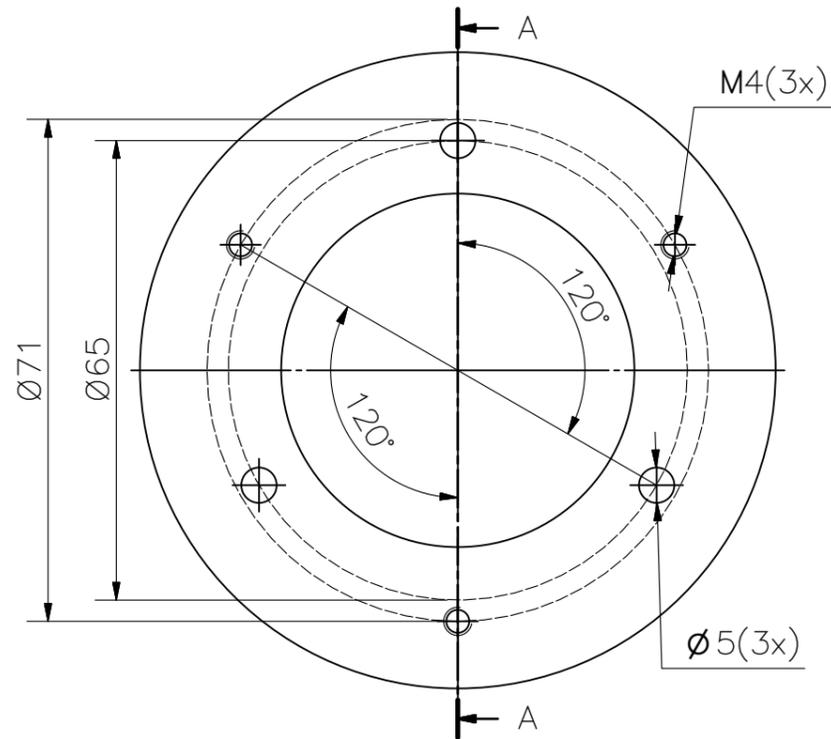
NOMBRE: EJE DE ENTRADA 3
 POSICIÓN: 3
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 10:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2



