



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Diseño de un exoesqueleto de extremidades superiores para
aumentar el límite de carga de levante para los operarios de la
empresa ETRAL SAC**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

AUTORES:

Castañeda Gonzales Diego Alonso (ORCID: 0000-0001-8596-1211)

Guerra Guerra Jorge Alejandro (ORCID: 0000-0003-4138-3979)

ASESOR:

Dr. Jorge Antonio Olortegui Yume PhD. (ORCID: 0000-0001-5734-040X)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Modelamiento y Simulación De Sistemas Electromecánicos

TRUJILLO – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de mi trayectoria estudiantil durante la universidad y para todas aquellas mentes con deseo de innovación y superación que desean ver el mundo desde la ciencia y la investigación.

Guerra, Jorge Alejandro

Este trabajo de investigación está dedicado para todas las personas que depositaros su confianza en mí, especialmente para Enma Edith Carranza Pesantes y Odar Enrique Gonzales Gutierrez que fue base fundamental para la edificación de mi crecimiento profesional y personal; asimismo está dedicada a todos los estudiantes, sirviendo así este trabajo como portal al diseño de nuevas tecnologías.

Castañeda Gonzales, Diego Alonso

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a aquellas personas que me acompañaron y sirvieron de aliento a lo largo de la carrera universitaria, entre ellos: mis padres, Jorge Castañeda y Alicia Gonzales, hermana y amiga incomparable, Alexa Castañeda, familiares, compañeros, docentes y amigos; así mismo un agradecimiento especial a Milenna Fujimoto, Gilda González, y a mi compañero de tesis, aula y amigo Jorge Guerra.

Castañeda Gonzales, Diego Alonso

Agradezco a mi madre Teresa Vargas y a mi padre César Cárdenas ya que ellos fueron la base y el apoyo durante todo este periodo y a lo largo de mi vida. Un agradecimiento a los maestros que guiaron el camino para mi crecimiento académico. A Ellen Julie Chávez Rodríguez por ser mi motor y motivación durante este proceso. A mis Amigos Anderson Oviedo, Peña Sánchez, Brian Neyra, Diego Bustamante, Gary Quiliche y Cristhian Solís por mantener la confianza y el apoyo en mi persona. Al ingeniero Pedro Paredes y a mi compañero de tesis y amigo de vida Diego Alonso Castañeda Gonzales por aquellas horas de trabajo invertidas para el desarrollo de esta investigación.

Guerra Guerra, Jorge Alejandro

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III. METODOLOGÍA	15
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	15
3.2. Variables y operacionalización	15
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis	15
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.5. Procedimientos	16
3.6. Método de análisis de datos	18
3.7. Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS.....	19
4.1. Necesidades de la empresa:	19
4.2. Normativa y/o recomendaciones de diseño para exoesqueletos.	23
4.2.1. Recomendaciones de diseño.....	25
4.3. Especificaciones de ingeniería	25
4.4. Diseño Conceptual:.....	27
Concepto de diseño 01: Exoesqueleto articulado.....	27
Concepto de diseño 02: Exoesqueleto de acción hidráulico.....	28
Concepto de diseño 03: Exoesqueleto de acción Neumático.....	29
Concepto de diseño 04: Exoesqueleto de acción Eléctrico	30
4.4.1. Selección del concepto de diseño:.....	31
4.5. Diseño de Configuración:.....	33
Configuración “A”:	33
Configuración “B”	34
Configuración “C”:.....	35
4.5.1. Selección del concepto de diseño:.....	36
4.6. Análisis paramétrico.....	38

4.6.1.	Torque en la articulación del hombro:.....	41
4.6.2.	Torque en la articulación del Codo:	42
4.6.3.	Análisis paramétrico de articulación A:	44
4.6.1.	Análisis paramétrico de articulación B:	46
4.7.	Análisis cinemático y dinámico del exoesqueleto	51
4.8.	Modelado y simulación estructural del exoesqueleto	57
4.9.	Diseño del sistema de Control	60
4.10.	Selección de componentes	63
4.10.1.	Motores.....	63
4.10.2.	Caja reductora	63
4.10.3.	Drivers de potencia.....	65
4.10.4.	Material de la estructura	66
4.10.4.1	Planchas de aluminio	66
4.10.4.2	Fibra de Kevlar	67
4.10.4.1	Fibra de carbono.	68
4.11.	Elaborar los planos y el presupuesto total del equipo.	70
4.11.1.1	Diseño de Detalle	70
4.11.2.	Presupuesto Total	70
V.	DISCUSIÓN.....	74
VI.	CONCLUSIONES	78
VII.	RECOMENDACIÓN.....	80
	REFERENCIAS	81
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	16
Tabla 2	21
Tabla 3 (Continuación)	22
Tabla 4	26
Tabla 5	26
Tabla 6	32
Tabla 7	37
Tabla 8	38
Tabla 9	40
Tabla 10	52
Tabla 11	53
Tabla 12	69
Tabla 13	70
Tabla 14	71
Tabla 15	71
Tabla 16	71
Tabla 17	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS

Figura 1	9
Figura 2	10
Figura 3	10
Figura 4	11
Figura 5	12
Figura 6	12
Figura 7	13
Figura 8	14
Figura 9	28
Figura 10	29
Figura 11	30
Figura 12	31
Figura 13	34
Figura 14	35
Figura 15	36
Figura 16	41
Figura 17	43
Figura 18	44
Figura 19	45
Figura 20	47
Figura 21	48
Figura 22	48
Figura 23	50
Figura 24	51
Figura 25	52
Figura 26	53
Figura 27	54
Figura 28	55
Figura 29	56
Figura 30	56
Figura 31	57
Figura 32	58
Figura 33	58
Figura 34	59
Figura 35	59
Figura 36	61
Figura 37	62
Figura 38	62
Figura 39	63
Figura 40	65
Figura 41	66
Figura 42	67
Figura 43	67
Figura 43	68

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño de un exoesqueleto para asistencia de miembros superiores durante la manipulación de carga y descarga de elementos pesados con el objetivo de disminuir las lesiones originadas por la actividad continua de tales trabajos. En la Libertad existen diversas empresas del rubro metalmecánica, donde la fabricación requiere que los operarios hagan el desplazamiento de materiales pesados diariamente, lo cual es exigente para los músculos de los operarios. Es así que, en este trabajo se plantea realizar un dispositivo de ayuda para los operarios de la industria metalmecánica.

La metodología tomada para este trabajo se basa en el trabajo de Eggert (Eggert, 2001), Dieter y Schmidt (Dieter, G. y Schmidt, L., 2007) la cual inicio con la recopilación de la información de los tipos de carga de levante presentes el rubro metalmecánico, posteriormente se obtuvieron la lista de especificaciones de ingeniería y se elaboraron varios conceptos de solución y de configuración, los cuales mediante una matriz de pesos ponderados se determinó la mejor opción. Obtenido el concepto ganador se realizaron los cálculos de ingeniería pertinentes y el modelado en 3D, los cuales finalizaron en los planos del diseño.

El diseño obtenido se basa en un sistema de 8 GDL para cada brazo permitiendo al operario manipular cargar de hasta 25 kg de manera continua con la característica de tener actuadores eléctricos del tipo motores stepper, un diseño geométrico capaz de soportar las cargas con un factor de seguridad de 2.0 permitiendo así cumplir con la característica esencial de un diseño seguro y confiable.

Palabras Clave: Diseño, Exoesqueleto, carga de levante

ABSTRACT

In the present work, the design of an exoskeleton to assist the upper limbs during the handling of loading and unloading of heavy elements was carried out with the aim of reducing injuries caused by the continuous activity of such work. In La Libertad there are several companies in the metalworking industry, where manufacturing requires operators to move heavy materials on a daily basis, which is demanding on the muscles of the operators. Thus, in this work it is proposed to make an aid device for workers in the metalworking industry.

The methodology used for this work is based on the work of Eggert (Eggert, 2001), Dieter and Schmidt (Dieter, G. and Schmidt, L., 2007) which began with the collection of information on the types of loads of levant presents the metalworking category, later the list of engineering specifications was obtained and several solution concepts were elaborated, which by means of a weighted weight matrix the best option was determined. Once the winning concept was obtained, the pertinent engineering calculations and 3D modeling were carried out, which were finalized in the design drawings.

The design obtained is based on the 8 DOF system for each arm allowing the operator to handle loads of up to 25 kg continuously.

Keywords: Design, exoskeleton, lifting load

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo, las principales áreas donde se han tenido los mayores avances en el desarrollo de exoesqueletos son para aplicaciones militares y sanitarias, por otra parte, para el sector industrial, las necesidades son más diversas y es más difícil cumplir e identificar los requisitos para el diseño y desarrollo de tales equipos. Acorde a la investigación hecha por ABI Reseach en *Commercial and Industrial Robotics* los ingresos para el mercado de los exoesqueletos estaba valorado hasta el 2020 en 392 millones de dólares y se estima que crecerá en 6800 millones de dólares para el 2030. (ABI Research, 2021)

Entre las pocas aplicaciones que se han logrado en el ámbito industrial se tiene el caso de Europa donde se desarrolló el proyecto “Robot Mate” el cual tuvo como objetivo desarrollar un exoesqueleto que permita reducir la carga física de los trabajadores en tareas de ensamble y desmontaje (Bogue, 2018). Los exoesqueletos también tienen un uso en el sector de construcciones como en estados unidos donde su aplicación es utilizada para la construcción civil, siendo este sector donde los trabajadores se jubilan a temprana edad debido a trastornos musculoesquelético. Esta fue la principal motivación para el desarrollo de exoesqueletos siendo su principal función el incremento de la fuerza motriz para compensar la fuerza debilitada por los brazo y piernas además de adoptar una postura adecuada en el trabajo (Cho, 2018). En algunos casos se ha logrado diseñar dispositivos que llegan a reducir los esfuerzos de la actividad muscular alrededor del 50% en la zona lumbar. (Wehner et al. 2009)

En Latinoamérica varios grupos relacionados a la Red Iberoamericana REASISTE han trabajado en el desarrollado exoesqueleto de miembros inferiores con resultados comparables a los reportados por otros grupos en Europa o América del Norte. A diferencia de los países industrializados la investigación y desarrollo en el sector salud es comparativamente mayor a la lograda en países Latinoamericanos (Del-Ama et al., 2018).

Actualmente en nuestro país la robótica tiene mucha importancia en la medicina siendo su principal aplicación la rehabilitación, se dividen en tres grupos rehabilitación de miembros superiores, inferiores y extremidades distales. Otra de

sus aplicaciones es en la robótica asistencial el cual ayuda a aumentar las capacidades motoras de las personas (Cornejo Jorge, 2019). Entra las legislaciones que se han implementado en el país se tiene la Ley N° 29088, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Estibadores Terrestres y Transportistas Manuales., el cual indica que la carga máxima desde el piso para hombres debe ser de 25 kg y carga a los hombros de 50 kg, para las mujeres 12.5 kg de piso y 20 kg de hombros.

La empresa ETRAL S.A.C fundada en 2012 desde sus inicios participa de importantes proyectos de mantenimiento de estructuras y equipos de alto rendimiento. Con 09 años de experiencia en el mercado, ETRAL SAC es una empresa que se ha consolidado en los rubros de mantenimiento industrial y metal mecánico. Gracias a la calidad de sus productos y servicios ETRAL SAC sigue ganando un espacio importante en el empresariado nacional y la confianza de sus clientes (Etral, sf). La empresa cuenta con 19 trabajadores de los cuales 16 se encuentran en planilla y 3 por recursos humanos. ETRAL S.A.C cuenta con Área de producción, Área de ingeniería, Área de logística, Área administrativa, Área de ventas, Área administrativa y contable y Área de operaciones de planta. Uno de los proyectos más destacados es la construcción de una cisterna de succión para la empresa Promas el cual fue un trabajo complejo debido al tamaño y geometría que se requería y por ser la primera vez que se realizaba un proyecto de esa magnitud. La empresa ETRAL SAC se encarga de la manufactura de carrocerías y tolvas para vehículos de diversa índole como, por ejemplo, furgones frigoríficos, cisterna para transporte de combustible, furgones polleros, furgones cortineros, etc. Entre su cartera de clientes tenemos a las empresas: Interamericana, Gerenpromas, El Rocío y Chimú.

Por las características del trabajo el personal de ETRAL S.A.C durante los procesos de fabricación debe realizar el desplazamiento, manipulación y montaje de materiales y equipos de gran tamaño y peso. Esto requiere un esfuerzo físico importante de parte del operario lo cual se refleja inicialmente en fatiga, pérdida del rendimiento y en el peor de los casos lesiones musculoesqueléticas. La empresa ha mostrado su preocupación por estos factores y está interesada en poder explorar la posibilidad del uso de tecnología de punta para resolver el problema. En ese

sentido la gerencia a estimado como conveniente el diseño y posterior fabricación de un exoesqueleto que permita incrementar la capacidad de levante en los operarios, reducir la fatiga y evitar lesiones. Se tiene como ideas iniciales el poder contar con un equipo robusto, simple (el número mínimo de Grados de Libertad-GDL), ergonómico y económico.

Bajo los criterios antes mencionados podemos plantear la incógnita: ¿Cuál deben ser las características y/o especificaciones técnicas de un exoesqueleto de extremidades superiores que reduzca los esfuerzos necesarios para el levantamiento de cargas realizadas por trabajadores de almacén en la empresa ETRAL SAC?

Entre los aspectos que justifican este trabajo está el ámbito social, ya que con el diseño se logrará probar la fatiga que sufren los trabajadores de las áreas de fabricación y mantenimiento, lo cual traerá un mejor desempeño de los mismos durante el desarrollo de sus actividades. En el ámbito tecnológico se desarrollará un dispositivo autómatas cuya tecnología no esta tan difundida en nuestro País, por tal razón con este trabajo se espera promover el uso de nuevas tecnologías para el beneficio de las personas.

Para este trabajo se estará usando la metodología desarrollada por Eggert (Eggert, 2001) y Dieter y Schmidt (Dieter, G. y Schmidt, L., 2007), que desde este punto en adelante se denominará Metodología de Diseño de Eggert-Dieter. Aun cuando existen otras metodologías importantes tales como la Norma Alemana VDI 2206, estas presentan un esquema por momentos inflexible para el diseño (Stetter et. Al., 2008; Hedrich et. Al., 2018), mientras que la metodología de Eggert-Dieter al ser una metodología general de diseño y desarrollo de productos (Proceso de Desarrollo de Productos) admite un amplio espectro de técnicas de diseño (Ortega, R. y Kaminski, P., 2020). Estas técnicas de diseño pueden ser fácilmente incorporadas de otras metodologías de diseño, incluida la VDI alemana, u otras áreas de la ingeniería para diseño e innovación en ingeniería. Adicionalmente, La Metodología de Diseño de Eggert-Dieter tiene la ventaja de trabajar adecuadamente en dos frentes: el de enseñanza universitaria y el de desenvolvimiento profesional (Han y Shim 2019).

En el presente trabajo el objetivo general se planteó como: Desarrollar la propuesta de un exoesqueleto de extremidades superiores que permita reducir los esfuerzos realizados y reducir la carga que levanta el operario promedio del área de montaje y mantenimiento de la empresa ETRAL SAC.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se tienen los siguientes objetivos específicos: 1) Obtener información de las necesidades de la empresa relacionadas al diseño del equipo. 2) Realizar una búsqueda bibliográfica de códigos, normas o recomendaciones de diseño para exoesqueletos. 3) Elaborar una tabla de especificaciones de ingeniería para el desarrollo del diseño. 4) Generar conceptos de diseño y de configuración para poder extraer la opción óptima. 5) Realizar el análisis cinemático y dinámico del exoesqueleto. 6) Analizar la resistencia estructural con software de Elementos Finitos tanto estático como dinámico. 7) Elaborar los planos y el presupuesto total del equipo.

II. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentarán los antecedentes tomados como base bibliográfica en el desarrollo del presente trabajo:

Mendoza (2020) en su tesis titulado “Investigación sobre el diseño de un mecanismo para el movimiento de las caderas en el plano frontal de un exoesqueleto de miembro inferior para la marcha humana” En la Pontificia Universidad Católica del Perú, el autor diseñó un prototipo de articulación de la cadera, que aumentaba el movimiento del plano frontal del exoesqueleto. Por tanto, los métodos aplicados son gestionados por VDI 2206, y en base a su combinación se propone un concepto de solución para encontrar el mejor concepto de solución considerando el tamaño del sistema mediante análisis técnico y económico. De esta manera, se obtiene el diseño mecánico preliminar del mecanismo de movimiento de la articulación de la cadera del plano frontal del exoesqueleto durante el ciclo de marcha “in situ” del cuerpo humano, lo cual es económico y técnicamente conveniente. El material utilizado para los eslabones de la cadena es acero inoxidable AISI 304, y el material utilizado para la estructura y placas es aluminio. El autor demuestra la importancia de los ejercicios de la articulación frontal de la cadera para mejorar la rehabilitación de los usuarios.

Galán (2017) en su tesis “Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de extremidades superiores”, realizaron el diseño de un exoesqueleto de extremidades superiores con 8 grados de libertad, el cual fue validado en su dimensionamiento y resistencia mediante el software SolidWorks. En este trabajo el autor estudió la biomecánica de las extremidades superiores en las que se consideraron los huesos y los músculos influyentes en el movimiento, como material se utilizó aluminio 6061 T6, barras telescópicas para los ajustes y se encontró que los actuadores neumáticos cumplen con la característica de bajo peso y alta potencia. Se utilizó la modelación dinámica Euler-Lagrange para analizar los torques y momentos. Según el autor el peso total de la estructura fue de 5.6kg, además utilizó un sistema de control en cascada con 2 lazos de control PI, asimismo los músculos artificiales fueron válidos para un peso máximo de 5 kg.