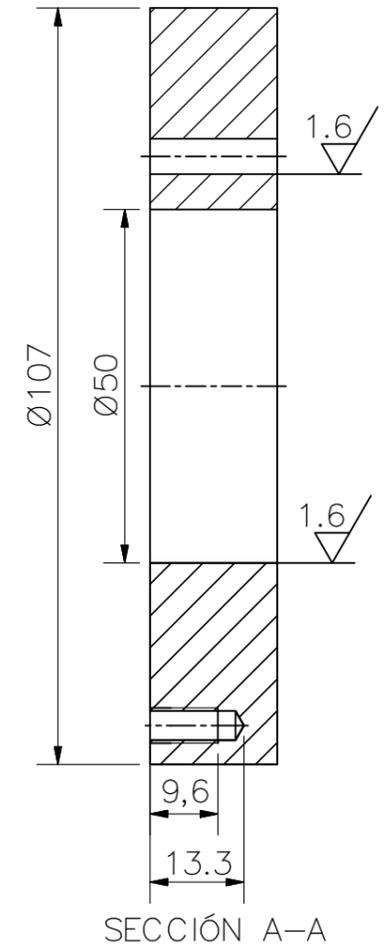
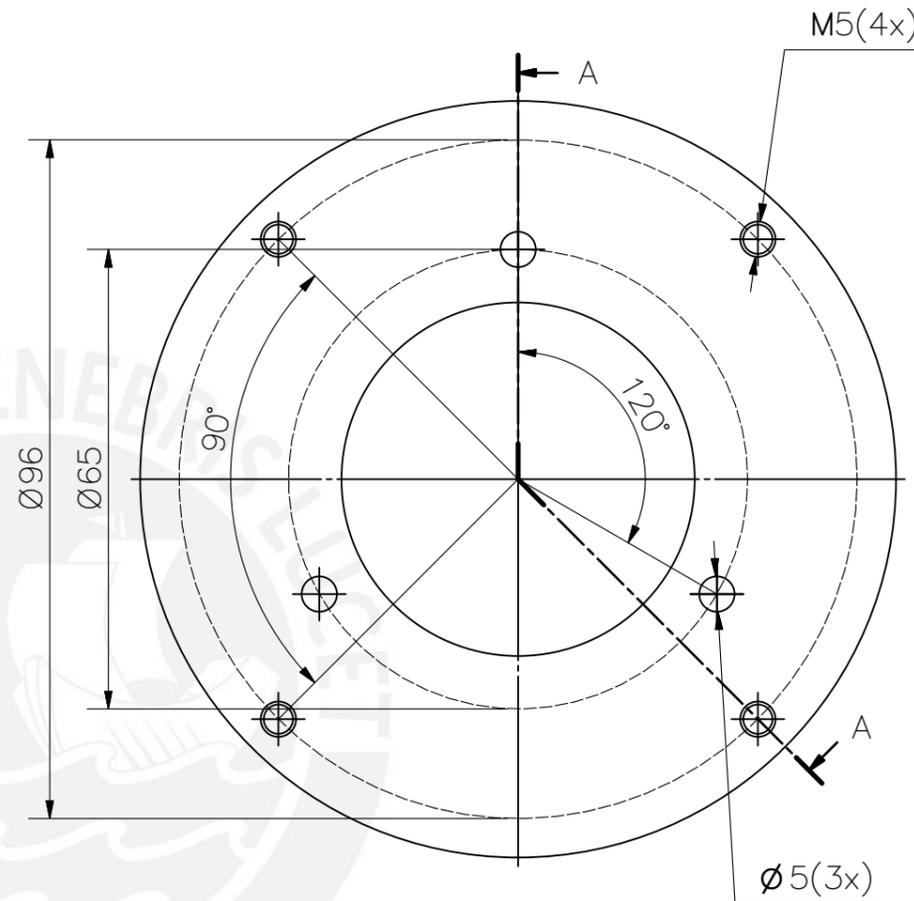
CHAFLÁN 0,2X45°

ACABADO SUPERFICIAL 3.2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN EN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL INDICADO
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA DESPIECE DE EJES	ESCALA INDICADA FECHA: 2020.10.15
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	PLANO: MSE-D10-A3