Bonilla (2020) en su proyecto “Diseño de un exoesqueleto para uso industrial de miembros superiores a base de materiales reciclados” en la universidad Pontificia Universidad Javeriana cual objetivo general fue diseñar un exoesqueleto industrial para ayuda a los miembros superiores del cuerpo humano, el cual contaría con un bajo costo. Para este trabajo el autor empleó como cimiento de selección productos ya elaborados y mediante una matriz de selección optó por la marca Comau, como conclusión, el exoesqueleto Greexo (producto de la investigación) no fue producido en su totalidad con los materiales reciclables, sino que se empleó componentes impresos en 3D con material ABS, tanto los soportes en los brazos y columna del exoesqueleto, el modelo funcional tuvo un costo de 119.000 COP sumando mano de obra y materiales, como peso se obtuvo aproximadamente 1.1 kg. Con el exoesqueleto Greexo se reduce los niveles de fatiga en las operaciones de clavar puntillas, ajustar y desajustar tuercas y aplicar silicona.

Yong K. Cho (2018) en su estudio titulado “Un exoesqueleto robótico portátil para la seguridad y salud de los trabajadores de la construcción” el autor se orientó a comprender las posturas corporales de los sujetos cuando realizan trabajos básicos de manipulación de materiales y, a partir del estudio de la postura, se desarrolló un sistema de exoesqueleto de mecanismo pasivo para demostrar que las intervenciones físicas robóticas facilitan la corrección de la postura en el trabajo de manipulación de materiales. Los resultados mostraron que las posturas de todos los sujetos participantes, incluidos los ángulos de flexión de la cintura a una altura diferente, los ángulos de torsión de los hombros y la distancia entre la punta del pie y los bloques no cumplían con las pautas de seguridad de NIOSH (Albers y Estill 2007; Waters et al. 1994). Al colocarse el exoesqueleto, los ángulos de flexión de la cintura y los ángulos de torsión de los hombros de los sujetos disminuyeron, lo que indica que el sistema propuesto evitaba que los usuarios se esforzaran en los músculos de la cintura y los hombros. En este trabajo fue demostrado que el exoesqueleto evita físicamente que los trabajadores tengan posturas inseguras para que los trabajadores se habitúen a tener posturas más seguras y ergonómicas.

Huayta, S. (2019) en su trabajo de investigación Diseño de estructura para levante de carga de dos toneladas para taller de mantenimiento, Arequipa 2019. En

este proyecto tuvo como finalidad diseñar una estructura de levante de carga de dos toneladas, para solventar las necesidades de taller de mantenimiento de equipos pesados y semipesados. Los beneficios de implementar esta grúa de pórtico es que puede operar en cualquier superficie, ejecuta el trabajo de elevación y movimiento de cargas de alto peso y volumen, lo cual facilita el trabajo del operario, reduciendo la fatiga y el riesgo de lesiones laborales. La conclusión que se llegó con el proyecto fue con las máquinas a las cuales se le debe suministrar la materia prima o accesorios de gran peso, así mismo los factores de diseño están por encima de uno.

Khin (2020) en su artículo titulado “Diseño de exoesqueleto de tres grados de libertad para miembro superior”. Se tuvo como objetivo general diseñar un exoesqueleto para cooperar a la recuperación de personas que sufrieron lesiones en las extremidades superiores, este tipo de exoesqueleto deberá contar con tres grados de libertad los cuales ayudarán a los movimientos de abducción/aducción y flexión/extensión. Las medidas del exoesqueleto se ajustaron a las medidas de los ciudadanos del país de México, con lo cual mediante los parámetros Denavit-Hartenberg se pudo simular el exoesqueleto en MATLAB. Finalmente, el exoesqueleto fue probado en persona de 1.70 m de estatura y 65 kg de peso, además el diseño fue ratificado cinemáticamente por medio de simulaciones en MATLAB y FUSION 360.

Después de describir los antecedentes se procede a mencionar los conceptos más importantes relacionados con el desarrollo de esqueletos para extremidades superiores.

La robótica es una conexión entre percepción y acción. Es en esta materia que se incluyen muchos procesos mecánicos como el diseño, la fabricación y estudio de control, todo esto con la intención de resolver complicaciones tanto laborales como cotidianas. Una disciplina que incorpora el diseño, fabricación y control de un robot para resolver un problema como también el estudio de procesos de sensores y algoritmos que suelen ser usados por animales, personas y maquinas (SANZ VALERO, Jose,2007). Un exoesqueleto en robótica es una estructura externa que tiene uniones correspondientes a cada parte del cuerpo usado normalmente por un operador permitiendo así una transferencia de potencia

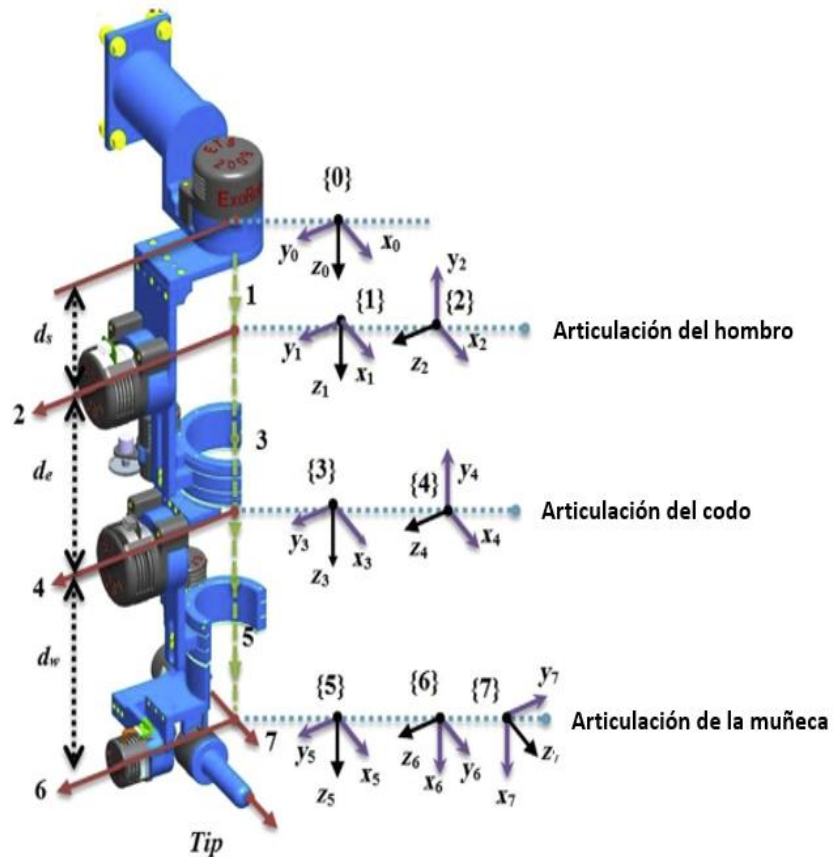
mecánica. (Molina y Gonzales, 2008) es en estos exoesqueletos que se dividen en grupos de extremidades superiores, inferiores y de cuerpo completo. En los exoesqueletos la biomecánica del codo es muy esencial ya que es muy adecuada para la articulación que permite realizar actividades cotidianas en conjunto con el resto del cuerpo, así como también para un movimiento estable y fluido de la mano (Molina y Gonzales, 2008) su cinemática y su extensión tienen lugar en el codo con un rango de flexión entre 0 y 146 grados y un rango de función entre 30 y 130 grados (Normdin,2007)

Para la Confederación Regional de Organizaciones Empresariales de Murcia uno de los factores de riesgos más notorios se produce por fatiga física debida bien a una tensión muscular estática, dinámica o repetitiva, bien a una tensión excesiva del conjunto del organismo o bien a un esfuerzo excesivo del sistema psicomotor (musculoesquelético).

Los exoesqueletos se utilizan ya sea para miembros superiores o miembros inferiores, o cuerpo completo. Para miembros superiores Estos sistemas se encargan de auxiliar al individuo durante un esfuerzo de levantamiento de cargas. Para estos sistemas generalmente se han realizados exoesqueletos de hasta 7 grados de libertad (GDL) los cuales dan soporte a los movimientos del hombro, codo y muñeca. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de exoesqueleto robótico. En esta figura se observa que el brazo posee un actuador por cada grado de libertad, estos actuadores generalmente son motores eléctricos y en cada articulación se colocan los orígenes de coordenadas para cada uno de estos grados de libertad, con el fin de analizar su cinemática.

Figura 1

Exoesqueleto robótico para una extremidad superior

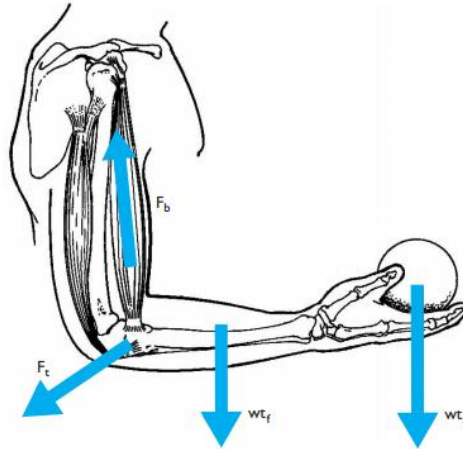


Nota. Tomado del Rosen, J. (2019)

Para el diseño de los exoesqueletos se deben considerar los movimientos del cuerpo humano, los cuales empiezan en el sistema nervioso el cual ejerce un elaborado sistema de control igualando la velocidad y magnitud de la contracción muscular para los requerimientos del movimiento, haciendo de éste, un movimiento delicado y preciso. En la Figura 2 se puede observar la dirección de las fuerzas que desarrolla un brazo humano cuando sostiene un objeto, para este caso el par ejercido por el bíceps braquial (F_b) debe contrarrestar los pares creados por la fuerza desarrollada en el tríceps braquial (F_t), el peso del antebrazo y la mano (wt_f), y el peso del tiro sostenido en la mano (wt_s).

Figura 2

Biomecánica del brazo al sostener un objeto.

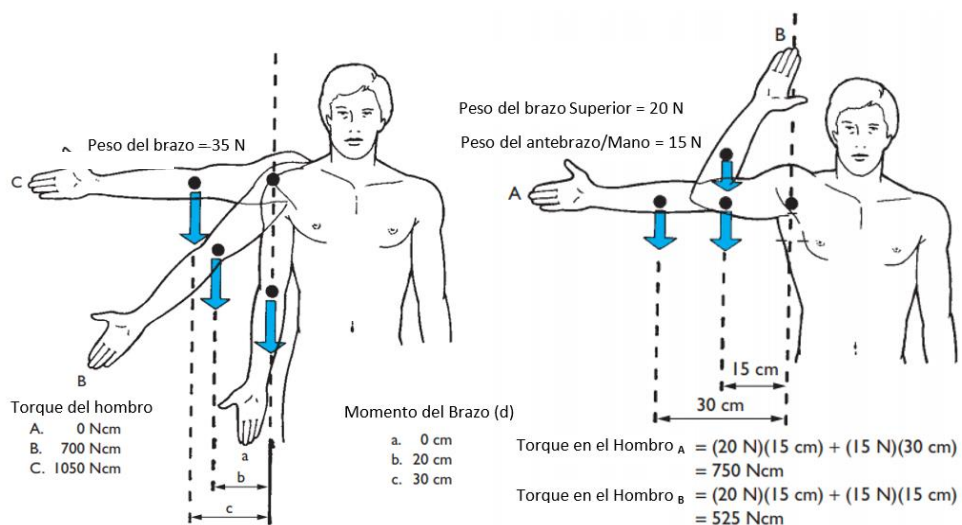


Nota. Tomado de Hall, Susan J. (2015)

A pesar de las fuerzas que se desarrollan en el brazo, el antebrazo y la mano, también se debe tener en cuenta los torques que se ejercen por el mismo brazo, al analizar el efecto de las posiciones de cada segmento del cuerpo en una articulación como, por ejemplo, el hombro, por lo tanto, la distancia perpendicular entre el vector peso (el cual actúa en el centro de gravedad del brazo) multiplicado por la longitud da el torque sobre el hombro (Figura 3)

Figura 3

Biomecánica del brazo analizando el torque ejercido por el peso del mismo.



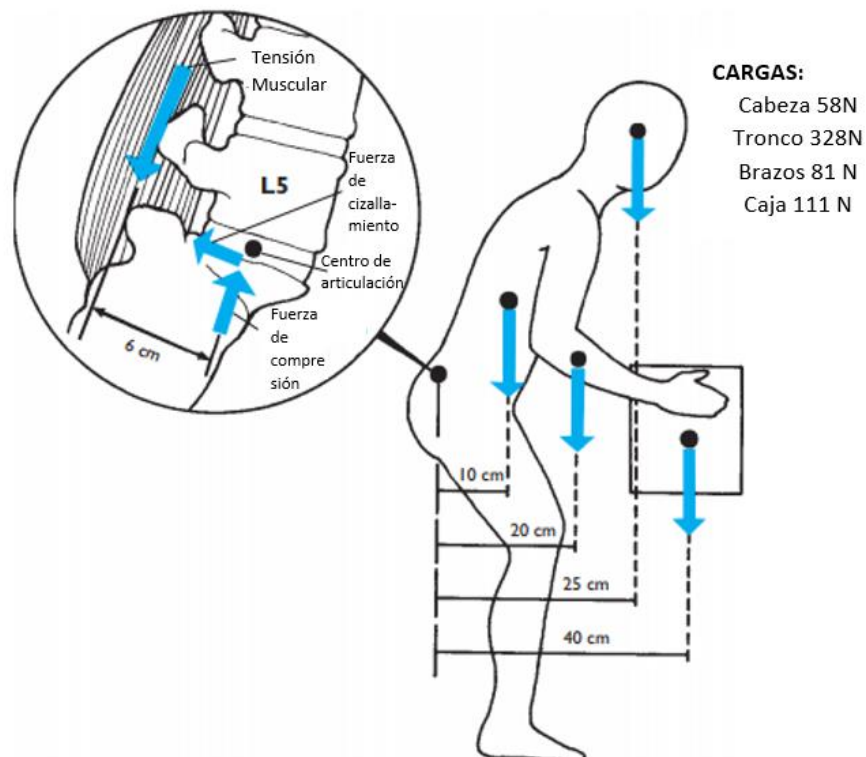
Nota. Tomado de Hall, Susan J. (2015)

Ya que el peso del brazo alcanza un 5% del cuerpo humano, cuando este se encuentra extendido crea grandes momentos de torque ocasionando grandes momentos de torsión que se amortiguan en los músculos del cuerpo. Es cuando se contraen que la articulación glenohumeral soporta un estimado del 50% del peso total del cuerpo (Chiu J and Robinovitch, 1998), es esta fuerza de compresión se reduce a la mitad cuando el codo se flexiona debido a que las distancias del antebrazo y la mano se recortan.

Cuando el cuerpo se encuentra erguido, el centro de gravedad se encuentra en la columna. Cuando se encuentra en una posición de inclinación el torque es soportado por la tensión en los músculos extensores de la espalda y con los brazos extendidos, las articulaciones del cuerpo tienen pequeños momentos pares. Como consecuencia de esto la columna debe generar mayor fuerza para contrarrestar estos pequeños pares producidos.

Figura 4

Biomecánica del brazo analizando el torque ejercido por el peso del mismo.

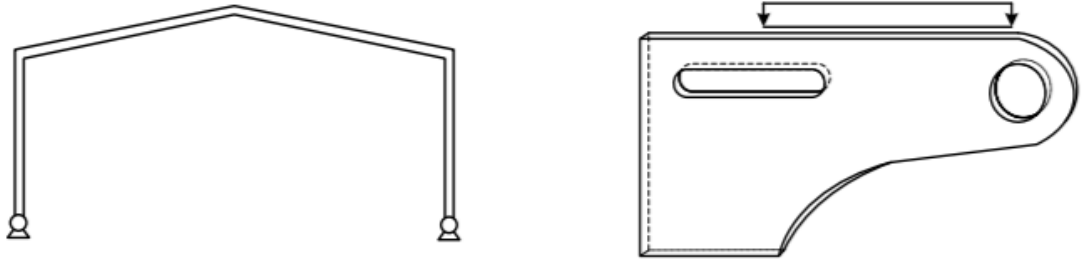


Fuente: (*Basic Biomechanic*) Hall, Susan J. (2015)

- El uso de elementos finitos en ingeniería se aplica mucho para sistemas continuos como lo son bastidores de maquinarias carrocerías entre otros para lo cual el análisis requiere que mantenga una naturaleza continua.

Figura 5

Estructuras reticulares discretas y continuas en elementos finitos



En Los sistemas continuos es muy difícil dividir el sistema en un número finito lo que hace imposible usar el método de los sistemas discretos. Los sistemas continuos mantienen múltiples formas para deformación esto hace que la configuración deformada no puede ser dada por un solo vector finito como lo es en el caso de los sistemas discretos sino como una función vectorial con 3 componentes escalares.

Figura 6

Función vectorial con componentes escalares

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

Donde \mathbf{u} es la función vectorial, que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto. El sistema continuo se divide en un número finito de partes llamados elementos cuyo comportamiento se especifica en un número finito de parámetros asociados a algunas características.

- Las soluciones siguen las reglas de los sistemas discretos.

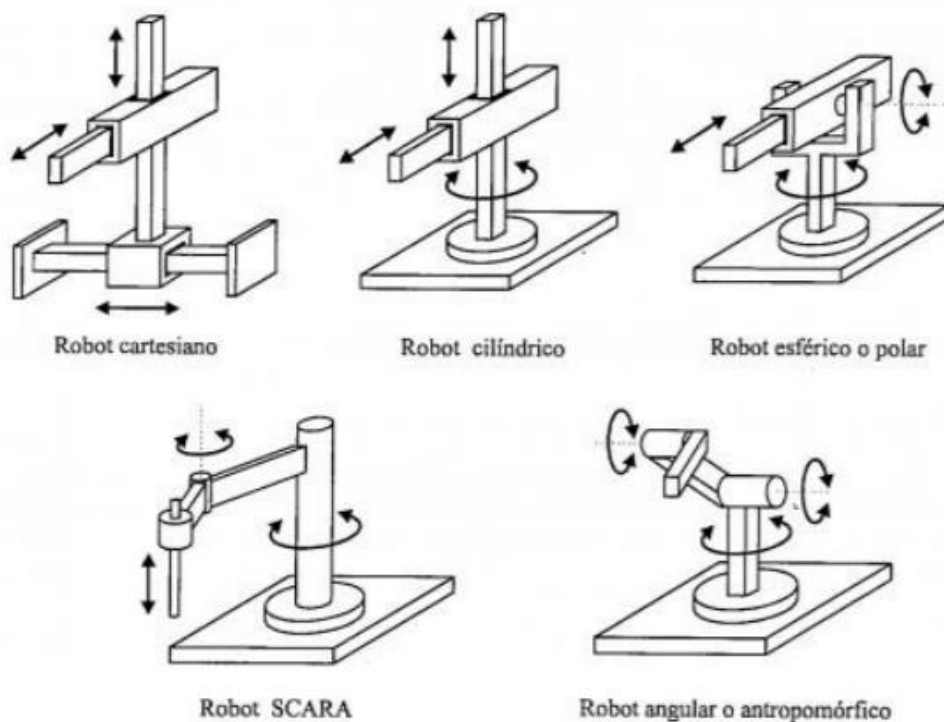
- Las incógnitas siempre dejan como resultado funciones matemáticas
- El comportamiento queda definido a partir de los nodos mediante funciones de interpolación

A continuación, algunos términos básicos para comprender la cinemática directa en un manipulador.

Grados de Libertad: Por lo general un robot manipulador posee menos de 6 grados de libertad. Estos grados de libertad siempre están dados por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que este compuesto. Estas articulaciones básicas empleadas son las rotativas y prismáticas las cuales poseen un solo grado de libertad. En la Figura 07 se presentan varias configuraciones típicas para los robots industriales.

Figura 7

Estructuras mecánicas en robots industriales



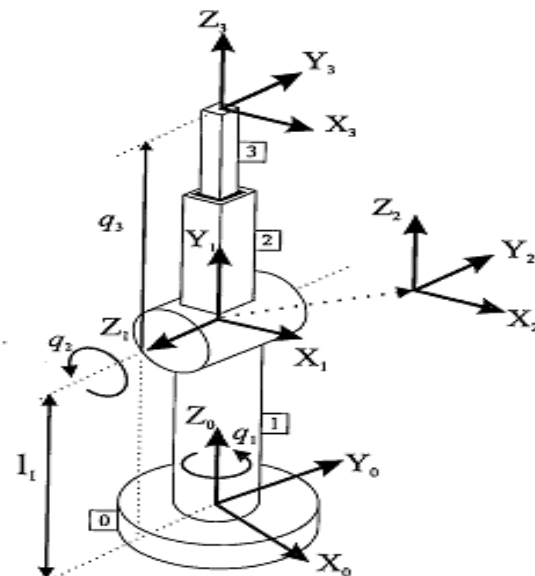
La **cinemática directa** consiste en encontrar la posición final del sistema robótica, hacer esto es una función de los valores articulares, es decir, determinare el valor traslacional o rotativo de las articulaciones.

La **cinemática Inversa** se utiliza para expresar el cálculo de los valores en la articulaciones sistema robótico, necesario para ubicar un punto en el espacio referenciado al sistema de coordenadas global.

Denavit Hatenberg: Es un procedimiento para describir la estructura cinemática de una articulación constituida por un solo grado de libertad. Para ello, a cada articulación se le asigna un Sistema de Referencia Local con origen.

Figura 8

Localización de los ejes coordenadas en un sistema robótico.



Las articulaciones se numeran desde 1 hasta n. A la articulación i -ésima se le asocia su propio eje de rotación como Eje Z_{i-1} , para que el eje de giro de la 1ª articulación es Z_0 y el de la n-ésima articulación, Z_{n-1} .

Para Representar el sistema de Denavit-Hartenberg se reemplaza en la matriz de transformación homogénea la cual es un arreglo de 4×4 que contiene información relativa a la posición y orientación del sistema de referencia unido al enlace del manipulador en relación con el sistema de referencia.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación: Es aplicada, pues se hará uso de los conocimientos específicos de ingeniería, resolver un problema de diseño para el exoesqueleto. (Hernández et al. 2014)

Diseño de investigación: Es no experimental, porque se evaluará de forma individual las características necesarias para el diseño. (Hernández et al. 2014)

3.2. Variables y operacionalización

Las variables estudiadas están relacionadas al diseño del exoesqueleto, las cuales son:

Variable independiente

- Carga de levante, F (kN)
- Configuración de Exoesqueleto

Variable dependiente

- Reducción de Esfuerzo, ΔF (kN)
- Ventaja Mecánica, VM (adimensional)

3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis

Población: Exoesqueletos De Extremidades superiores en la empresa Etral S.A.C

Muestra: Exoesqueletos de extremidades superiores que reduzcan la carga de levante

Muestreo: Muestreo no probabilístico de tipo por conveniencia.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En la tabla 01 se muestran las técnicas e instrumentos de recolección de datos para los cuales se establecen:

Tabla 1

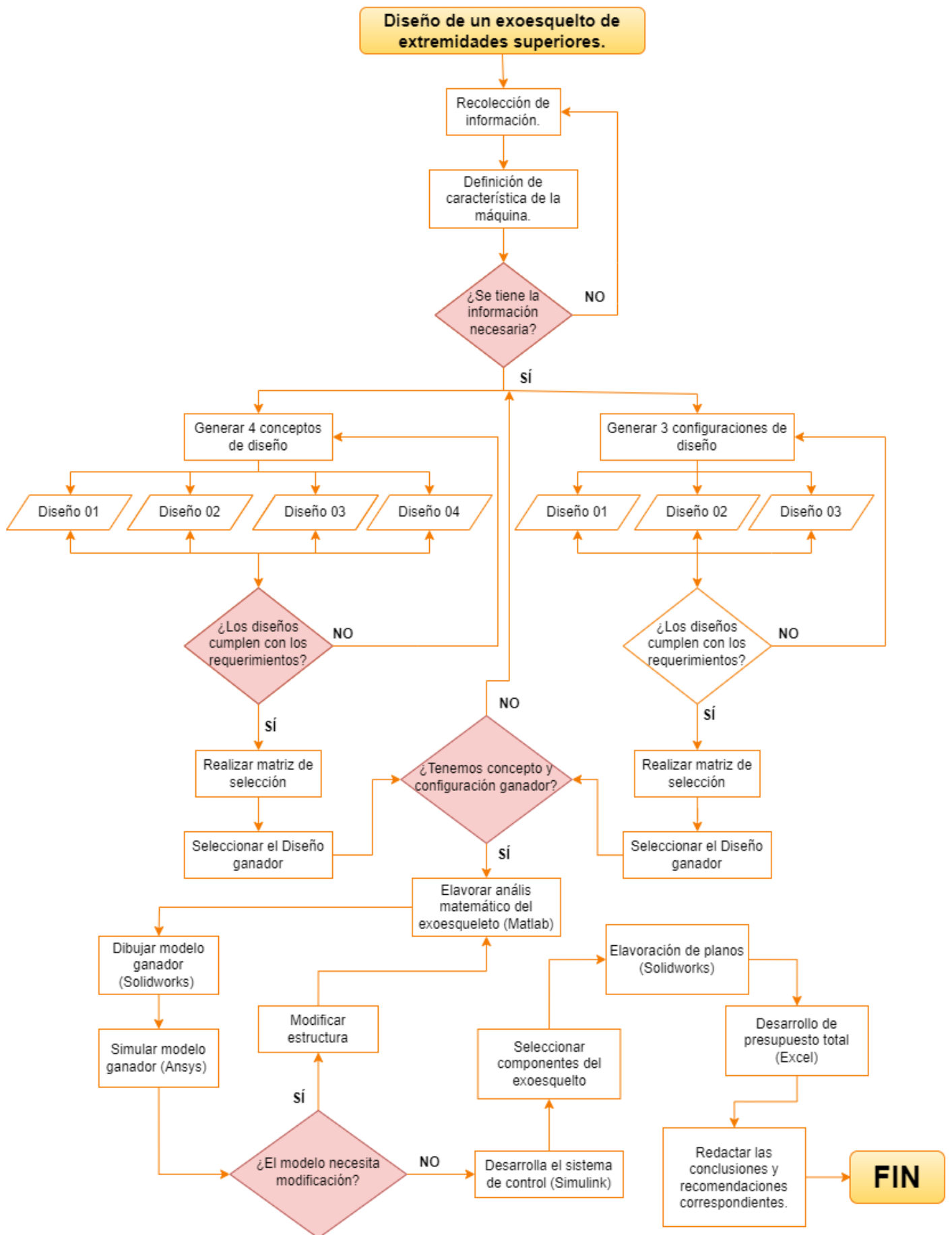
Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento	Validación
Observación	Guía de observación	Por asesor profesional
Análisis documental	Ficha de registro de datos	Por asesor profesional
Entrevista	Guía de entrevista	Por asesor profesional

Nota: Esta tabla muestra las técnicas de recolección de datos consideradas

3.5. Procedimientos

El procedimiento para seguir con la metodología de diseño adoptada consta de los siguientes pasos. En el diagrama de flujo se empieza por la recolección de trabajos similares previos similares a la estructura del diseño a realizar. Una vez realizada la recolección de datos se recolectan características para el dimensionamiento del equipo para posteriormente utilizar esa información en los conceptos de diseño generados. El concepto de diseño que cumpla con la característica nos servirá para analizar su cinemática y dinámica de la estructura del exoesqueleto permitiéndonos así modelar y simular el sistema completo.



3.6. Método de análisis de datos

La recopilación de la información se llevará a cabo mediante 3 entrevistas, donde identificaremos la necesidad del cliente y se formulará la lista de requerimientos la cual expresará el problema en términos ingenieriles.

Se empleará el software de ofimática Excel para procesar la información almacenada en tablas y de los cuales se obtendrán gráficas que resuman de forma visual la información tabulada.

En el apartado del diseño de conceptual para poder evaluar los conceptos de solución se empleará una matriz de selección de criterios ponderados siguiendo la Metodología de Diseño de Eggert-Dieter, lo cual permite calificar a cada concepto de solución, tomando como base criterios de selección que se extraen de los requerimientos del cliente o empresa que solicita el diseño. Con esta esta matriz se optimo el concepto óptimo para el diseño del equipo.

Para validar el análisis cinemático y estructural del diseño, se hará uso de un software de simulación por el método de elementos finitos (FEM) el cual arrojará la distribución de esfuerzos dentro de la estructura y el factor de seguridad cada punto de la misma.

3.7. Aspectos éticos

Los autores del presente trabajo se comprometen a cumplir con los requerimientos de validación de la veracidad de la recolección y uso de datos para lo cual los autores citados a lo largo del trabajo serán referenciados según el estilo APA 7° Edición.

Los autores se comprometen a salvaguardar la información proporcionada por la empresa ETRAL SAC.

Para la aplicación de los instrumentos de recolección se aplicó con el fin de obtener datos para mantener la neutralidad manteniendo en confidencialidad los datos obtenidos en esta investigación y por investigaciones anteriormente citadas.

IV. RESULTADOS

4.1. Necesidades de la empresa:

Para cumplir el primer objetivo se determinaron las necesidades requeridas por la empresa ETRAL S.A.C mediante la aplicación de entrevistas a los jefes y registro de datos a los operarios que están involucrados con el trabajo de carga y descarga dentro del sector de almacén. Los resultados obtenidos se describieron y se plasmaron en una tabla para poder observar con mayor facilidad los datos obtenidos como se visualiza en la tabla N°2 mostrada a continuación.

Pregunta 1: ¿Altura mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa?

De los valores obtenidos en esta pregunta podemos ver que el rango máximo para la altura de un operario se encuentra entre los 1.6 a 1.85.

Pregunta 2: ¿Qué tipos de trabajo realizan los operarios que requieran los que intervengan los brazos para manipular objetos?

Entre los trabajos que realizan los operarios las respuestas se inclinaron hacia la carga y descarga de material como el trabajo más común realizado por los operarios.

Pregunta 3: ¿Durante el desarrollo de sus actividades a tenido dolor por fatiga en alguna parte del torso o extremidades superiores?

Las respuestas indicadas nos indican que las lesiones no están presentes dentro de los trabajadores sin descartar que puedan ser provocadas debido a que las encuestas no han sido hechas a operarios.

Pregunta 4: ¿Qué características técnicas esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo más eficiente?

Las principales características esperadas por la empresa por orden de importancia son confort, seguridad, flexibilidad, resistencia y robustes.

Pregunta 5: ¿Cuánto tiempo considera usted que deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?

La empresa requiere que el uso del equipo sea autónomo y trabaje de manera continua 8 horas.

Pregunta 6: ¿En promedio por cuanto tiempo realiza una actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado?

En los valores de la encuesta nos indica que el rango de tiempo de trabajo para sostener objetos pesados se encuentra entre 5 a 10 minutos.

Pregunta 7: ¿la empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, alimentación monofásica o trifásica?

La empresa cuenta con todos los equipos antes mencionados según los datos recolectados de la empresa.

Pregunta 8: Detalles adicionales respecto al diseño ideal para este equipo

En los datos obtenidos se muestra que la empresa requiere un dispositivo que levante considerable carga, que sea seguro y mantenga la postura del operario durante su uso.

Pregunta 9: ¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?

Se obtuvo que un precio considerable para su desarrollo estaría ubicado entre s/ 1500 a s/ 2000 soles.

Tabla 2*Resultado de las entrevistas de la empresa ETRAL S.A.C*

N°	ENTREVISTADO	Gian Piero Trujillo Neyra (Gerente)	Pierre Huamán Grados (jefe de Producción)	Marcos Cruzado Cruzado (jefe de Ingeniería)
1	Altura mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa	1.63-1.85 m	1.65-1.79 m	1.60-1.80 m
2	¿Qué tipos de trabajo realizan los operarios que requieran los que intervengan los brazos para manipular objetos	Montaje de perfiles, carga y descarga de material	Carga y descarga de material, soldadura, taladrado, ensamble	Carga y descarga de planchas y soldadura
3	¿Durante el desarrollo de sus actividades a tenido dolor por fatiga en alguna parte del torso o extremidades superiores?	No	No	No
4	¿Qué características técnicas esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo más eficiente?	Seguridad, Confort, Confiabilidad	Flexibilidad, confort, resistencia, Seguridad	Flexibilidad, Robustes, Comodidad
5	¿Cuánto tiempo considera usted que deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?	6 hr.	8 hr.	Autónoma 8 hr

Tabla 3 (Continuación)*Resultado de las entrevistas de la empresa ETRAL S.A.C*

N°	ENTREVISTADO	Gian Piero Trujillo Neyra (Gerente)	Pierre Huamán Grados (jefe de Producción)	Marcos Cruzado Cruzado (jefe de Ingeniería)
6	¿En promedio por cuanto tiempo realiza una actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado?	8 min	10 min	5 min
7	¿la empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, alimentación monofásica o trifásica?	Todo lo antes mencionado	Todo lo antes mencionado	Todo lo antes mencionado
8	Detalles adicionales respecto al diseño ideal para este equipo	Considerable Carga de levante	Debe ser seguro para los operarios	Mantener la columna recta y evite lesiones
9	¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?	s/ 1500	s/ 2000.00	s/ 2000.00

4.2. Normativa y/o recomendaciones de diseño para exoesqueletos.

De la búsqueda de normativa relacionada se ha contratado información relacionada con: Salud, Pautas de diseño, estandarización y etiquetado de exoesqueletos

4.2.1 Normativa relacionada a la Salud de los operarios

Guía Técnica de Manipulación Manual de Cargas realizada al amparo del RD 487/1997.

Una guía técnica la cual propone en un trabajador que presenta las condiciones de salud ideales puede levantar como máximo 25 Kg, si el operario es joven, mujer o adulto como máximo se permite una carga de levante de 15kg y para personas entrenadas para circunstancias especiales una carga de 40 kg.

La Directiva de maquinaria de la Unión Europea (2006/42/CE).