NOMBRE: ACOPLÉ DEL MOTOR 1
 POSICIÓN: 1
 CANTIDAD: 2
 ESCALA: 1:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2



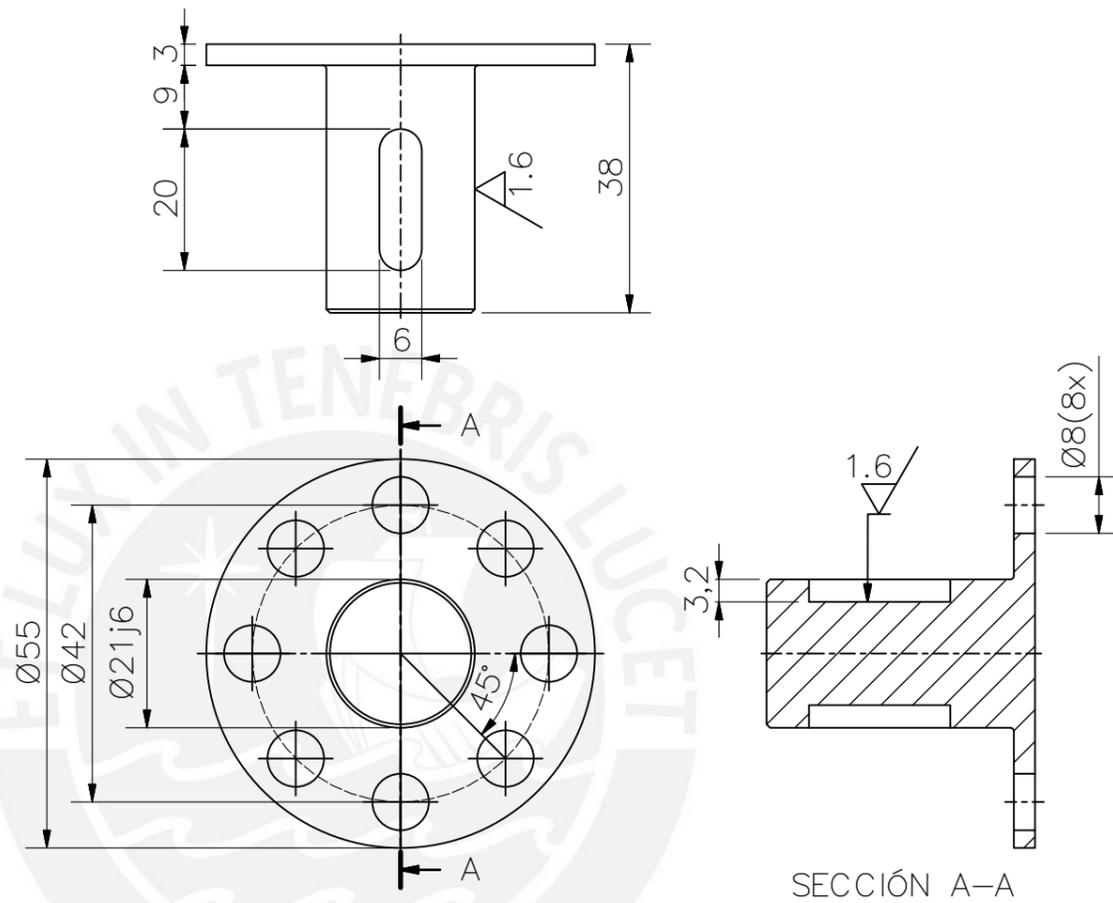
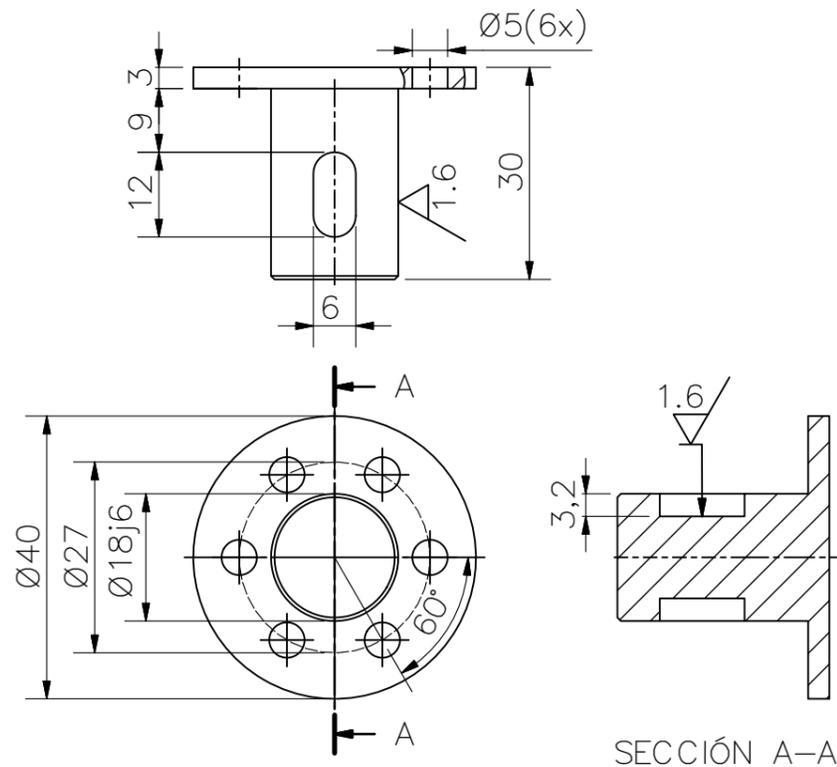
NOMBRE: ACOPLÉ DEL MOTOR 2
 POSICIÓN: 2
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 1:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2