Esta directiva permite a las maquinas que cumple con los requerimientos de seguridad y salud circule libremente por la unión europea. Esta directiva permite que los equipos y maquinarias utilizados por los trabajadores mantengan las medidas de seguridad necesarios durante su uso. Esta directiva solo aplica a productos comercializador por primera vez en el mercado de la unión europea

ISO 10218-1: 2011

En esta norma se dan pautas para el diseño respetando las medidas de seguridad, protección e información en el uso de robots industriales. También muestra todos los peligros asociados con robots y proporciona requisitos para equilibrar esos peligros. Esta norma específica que la emisión de ruido generalmente no se considera peligro significativo. Esta normativa no aplica a robots no industriales. Los principios de seguridad de ISO 10218 se pueden utilizar en estos otros robots.

ISO 13482: 2014

La presente regla habla sobre los requisitos en conjunto de pautas para el diseño seguro, sistemas de defensa e información para el uso de robots dedicados al cuidado personal. Muestra riesgos relevantes y explica cómo tratarlos en base a los distintos tipos de cuidado personal. Cubre los dispositivos robóticos usados en aplicaciones de cuidado personal, que se tratan como robots de cuidado personal.

No se aplica a robots con velocidades a más de 20 km /h, juguetes robots; robots voladores; robots industriales y robots acuáticos, que están cubiertos en ISO 10218.

ASTM-F3323-20

Incluye términos relacionados con exotrajes y exoesqueletos, proporcionando un vocabulario común y coherente. El propósito de ASTM F3323-20 es facilitar la comunicación entre aquellos que pueden estar involucrados en la investigación, diseño, implementación y uso de exotrajes y exoesqueletos en aplicaciones que incluyen, entre otras, las industriales, militares, de respuesta a emergencias, recreativas, y zonas médicas.

ASTM-F3358

Esta práctica establece pautas de etiquetado e indicaciones de fabricación de exoesqueletos. Parte de la normativa nos indica que los valores deben ser dados en unidades del sistema Internacional (SI), también especificar que los valores ubicados entre paréntesis son conversiones matemáticas la cuales se proporcionan con fines informativos y no estándares. Esta norma especifica que no cubre todas precauciones dirigidas a la seguridad, estas son responsabilidad de cada usuario en caso existan normativas ligadas al uso de esta norma.

Reglamento Europeo 89/686/EEC.

Si es que un exoesqueleto está certificado como EPP (Equipo de protección personal), este reglamento especifica que puede utilizarse con intención de prevención para disminuir la presencia de lesiones conectadas con la labor, contemplando a un exoesqueleto en su categoría III como “Complex dising”. Este reglamento se ajusta al Reglamento (UE) 2016/425, también referido a equipos de protección personal.

4.2.1. Recomendaciones de diseño

Como resultado de la búsqueda de investigación en exoesqueletos a nivel nacional, Sudamérica y mundial, se logró determinar que el desarrollo de investigación en estos prototipos es escaso. Debido a esto, se procedió a realizar una recopilación de recomendaciones de diseño en diferentes investigaciones y artículos que se relacionen con el tema. Esto se planteó en una tabla como se muestra en la Tabla N° 4

4.3. Especificaciones de ingeniería

Luego de analizar las necesidades de la empresa se realizó una tabla mediante la cual se plantearon las especificaciones de ingeniería con rangos y límites que se requieren para el diseño. En la Tabla N° 5 se muestran las especificaciones de ingeniería.

Tabla 4*Recomendaciones de diseño para el Exoesqueleto*

CRITERIO	RECOMENDACIÓN	FUENTE
MATERIAL	Se recomienda no exponerlo a luz solar excesiva ni a temperaturas extremas.	Bonilla Ramos, 2020
	Cuando se utilicen piezas impresas con filamento ABS se recomienda utilizar materiales que puedan soportar las cargas requeridas en la unión de las articulaciones del exoesqueleto.	
	No se recomienda utilizar actuadores hidráulicos debido al excesivo peso que producen. Los más recomendados son los actuadores eléctricos. Debido al alto torque y que tienen mayor facilidad de control	Galán Cutipa, 2017
DISEÑO	El material utilizado fue aluminio 6061 T6, barras telescópicas para los ajustes y se encontró que los actuadores neumáticos cumplen con la característica de bajo peso y alta potencia.	
	Se recomienda encarecidamente que cualquier dispositivo sensible esté protegido por un escudo	Freni, Pierluigui 2014
	Se recomienda mejorar la geometría diseñada para ergonomía de la espalda logrando mayor comodidad durante el uso.	Khin, R. A
MANTENIMIENTO	Al momento de realizar el diseño se recomienda tener en cuenta la longitud del brazo y la carga manipulada por los operarios ya que son los principales factores que afectan en la deformación de la estructura	Méndez Sosa, 2017
	Se recomienda su adecuado mantenimiento general, en las partes del aparato y especificar sus instrucciones de postura.	Bonilla Ramos, 2020
	Se recomienda el mantenimiento de los actuadores para mantener un buen funcionamiento durante el trabajo	Yong K. Cho, 2018

Tabla 5*Tabla de especificaciones de ingeniería*

Subfunción	Características	Unidad	Rango
Regulación de altura	Dimensión	Metros	$1.59 \leq H \leq 1.85$
Carga de levante	Dimensión	Kilogramos	$15 \leq F \leq 50$
Peso del equipo	Dimensión	Kilogramos	$5 \leq P \leq 25$
Horas de trabajo	H	Horas	8 horas
Inversión	Valor económico	Soles	$2500 \leq \$ \leq 5000$

4.4. Diseño Conceptual:

Para determinar las necesidades de la empresa lo cual se requiere según la metodología de Eggert Dieter a aplicar, se realizó una toma de datos y parámetros a 13 trabajadores los cuales nos ayudaron a determinar medidas para el exoesqueleto (Como se muestra en el anexo 0x). Es mediante estos parámetros y los obtenidos por los requerimientos de la empresa que se plantearon 3 conceptos de diseño los cuales se describen con ventajas y desventajas de cada uno.

Concepto de diseño 01: Exoesqueleto articulado

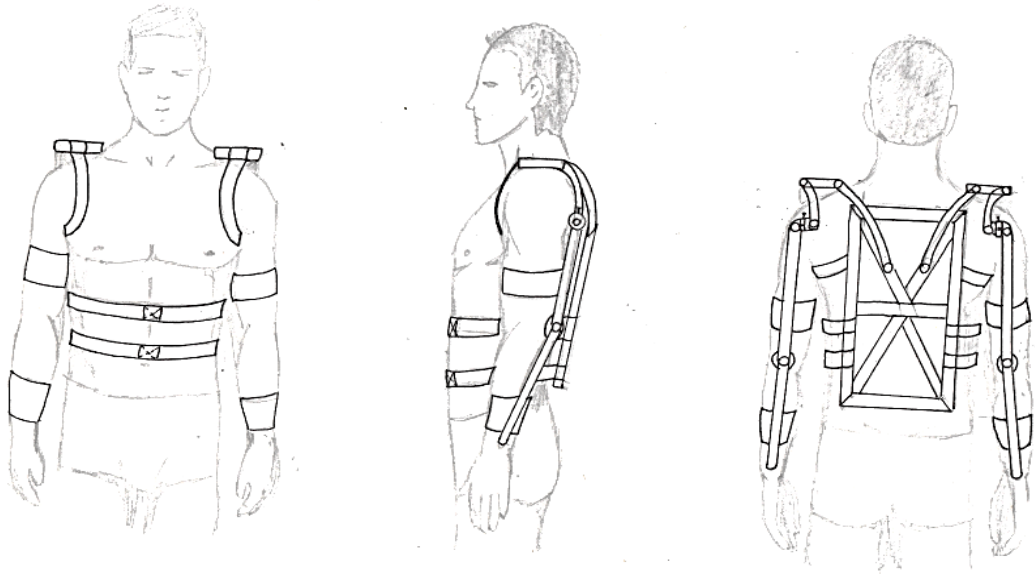
Este primer concepto se derivó en el modelo de EksoVest utilizado por Ford (Ford media center,2018). Este primer concepto de diseño es un exoesqueleto es un diseño que aprovecha los esfuerzos del usuario y lo incrementa teniendo como principal apoyo los engranajes de bloqueo los cuales harán que el operario al realizar una actividad donde sea necesario transportar una carga pesada de un lado a otro este mantenga la postura y evite la fatiga del usuario haciendo que los esfuerzos sean repartidos en todo el exoesqueleto como se muestra en la Figura 9

Su principal ventaja es la resistencia de su estructura y muy ligero el cual no aporta una cantidad de peso excesiva al ser equipado en el operario.

Su principal desventaja es la poca carga de levante que puede soportar el equipo.

Figura 9

Concepto Solución N° 1



Concepto de diseño 02: Exoesqueleto de acción hidráulico

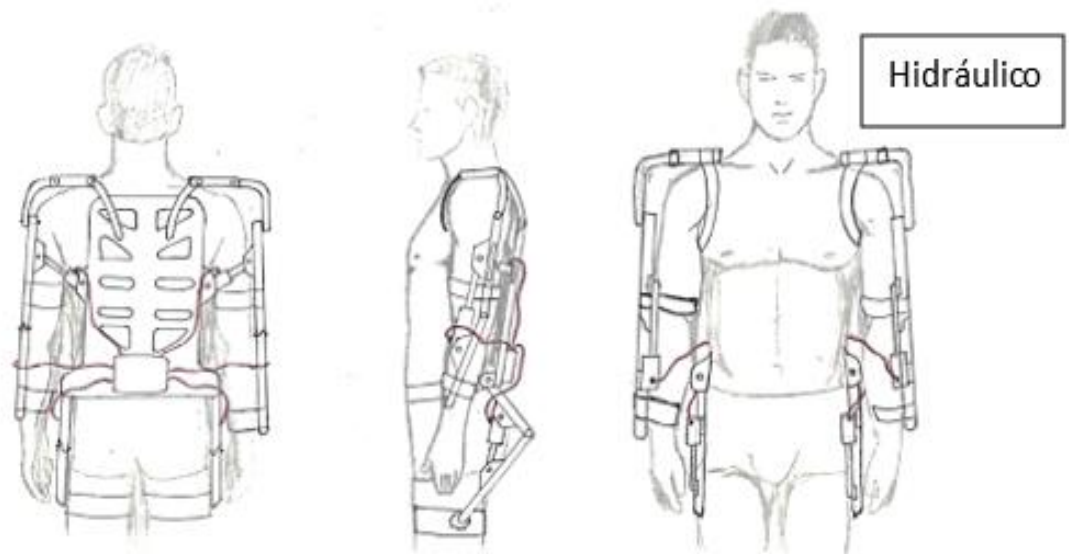
El Concepto de diseño Numero 02 se inspiró en el exoesqueleto Exo-Muscle (Kobayashi, 2017) un concepto basado en actuadores hidráulicos es exoesqueleto que aprovecha los actuadores de activación por fluidos los cuales permiten ampliar el límite de carga de levante que un operario. El diseño ocupa de una fuente de alimentación de mayor tamaño, pero esto permite obtener mayor potencia en los actuadores mostrado. El concepto se muestra en la figura 10

Su principal ventaja es que el operario pueda operar una mayor carga durante su uso y mantiene una estructura más resistente

Su principal desventaja es el peso del equipo y la poca limitada movilidad ya que debe estar conectado a una fuente de alimentación

Figura 10

Concepto Solución N° 2



Concepto de diseño 03: Exoesqueleto de acción Neumático

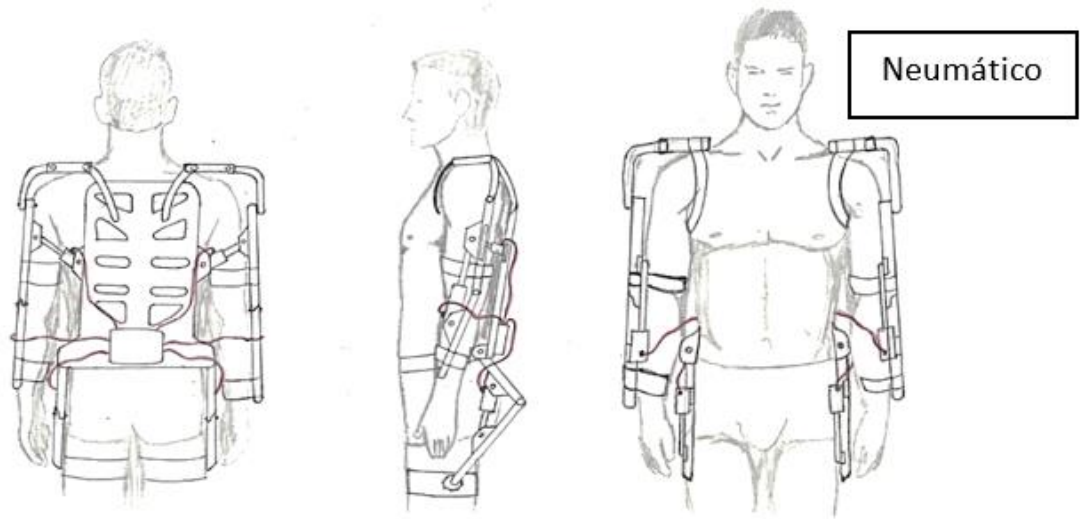
El concepto número 03 se inspiró al igual que el anterior en el exoesqueleto Exo-Muscle (Kobayashi, 2017) de exoesqueleto con acción neumático está basado en pistones neumáticos los cuales permiten obtener potencia, pero poca precisión de posición en los actuadores, Requiriendo de una compresora como fuente de energía y permitiendo mayor flexibilidad y compresión durante el uso de exoesqueleto como se muestra en la figura 11

Entre sus ventajas están la facilidad de movilidad, la compresión permite amortiguar y simular mejor los movimientos para el operario y más facilidad de uso.

Su principal desventaja es el costo elevado y que requiere de una fuente de alimentación estática que limita su transporte

Figura 11

Concepto Solución N° 3



Concepto de diseño 04: Exoesqueleto de acción Eléctrico

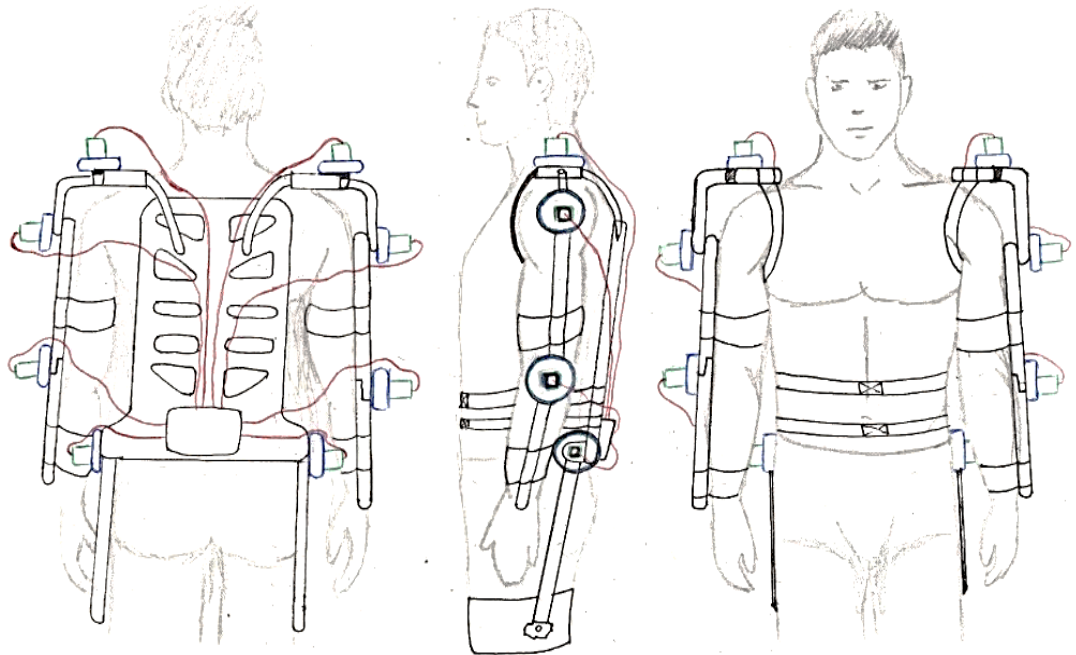
El concepto de diseño número 04 se basó en el modelo de la universidad de las fuerzas armadas ESPE (Lamingo, Alexis. 2017) por actuadores eléctricos permite tener mayores torques durante la carga lo que permite al operario aumentar la capacidad de carga durante su labor, esta configuración es más compacta ya que permite una fuente de alimentación portátil y mayor movilidad durante el uso del exoesqueleto como se muestra en la figura 12.

Sus principales ventajas son el torque que ofrece lo cual ayuda a aumentar la carga del levante del operario y lo compacto de su alimentación

Su principal desventaja es el peso del exoesqueleto para su uso

Figura 12

Concepto Solución N° 4



4.4.1. Selección del concepto de diseño:

La selección de la alternativa más adecuada se realizó mediante una matriz de selección ponderado bajo los criterios de selección obtenidos de las encuestas realizadas para lo cual se incluyeron los criterios de:

Autonomía, Rigidez estructural, estabilidad y precisión Facilidad de ensamble, Bajo peso, Buena seguridad y bajo costo de Fabricación. La matriz como se muestra en la Tabla 06 presenta los criterios a la parte izquierda y en la parte superior los conceptos. Incluye una valoración dependiendo de las características de cada concepto y mediante esta valoración obtener una clasificación. Siendo el concepto con la puntuación más alta el elegido como mejor concepto de diseño como se muestra en la Tabla 6

Tabla 6

Matriz de selección ponderada de conceptos de solución.

Matriz de selección ponderada									
Criterio	Conceptos de solución								
	Importancia Peso (%)	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3		Concepto 4	
		Valoración	Calificación ponderada	Valoración	Calificación ponderada	Valoración	Calificación ponderada	Valoración	Calificación ponderada
Autonomía	10 %	4	0.4	1	0.1	1	0.1	3	0.3
Buena rigidez estructural	20 %	3	0.6	3	0.6	3	0.6	3	0.6
Buena estabilidad y precisión	25 %	1	0.25	3	0.75	3	0.75	4	1
Facilidad de ensamble	5 %	4	0.2	1	0.05	1	0.05	3	0.15
Bajo Peso	10 %	4	0.4	0	0	1	0.1	2	0.2
Buena Seguridad	25 %	1	0.25	2	0.5	2	0.5	2	0.5
Bajo costo de fabricación	5 %	4	0.2	1	0.05	1	0.05	3	0.15
	100 %		2.3		2.05		2.15		2.9
Posición			2º		4º		3º		1º
	Clasificación			Valor					
	Insatisfecho			0					
	Poco Satisfecho			1					
	Satisfecho			2					
	Muy Satisfecho			3					
	Perfectamente satisfecho			4					

4.5. Diseño de Configuración:

Para el diseño de configuración se plantearon tres modelos para poder, mediante una serie de criterios, seleccionar la opción más óptima que cumpla con el objetivo de soportar las cargas y facilite la carga del levante en los operarios. Las configuraciones planteadas se tomaron en base al diseño conceptual número 4 escogido anteriormente en la tabla de criterios ponderados. Para seleccionar entre la configuración óptima se realizó al igual que con los diseños conceptuales una tabla de criterios ponderados para determinar según los requerimientos la configuración óptima para el diseño.

Configuración “A”:

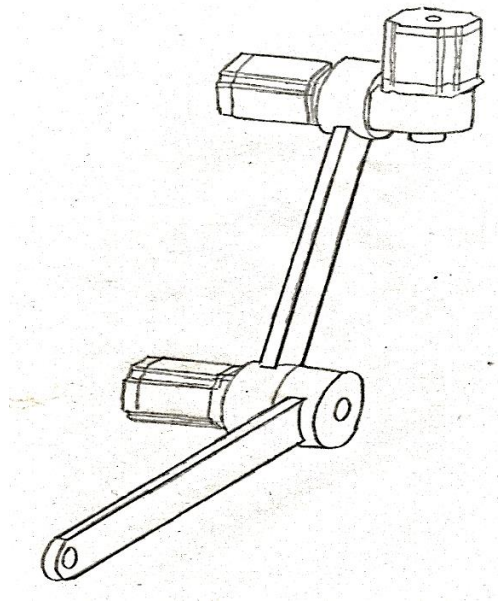
La primera alternativa de configuración muestra el uso de motores de eje unido, con esto se quiere decir que la configuración de los motores es moverse con los ejes en paralelo manteniéndolos unidos permitiendo la movilidad en dos grados de libertad mediante engranajes helicoidales unidos ubicados en paralelo como se muestra en la figura 13.

La principal ventaja de esta configuración es la velocidad de los actuadores los cuales permiten realizar los movimientos de manera directa y el momento que se ejerce es mínimo.

La principal desventaja es que al ser los ejes coincidentes el movimiento se limita al abrir y cerrar los brazos

Figura 13

Alternativa de configuración N° 1



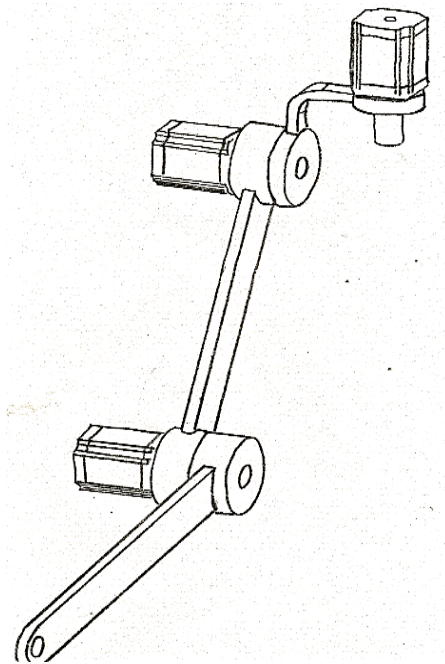
Configuración “B”

La siguiente alternativa de configuración muestra el uso de una unión en forma de “L” en la articulación como se muestra en la figura 14 manteniendo los ejes de los motores de dicha articulación en paralelo y permitiendo una mayor movilidad y estabilidad del exoesqueleto.

Entre sus principales son la facilidad de movimiento y la comodidad durante el uso ya que las articulaciones se alinean bien con el cuerpo humano al realizar una acción de carga y descarga.

La principal desventaja es que los actuadores son sometidos a mayores fuerzas debido a las distancias que se aplican en la unión en forma de “L”.

Figura 14
Alternativa de configuración N° 2



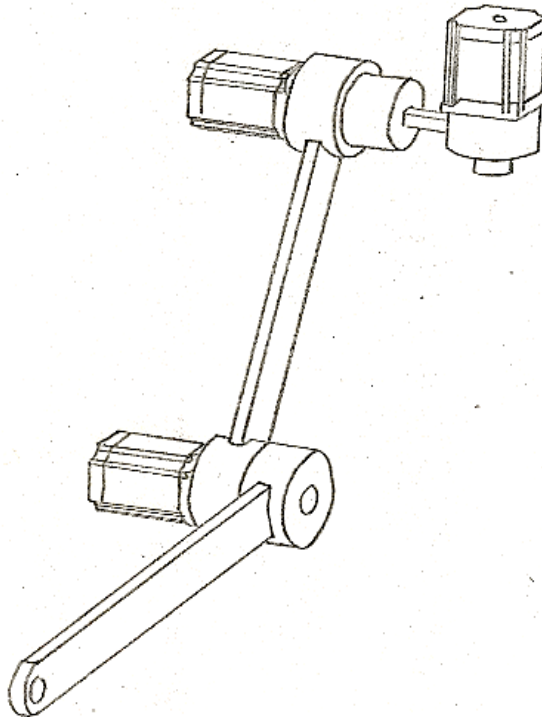
Configuración “C”:

Esta alternativa de solución es a propósito que los ejes de los motores se mantengan en paralelo como se muestra en la figura 15, pero extendiendo el motor lateral a una distancia ejerciendo un momento mayor al momento de realizar las acciones de movimiento

Su principal ventaja es la mayor movilidad ofrecida para realizar la acción de abertura y cierre de los brazos lo que permite mayor comodidad en el uso.

La principal desventaja es la desalineación de las articulaciones del exoesqueleto con su representante en el cuerpo humano lo que tiende a correr los eslabones del exoesqueleto con respecto al cuerpo impidiendo la movilidad libre durante el uso.

Figura 15
Alternativa de configuración N° 3



4.5.1. Selección del concepto de diseño:

La selección de la alternativa más adecuada se realizó mediante una matriz de selección ponderado bajo los criterios de selección obtenidos de las encuestas (anexo) realizadas para lo cual se incluyeron los criterios de: Autonomía, Rigidez estructural, estabilidad y precisión, Facilidad de ensamble, Bajo peso, Buena seguridad y bajo costo de Fabricación. La matriz como se muestra en la Tabla 06 presenta los criterios a la parte izquierda y en la parte superior los conceptos. Incluye una valoración dependiendo de las características de cada concepto y mediante esta valoración obtener una clasificación. Siendo el concepto con la puntuación más alta el elegido como mejor concepto de diseño como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7*Matriz de selección ponderada de Configuración de diseño.*

Matriz de selección ponderada							
Criterio	Importancia Peso (%)	Conceptos de solución					
		Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3	
		Valoración	Calificación ponderada	Valoración	Calificación ponderada	Valoración	Calificación ponderada
Eficiencia	25%	2	0.50	4	1	4	1
Buena estabilidad y precisión	20%	2	0.40	3	0.60	3	0.60
Comodidad durante el uso	25%	4	1.00	3	0.75	2	0.50
Bajo Peso	10%	3	0.30	3	0.30	4	0.40
Buena Seguridad	20%	3	0.60	4	0.80	4	0.80
	100 %		2.8		3.45		3.3
Posición			3 ^o		1 ^o		2 ^o
	Clasificación	Valor					
	Insatisfecho	0					
	Poco Satisfecho	1					
	Satisfecho	2					
	Muy Satisfecho	3					
	Perfectamente satisfecho	4					

4.6. Análisis paramétrico

Iniciando los cálculos necesarios para el diseño del exoesqueleto, como primer paso, se encuentra la estimación del peso total del exoesqueleto, en el cual también podemos encontrar el peso optimizado del exoesqueleto; con lo cual llegamos a definir los primeros parámetros de entrada (variables de entrada), como se muestra en la tabla número 8.

Tabla 8

Tabla de variables para el análisis de motores

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	VALOR
nm	Número de motores	Adimensional	6
Pm	Peso motor paso a paso Nema 23	Kg	1.5291
Pb	Peso del grupo de baterías	Kg	1.5
Plift	Carga de levante	Kg	25
g	Aceleración de la Gravedad	m/m ²	9.81
Dalum	Densidad el Aluminio	Kg/m ³	1440
Vest0	Volumen inicial de la estructura	m ³	2.534*10 ⁻³
Vest1	Volumen optimizado de estructura	m ³	1.495*10 ⁻³

Teniendo la densidad del aluminio y el Volumen que este ocupa en el exoesqueleto podemos determinar la masa de la estructura, siendo esta referida en la ecuación (1)

$$Mest0 = Dalum * Vest0 \quad (1)$$

$$Mest0 = 1440 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * 2.534 * 10^{-3} (m^3)$$

$$Mest0 = 3.6490 \text{ kg}$$

Similar al cálculo previo determinamos la masa del exoesqueleto optimizado, obteniendo la ecuación (2)

$$Mest1 = Dalum * Vest1 \quad (2)$$

$$Mest1 = 1440 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * 1.495 * 10^{-3} (m^3)$$

$$Mest1 = 2.1528 \text{ kg}$$

Ambos resultados tanto de la ecuación (1) y la ecuación (2) nos sirven como datos para poder encontrar el peso general del exoesqueleto, sumándole los pesos de los motores, grupo de baterías y la carga de levante, obteniendo el peso total inicial del exoesqueleto en la ecuación (3)

$$Ptot = (nm * Pm + Pb + Plift + Mest0) * g \quad (3)$$

$$Ptot = (6 * 1.5291 (kg) + 1.5(kg) + 25(kg) + (3.6490kg)) * 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$Ptot = 385.7641 \text{ N}$$

El peso obtenido para el exoesqueleto optimizado se muestra en el resultado de la ecuación (4)

$$Ptop = (nm * Pm + Pb + Plift + Mest1) * g \quad (4)$$

$$Ptop = (6 * 1.5291 (kg) + 1.5(kg) + 25(kg) + (2.1528 \text{ kg})) * 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$Ptop = 371.0898 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta:

- Longitud del eje del motor (L1) de 8 cm = 0.08m
- Velocidad horizontal del hombro (w1) de $\pi/6$ (rad/s)
- Velocidad vertical del hombro (w2) de $\pi/4$ (rad/s)
- Velocidad vertical del codo (w2) de $\pi/4$ (rad/s)

Continuando con el análisis matemático para el diseño del exoesqueleto, tenemos en consideración la ventaja mecánica la cual indica la amplificación de la fuerza aplicada mediante un mecanismo (exoesqueleto), dándonos así un valor adimensional. Para ello tenemos en cuenta los parámetros planteados en la Tabla 9.

Tabla 9

Tabla de variables para el análisis de motores

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	VALOR
Wlift	Carga máxima de levante	Kg	50
Pap	Carga mínima de levante	Kg	25
Fm	Peso del motor	N	10
LAC	Distancia de hombro a punto aplicación de carga	m	0.28
LAB	Distancia de articulación del codo hasta aplicación de carga	m	0.15
RT	Relación de transmisión	Adimensional	47

Encontramos la Fuerza aplicada en el exoesqueleto, siendo este el resultado de la ecuación (5)

$$F = Pap(kg) * g \left(\frac{m}{s^2} \right) \quad (5)$$

$$F = 25(kg) * 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$F = 245.25N$$

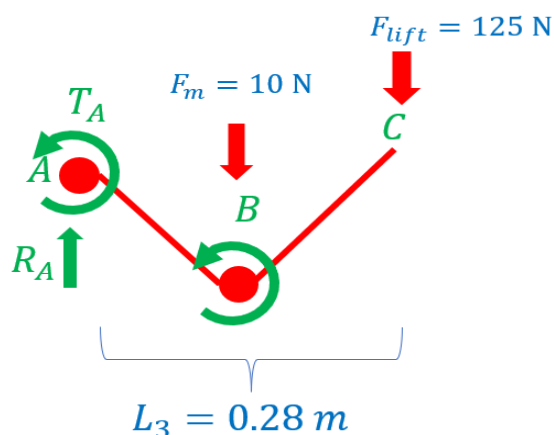
Esta fuerza es nos será de utilidad para poder hallar los torques relacionados con cada articulación y así también poder simular el exoesqueleto para referenciar los puntos de quiebres y el factor de seguridad de la estructura optimizada.

4.6.1. Torque en la articulación del hombro:

Para estimar los motores necesarios se realizó un análisis con diagramas de cuerpo libre estimando los torques necesarios para cada articulación. En la figura 16 se muestra el diagrama de cuerpo libre del torque en la articulación A

Figura 16

Diagrama de cuerpo libre Torque en hombro



El torque requerido para estimar el torque mínimo brindado por motor de la articulación del hombro se presenta mediante el resultado de la ecuación (6)

$$T_A = (Fm * L_2) + (F_{lift} * L_3) Nm \quad (6)$$

$$T_A = 40Nm$$

Teniendo un torque de 40 Nm, estimamos una velocidad de movimiento de dos segundos en la articulación la cual se indica en radianes mediante la ecuación (7).

$$\omega_r = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2} = \frac{\pi}{4} = 20.95 \text{ rad/s} \quad (7)$$

Es así que la velocidad angular mínima necesaria para mover la articulación se determina despejando la ecuación (8)

$$T_m \omega_m = T_r \omega_r \quad (8)$$

$$\omega_m = \frac{T_r \omega_r}{T_m} = 0.7854 \text{ rad/s}$$

Mediante la velocidad angular de la articulación y la velocidad angular estimada promedio podemos determinar una relación de reducción

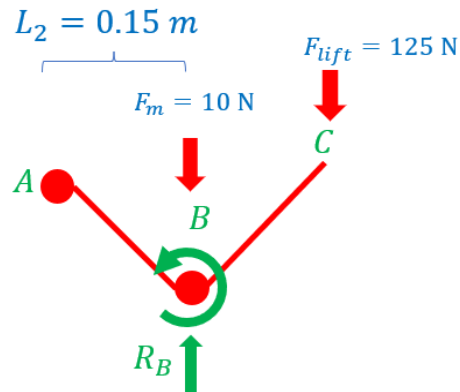
$$r = \frac{20.95}{0.7854} = 26 \quad (9)$$

4.6.2. Torque en la articulación del Codo:

Para estimar los motores necesarios en la articulación B se realizó un análisis con diagramas de cuerpo libre estimando los torques necesarios para cada articulación. En la figura 17 se muestra el diagrama de cuerpo libre del torque en la articulación B

Figura 17

Diagrama de cuerpo libre Torque en Codo



El torque requerido para estimar el torque mínimo del motor de la articulación del Codo se calcula mediante la ecuación (10)

$$T_B = (F_{lift} * L_2)Nm \quad (10)$$

$$T_B = 18.75Nm$$

Teniendo un torque de 18.75 Nm, estimamos una velocidad de movimiento de dos segundos en la articulación la se transforma en radianes mediante la ecuación (11)

$$\omega_r = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2} = \frac{\pi}{4} = 0.7854 \text{ rad/s} \quad (11)$$

Es así que la velocidad angular mínima necesaria para mover la articulación se determina despejando la ecuación (12)

$$T_m \omega_m = T_r \omega_r \quad (12)$$

$$\omega_m = \frac{T_r \omega_r}{T_m} = 9.81 \text{ rad/s}$$

Mediante la velocidad angular de la articulación y la velocidad angular estimada promedio podemos determinar una relación de reducción

$$r = \frac{18.75}{0.7854} = 23.87 \quad (13)$$

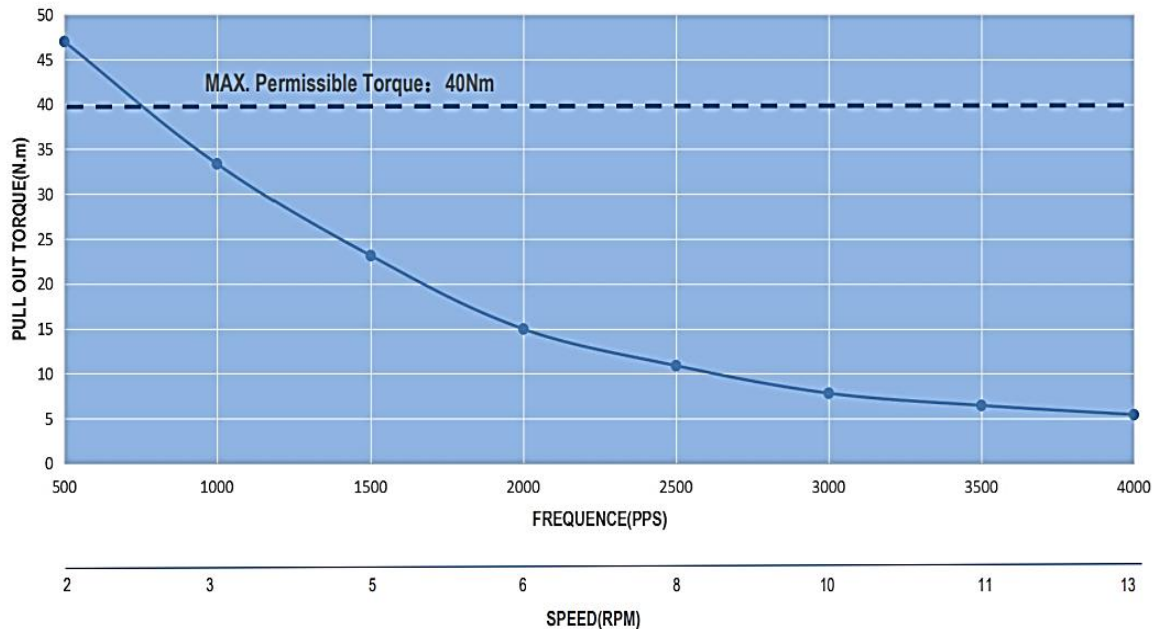
Con estos datos hemos determinado que para la articulación del hombro es necesario un motor paso a paso con un torque de 40 Nm y una relación de reducción de 26:1. Para la articulación del codo un motor con un torque mínimo de 19Nm y una relación de reducción de 24:1

4.6.3. Análisis paramétrico de articulación A:

Para poder determinar los parámetros del motor en la articulación A empezamos basándonos de la gráfica del motor modelo: 23HS30-2804S-PG 47 (2.8A, 24V Half Step), la cual tiene una relación de RPM VS Torque como se muestra en la Figura 18 y nos servirá para el modelamiento del A.