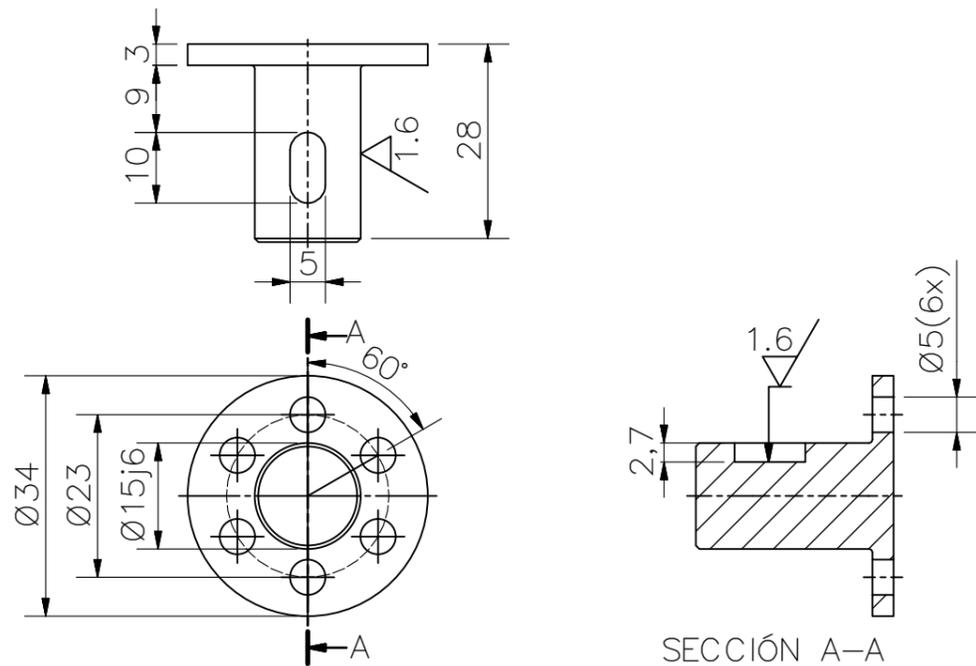
ACABADO SUPERFICIAL 3.2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN EN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL INDICADO
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA DESPIECE DE ACOPLÉS	ESCALA INDICADA FECHA: 2020.10.15
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	PLANO: MSE-D11-A3

NOMBRE: BRIDA 1
 POSICIÓN: 1
 CANTIDAD: 2
 ESCALA: 2:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2

NOMBRE: BRIDA 2
 POSICIÓN: 2
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 2:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2