Figura 18

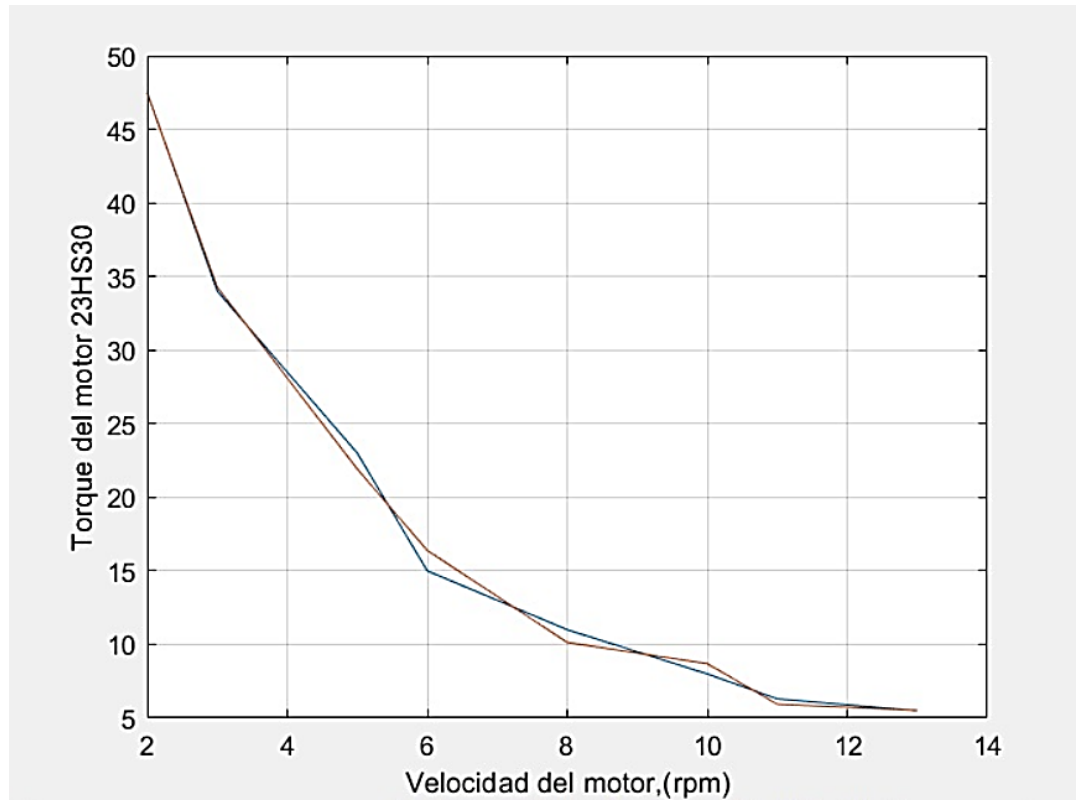
Grafica de torque permisible



Al trasladar la imagen al programa Matlab, tomamos los puntos referentes la velocidad (rpm) y torque en una razón de 2 en un intervalo desde 2 a 14 en velocidad, mostrándolo en la Figura 19

Figura 19

Grafica de ajuste de curva de torques permisibles



En la cual se pudo encontrar la ecuación (14) que define a dicha gráfica de mejor manera

$$0.0016 * fr^6 - 0.0712 * fr^5 - 1.2393 * fr^4 - 10.8673 * fr^3 + 51.0276 * fr^2 - 128.4016 * fr + 169.3963 \quad (14)$$

Siendo fr la velocidad angular del motor (rpm), pudiendo transformar así las velocidades de RPM a rad/s, obteniendo:

- Velocidad angular del motor:

$$wm = fr * \frac{\pi}{30} \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (15)$$

- Velocidad del actuador:

$$vc = el. \text{ \u00e1ngular en } A * Long. de AB \text{ (rad * m/s)} \quad (16)$$

- Eficiencia:

$$Pe = 2.8A * 6V$$

$$Pm = Pb \text{ (w)}$$

$$\eta = \frac{Pm}{Pe} \text{ (Adimensional)} \quad (17)$$

Mediante estas f\u00f3rmulas podemos tener la base de referencia para el accionamiento de los motores de la articulaci\u00f3n A, asimismo una comparaci\u00f3n con diferentes rangos como potencia, eficiencia, ventaja mec\u00e1nica y velocidad del actuador.

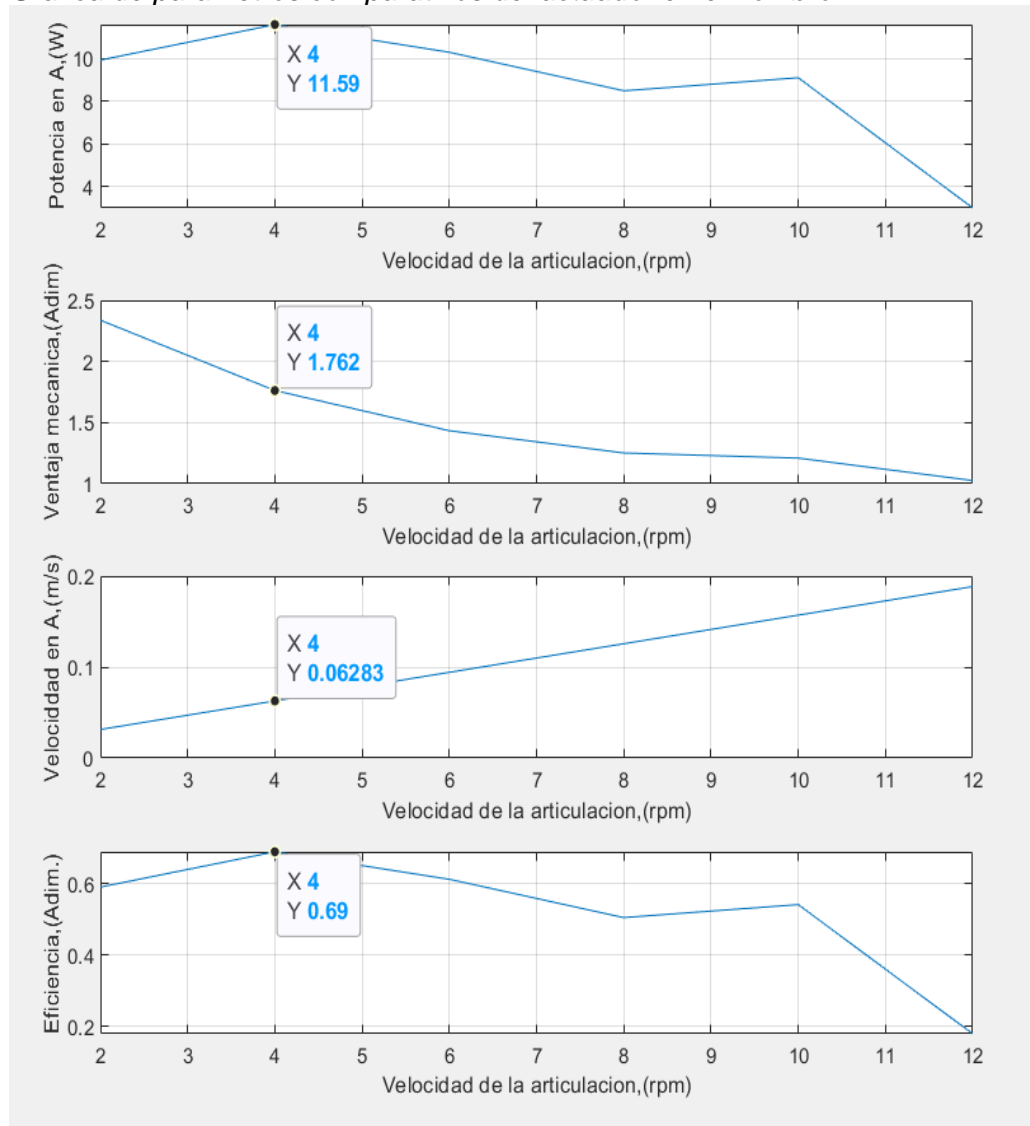
Definido ya los valores, se program\u00f3 los par\u00e1metros de potencia en el eslab\u00f3n A, ventaja mec\u00e1nica y velocidad de es eslab\u00f3n A; con respecto a la velocidad de la articulaci\u00f3n, planteando la gr\u00e1fica de la Figura 20

4.6.1. An\u00e1lisis param\u00e9trico de articulaci\u00f3n B:

Para poder obtener los par\u00e1metros del motor en el eslab\u00f3n B empezamos bas\u00e1ndonos de la gr\u00e1fica del motor modelo: 23HS22-2804S-PG47, la cual tiene una relaci\u00f3n de RPM VS Torque de la Figura 21 y nos servir\u00e1 para el modelamiento de el eslab\u00f3n B.

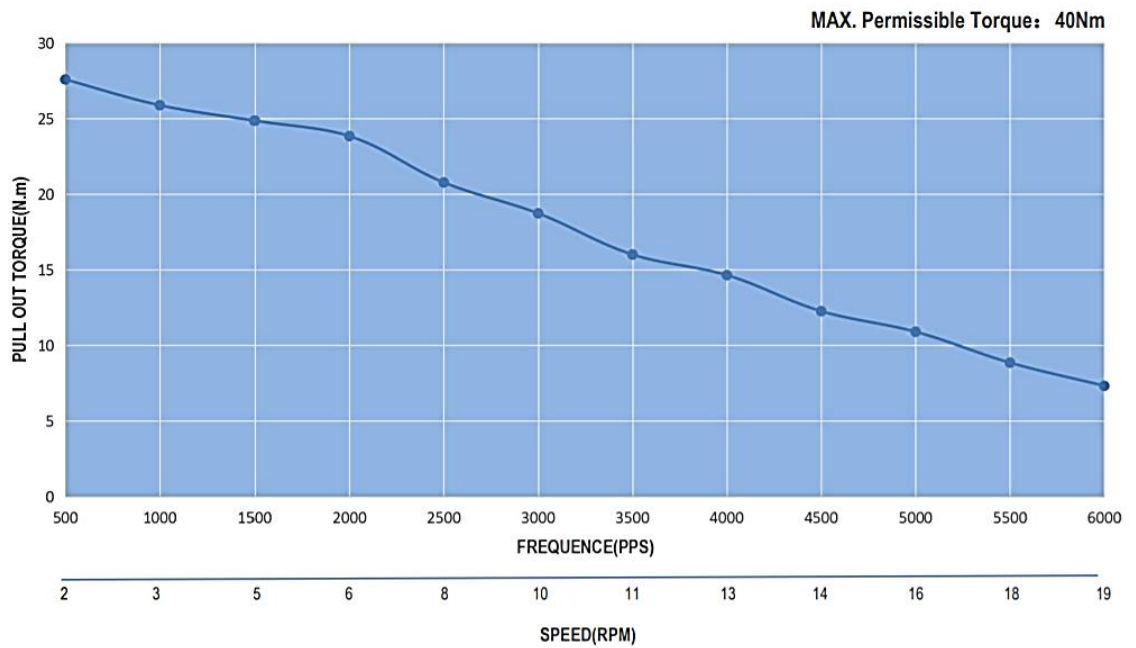
Figura 20

Grafica de parámetros comparativos del actuador en el hombro



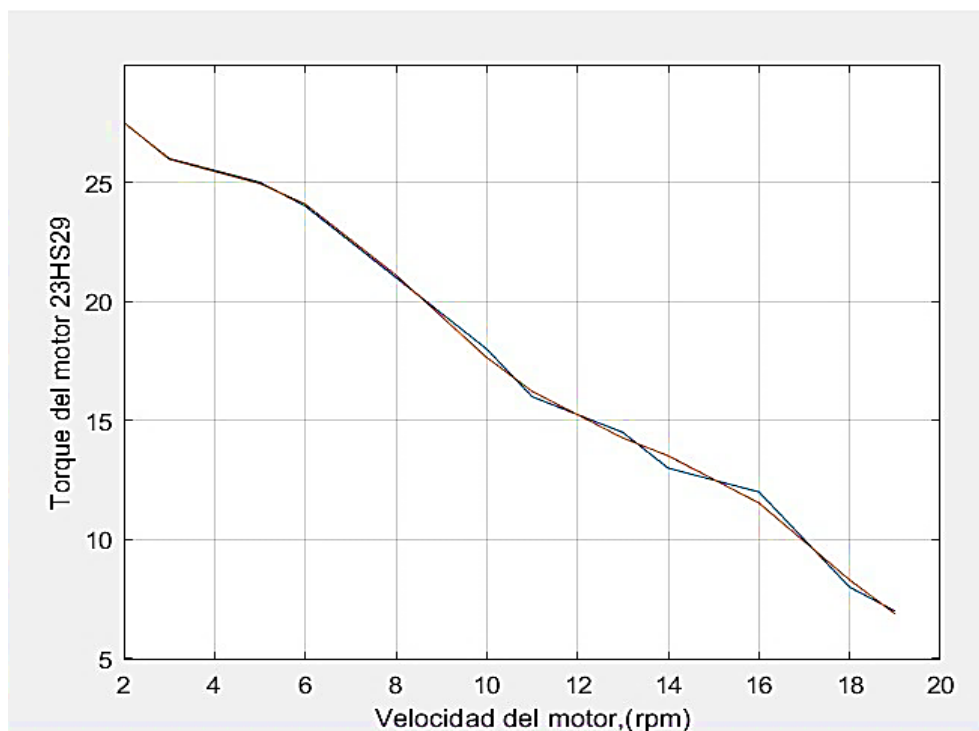
Mediante las gráficas obtenidas podemos observar que respecto a la velocidad que necesite moverse la articulación es conveniente utilizar bajas velocidades para poder obtener mejores resultados tanto de ventaja mecánica y eficiencia. Es por eso que estableciendo una velocidad de la articulación de 4 rpm podemos obtener una ventaja mecánica de 1.76 con una eficiencia de 0.6 y que al establecer una velocidad de 3 rpm podemos incrementar la ventaja mecánica a 2.1 pero reducimos la eficiencia obtenida a 6.1.

Figura 21
Gráfica de torque permisible



Al trasladar la imagen al programa Matlab, tomamos los puntos referentes la velocidad (rpm) y torque en una razón de 2 en un intervalo desde 2 a 14 en velocidad, dándonos la Grafica en la Figura 22

Figura 22
Gráfica de ajuste de curva de torques permisibles



En la cual se pudo encontrar la ecuación (17) que define a dicha gráfica.

$$3.6799 * 10^{-5} * fr^6 - 0.0024 * fr^5 + 0.0610 * fr^4 - 0.7451 * fr^3 + 4.4980 * fr^2 - 13.3631 * fr + 41.3153 \quad (18)$$

Siendo fr la velocidad angular del motor (rpm), pudiendo transformar así las velocidades de RPM a rad/s, obteniendo:

- Velocidad angular del motor:

$$wm = fr * \frac{\pi}{30} \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (19)$$

- Velocidad del actuador:

$$vc = el. \text{ angular en } B * Long. \text{ de } BC \text{ (rad * m/s)} \quad (20)$$

- Eficiencia:

$$Pe = 2.8A * 9V$$

$$Pm = Pb (w)$$

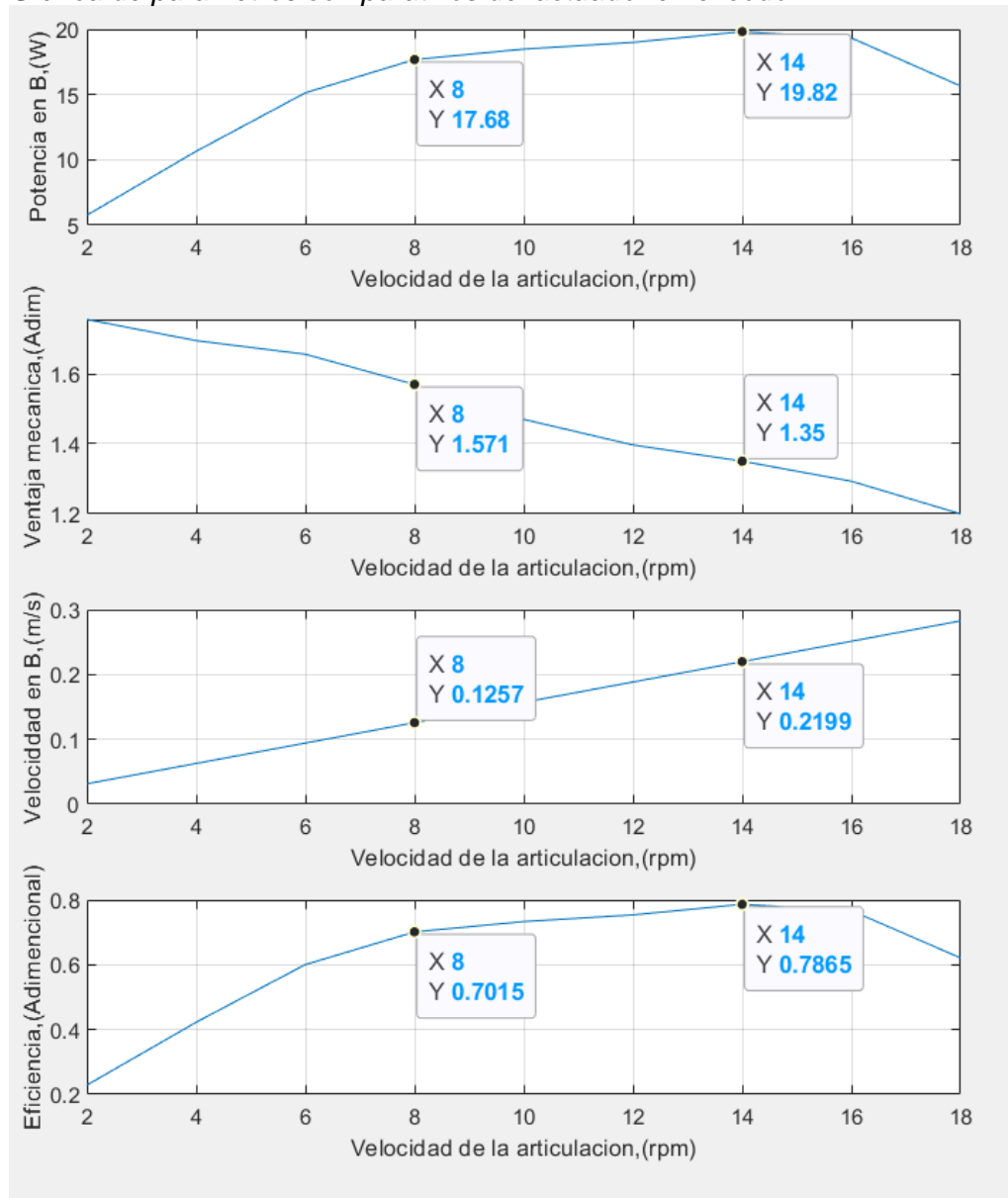
$$\eta = \frac{Pm}{Pe} \text{ (Adimensional)} \quad (17)$$

Mediante estas fórmulas podemos tener la base de referencia para el accionamiento de los motores de la articulación B, asimismo una comparación con diferentes rangos como potencia, eficiencia, ventaja mecánica y velocidad del actuador.

Definido ya los valores, se programó los parámetros de potencia en el eslabón A, ventaja mecánica y velocidad de es eslabón A; con respecto a la velocidad de la articulación mostrando la gráfica en la Figura 23.

Figura 23

Gráfica de parámetros comparativos del actuador en el codo.



En base a la gráfica obtenida podemos observar que a comparación de la gráfica mostrada en la figura 20, la gráfica de la figura 23 nos muestra que a mayor velocidad del actuador podemos ganar mayor potencia y mayor eficiencia. A una velocidad de 14 podemos observar que es donde se establecen sus valores más elevados de potencia y eficiencia, pero para poder ganar mayor ventaja mecánica se establece la velocidad de 2 rpm. Es por eso que establecimos como velocidad a utilizar en el actuador de 8 rpm para poder mantener una eficiencia

aceptable de 0.70 sin perder ventaja mecánica la cual nos resulta de 1.57.

4.7. Análisis cinemático y dinámico del exoesqueleto

Para el análisis cinemático fue necesario establecer las medidas de los eslabones que componen el exoesqueleto, estas medidas se han tomado de los datos recolectados en el Anexo 5. En la Figura 20 se muestra un bosquejo de la ubicación de los eslabones y articulaciones que forman el exoesqueleto. En la Tabla 10 se encuentra las medidas de los eslabones según la denominación de la Figura 24.

Figura 24

Bosquejo de la estructura del exoesqueleto

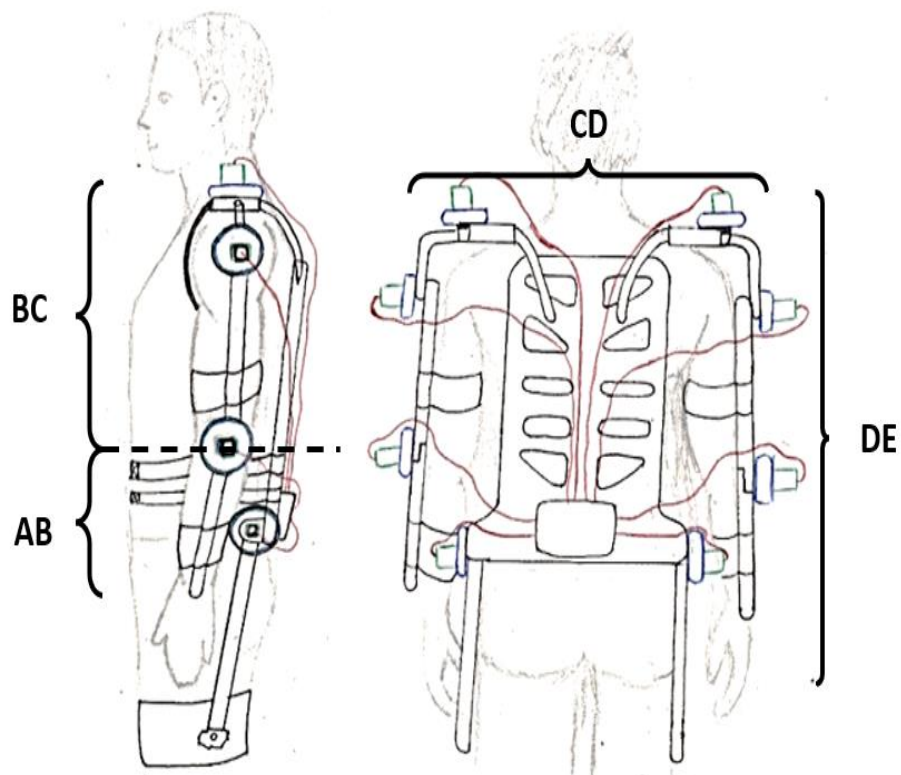


Tabla 10

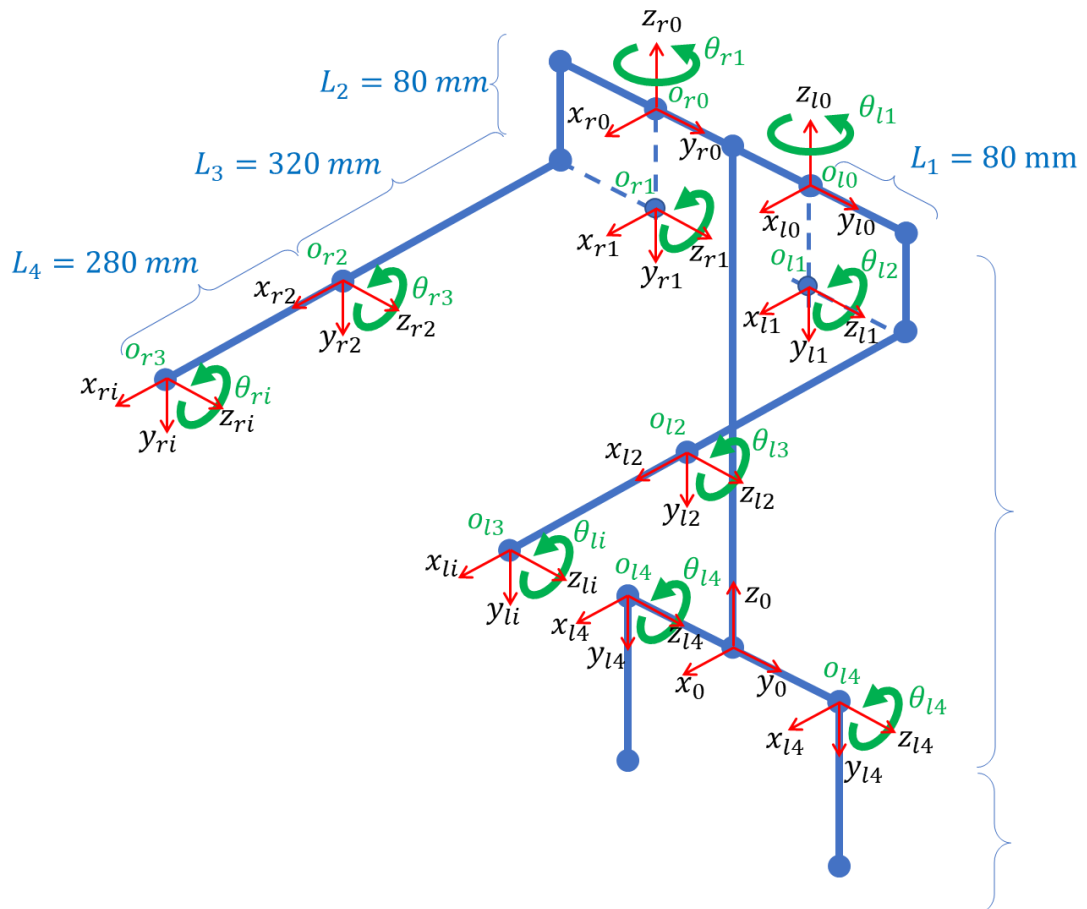
Medida de los eslabones de cada brazo del exoesqueleto

Eslabón	Valor	Unidad
AB	280	mm
BC	320	mm
CD	490	mm
DE	550	mm

En la Figura 25 se encuentra las coordenadas de los elementos del exoesqueleto mediante las cuales se realizará el análisis cinemático teniendo en cuenta cada grado de libertad con un eje de coordenadas y los grados de movimiento que se tendrá.

Figura 25

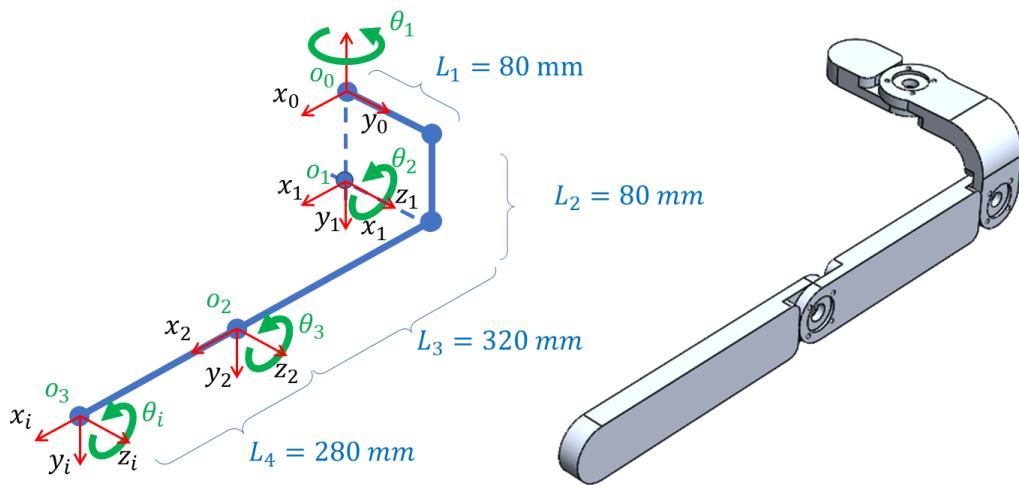
Coordenadas de los elementos del exoesqueleto



Como el exoesqueleto propuesto posee 8 grados de libertad (4 por cada lado) y además el control de fuerza se centrará en las tres articulaciones de cada brazo se ha decidido dividir el análisis por cada uno de los brazos. De esta manera se tiene la representación de solo brazo en la Figura 26, donde también se puede apreciar el modelo en 3D del brazo. En el proceso de análisis del brazo del exoesqueleto se empleó el modelo 3D con las dimensiones correctas para cada eslabón.

Figura 26

Coordenadas de los elementos de un solo brazo del exoesqueleto



Con la Figura 26 se puede determinar los parámetros de Denavit-Hartenberg (DH) que sirven para realizar la cinemática directa del brazo del exoesqueleto. En la Tabla 11 se muestra los parámetros DH para los 3 grados de libertad que posee el brazo.

Tabla 11

Parámetros DH para el brazo del exoesqueleto

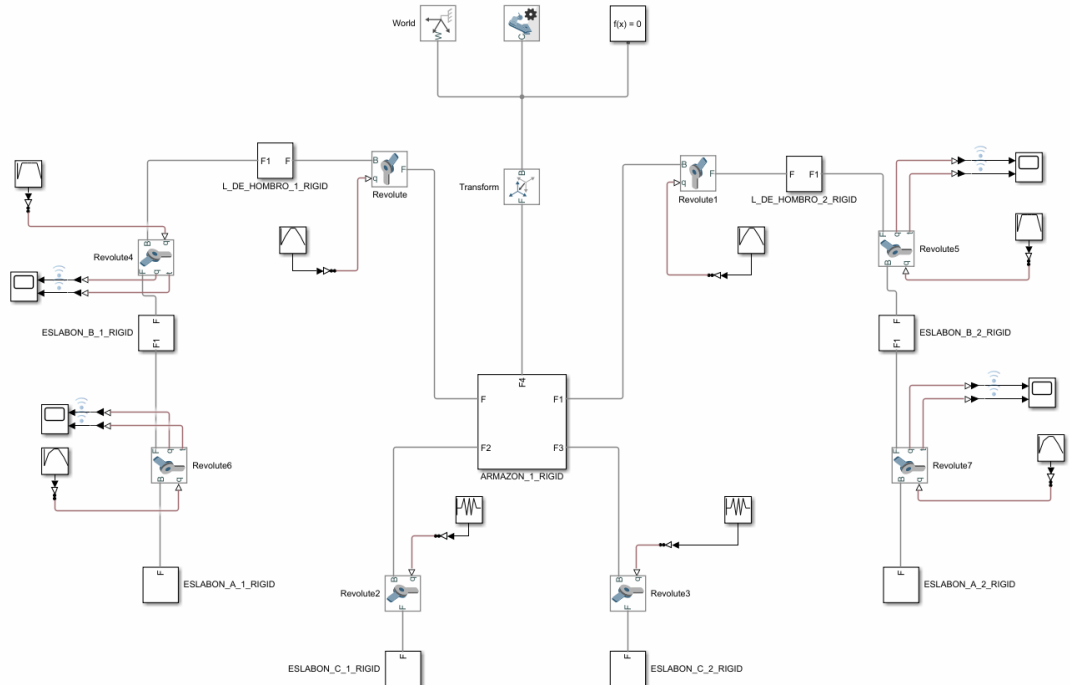
	x		z	
	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	270	$-L_2$	θ_1
2	L_3	0	L_1	θ_2
3	L_4	0	0	θ_3

Con los parámetros DH se elaboró la matriz de transformación homogénea.

En la Figura 27 se puede ver el modelo Exoesqueleto en Simscape donde cada articulación está relacionada con un elemento llamado Revolute. En estos elementos se define el movimiento rotacional del brazo, la vez que permite medir y graficar el resultado del movimiento. Para poder obtener este diagrama se utilizó el complemento de simulink el cual permite exportar un diseño desde el programa SolidWorks a Matlab para el cual una vez exportado permite, mediante las relaciones de posición definidas desde el modelo CAD, crear sistemas de referencia de movimiento rotacional llamadas revolutes. Los revolutes nos permiten indicar el grado de libertad de cada articulación del exoesqueleto además que en conjunto nos permite simular el movimiento que realizaría el operario usando el exoesqueleto al elevar, transportar y soltar una carga.