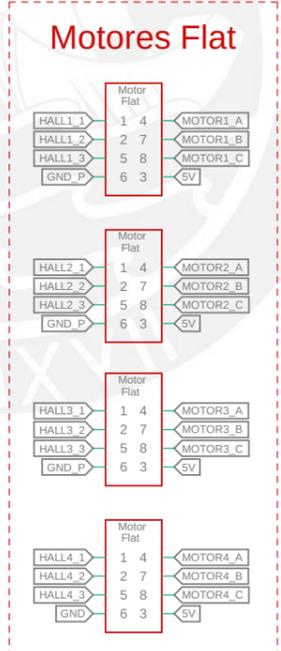
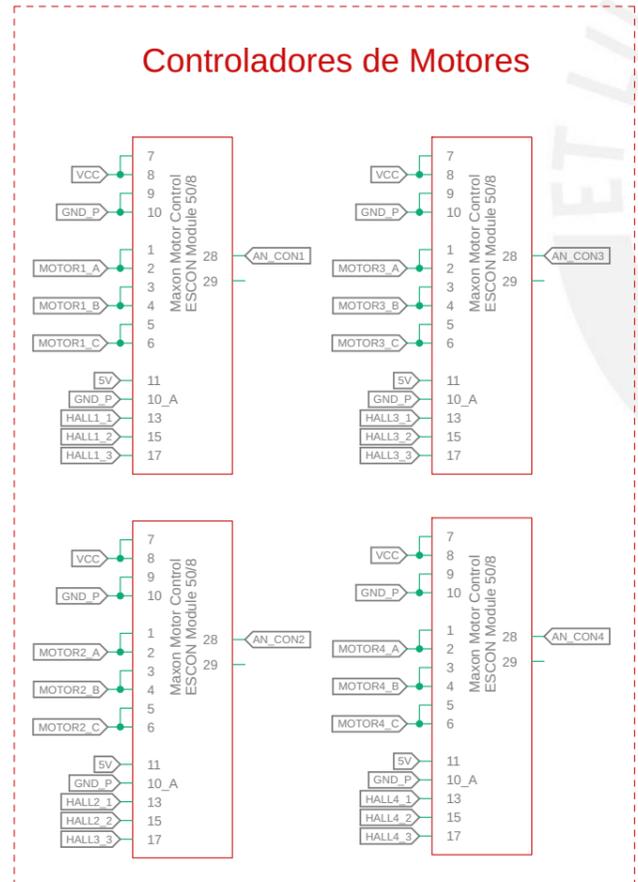
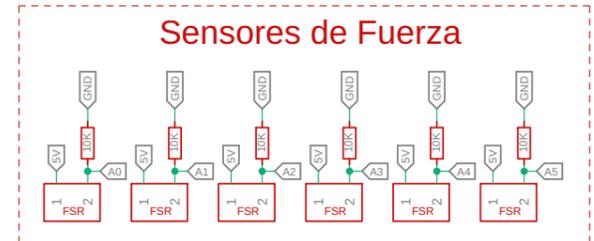
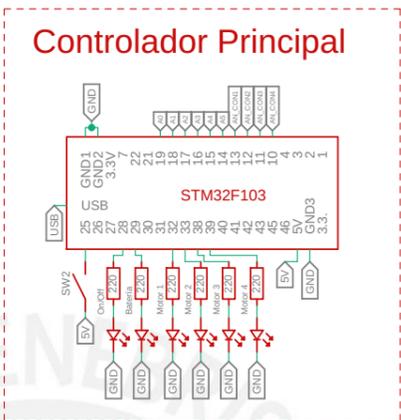
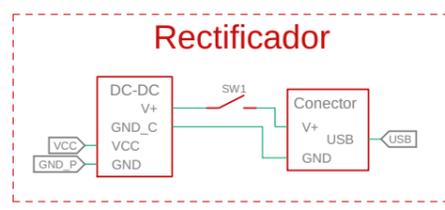


NOMBRE: BRIDA 3
 POSICIÓN: 3
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 2:1
 MATERIAL: CK45
 TOLERANCIA GENERAL: ± 0.2



ACABADO SUPERFICIAL 3.2 / (1.6)	TOLERANCIA GENERAL DIN EN ISO 2768-1 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL INDICADO
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA <small>DISEÑO DE LOS MIEMBROS SUPERIORES DE UN EXOSQUELETO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA PERSONA</small>		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DESPIECE DE BRIDAS	ESCALA INDICADA
		FECHA: 2020.10.15
20132019	PEÑA RIVERA, JOSÉ MIGUEL	PLANO: MSE-D12-A3

21j6	21,01	21,00
18j6	18,01	18,00
15j6	15,01	15,00
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



6	Resistencia 10K ohm		A6,7,8
6	Resistencia 220 ohm		B5
6	Diodo Led	Pololu	B5
6	FSR	Pololu	A6,7,8-B6,7,8
4	Motor EC - Flat	Maxon	C5-D5-E5
4	Maxon Motor Control ESCON Module 50/8	Maxon	C2,3-D2,3-E2,3
1	STM32F103C8T6	Mauser	A5-B5
1	Conector USB		A2,3
1	Rectificador DC-DC		A2,3,4
1	Fuente Switching 18V		A1
Cantidad	Componente	Fabricante	Ubicación
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: MECATRÓNICA			
MIEMBROS SUPERIORES DEL EXOSQUELETO SISTEMA ELECTRÓNICO			ESCALA: 1:1
DISEÑADO:	JOSE MIGUEL PEÑA RIVERA	FECHA: 25.08.2020	
APROBADO:	PENDIENTE	LÁMINA: MSE-ELE01-A3	