Figura 27

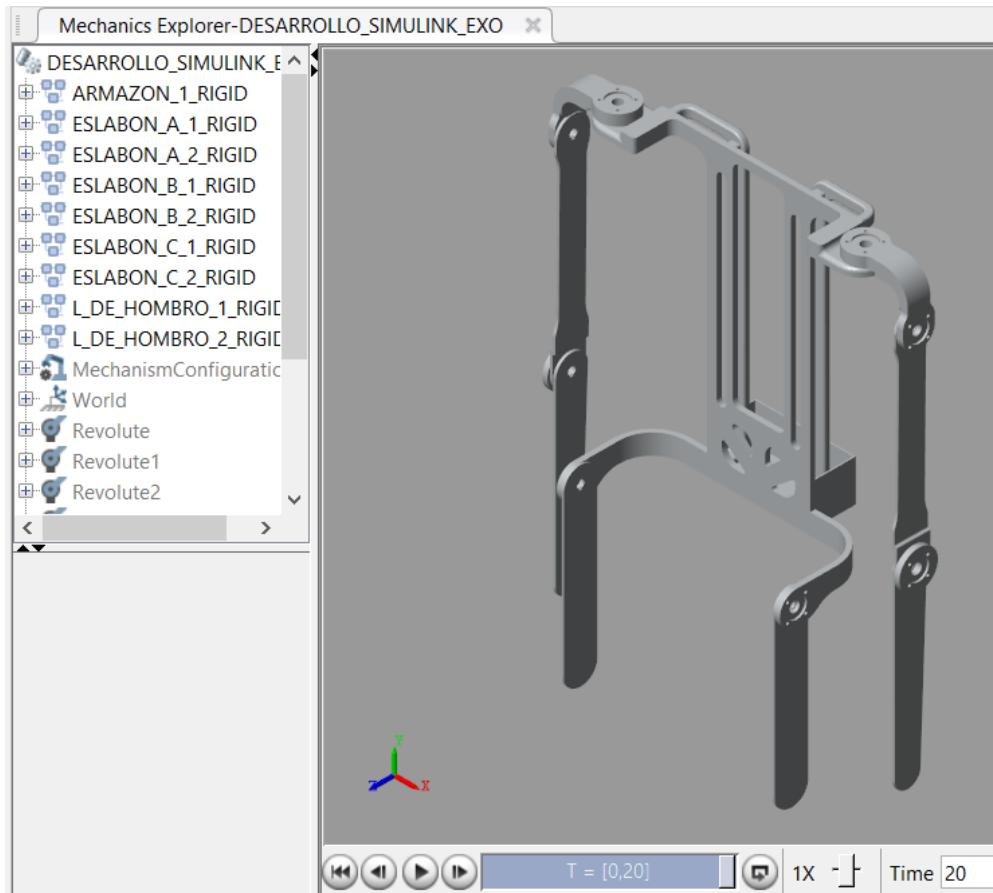
Diagrama de simulación dinámico del exoesqueleto



En la Figura 28 se muestra el modelo del brazo robótico con todos los elementos necesarios para la simulación del mismo.

Figura 28

Modelo en Simscape multibody



Para visualizar el comportamiento del exoesqueleto durante el movimiento que realizaría el operario al momento de elevar y dejar una carga se inició la simulación mostrando la el movimiento ingresando la rotación de cada articulación del exoesqueleto en la figura 29 en la cual se muestra una posición que tomaría el exoesqueleto al momento de su uso y en la figura 30 se obtuvieron los resultados de torque y posición para poder realizar ese movimiento de la articulación del codo y el hombro sin considerar la carga a elevar.

Figura 29

Posición de movimiento del exoesqueleto

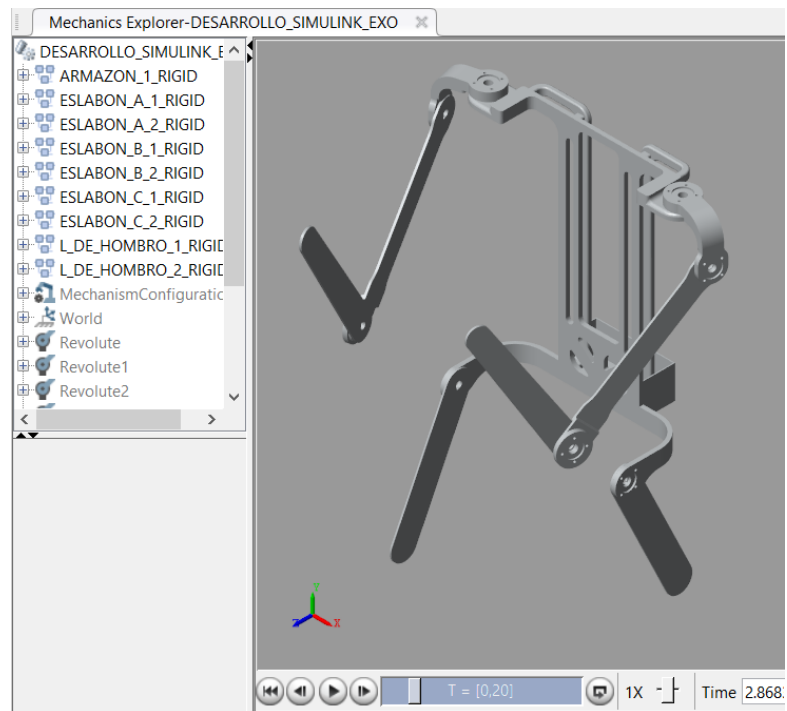
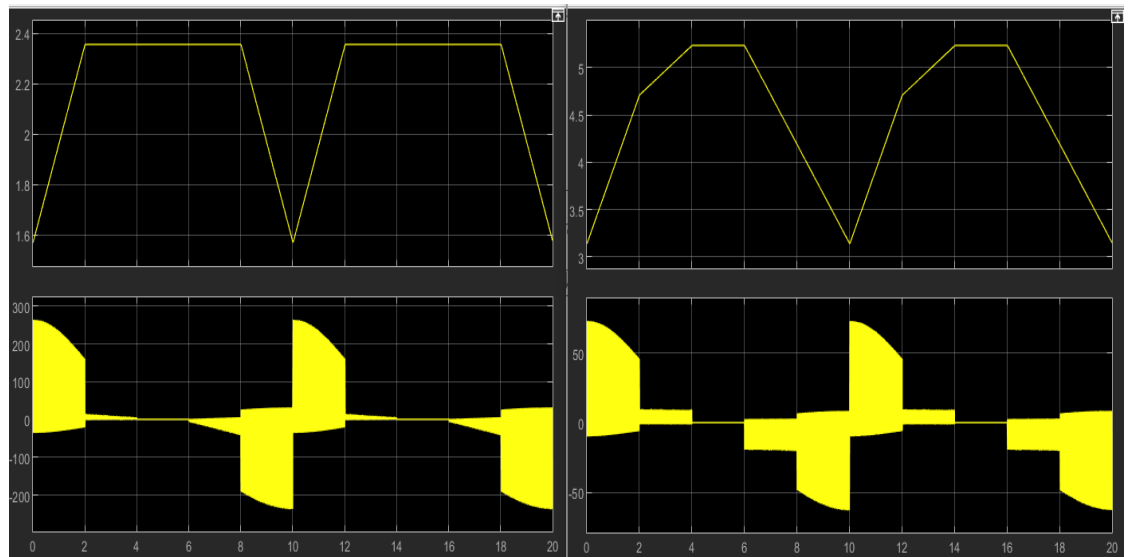


Figura 30

Grafica de Posición y Torque de la articulación del hombro y el codo

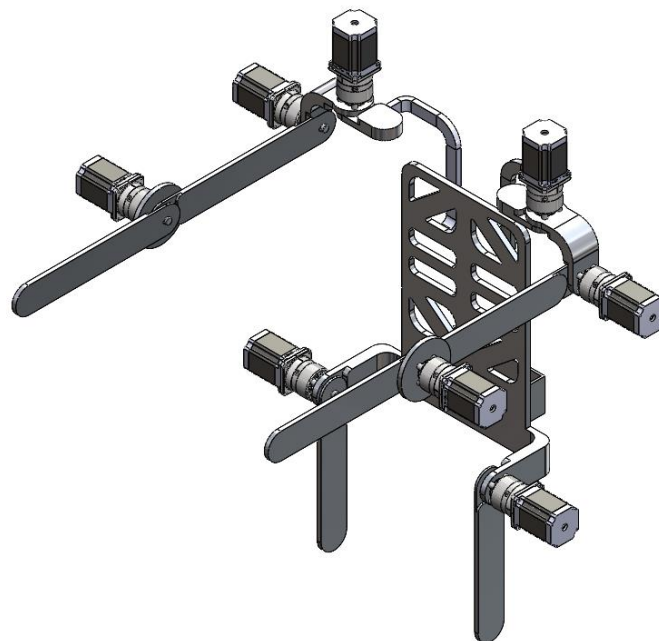


4.8. Modelado y simulación estructural del exoesqueleto

Con el objetivo de verificar el diseño desarrollado para el exoesqueleto se ha realizado el modelado y simulación de todo el equipo en cual se puede ver en la Figura 31. En la misma figura se puede observar que existe un motor paso a paso por cada grado de libertad, además de que cada uno de ellos cuenta con una caja reductora para aumentar el torque de salida.

Figura 31

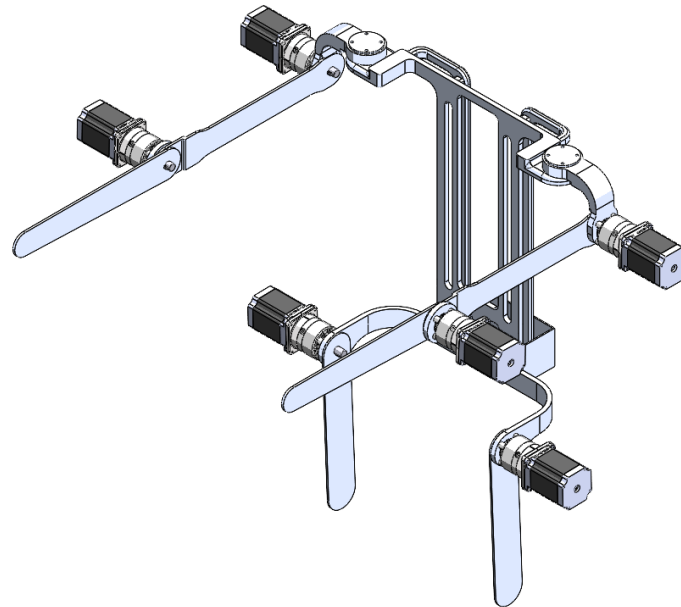
Primer Modelo 3D de exoesqueleto.



Este primer diseño de la Figura 31 se empleó para determinar el factor de seguridad mínimo del equipo, y se observó que el factor de seguridad era menor al esperado, esto debido a que el peso de la estructura era muy alto, aproximadamente 10 kg. Para obtener un nuevo diseño más ligero se tuvo que optimizar el peso de la estructura para lo cual se empleó el software de simulación y mediante simulaciones sucesivas se obtuvo el diseño de la Figura 32, aquí el peso de la estructura es de 5 kg.

Figura 32

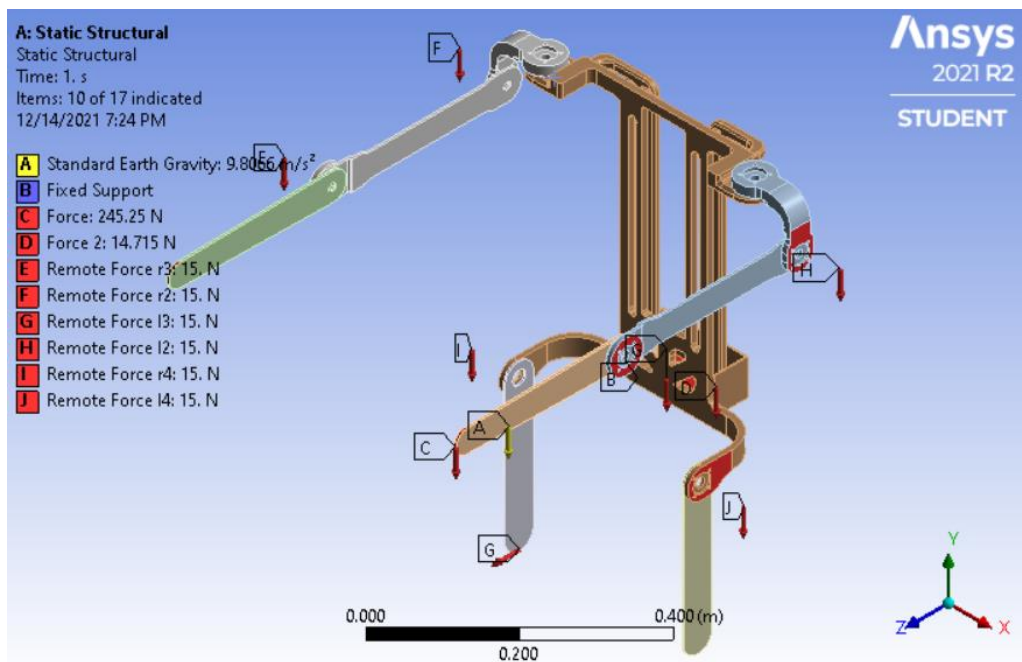
Modelo 3D optimizado del exoesqueleto.



Para análisis del diseño optimizado se sustituyó el peso de cada motor con su caja reductora por una carga aplicada desde la ubicación del centro de masa de cada motor hacia la articulación como se puede ver en la Figura 33.

Figura 33

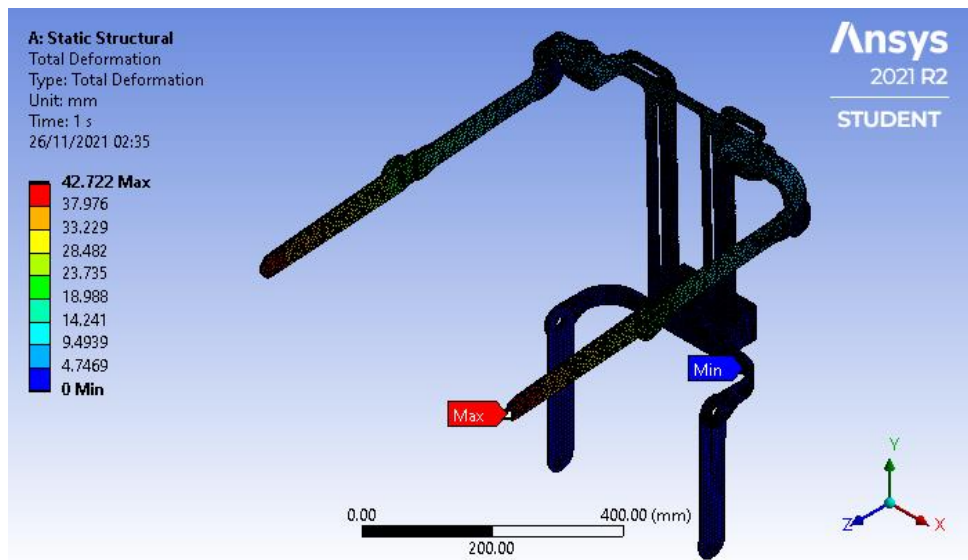
Aplicación de cargas la simulación por FEM.



En la Figura 34 se puede ver los resultados de la simulación para los esfuerzos, los cuales como es evidente se centran en la articulación del hombro donde el valor máximo es de 615.37 MPa.

Figura 34

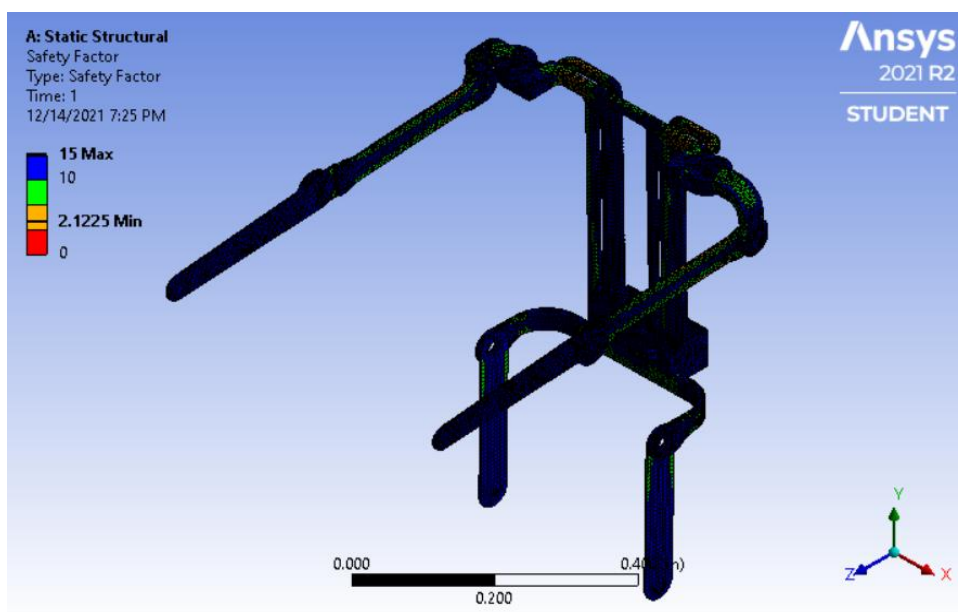
Esfuerzos de Von Mises.



En la Figura 35 se puede ver que con el ajuste del diseño se elevó el factor de seguridad del primer diseño de 0.8 a un factor de seguridad más óptimo de 2.12

Figura 35

Factor de Seguridad.



4.9. Diseño del sistema de Control

El funcionamiento del exoesqueleto en base a las necesidades del operario para poder elevar y mantener una carga se dividió en dos principales funciones. La primera es la función de asistencia o sustitución de fuerza mediante la cual se establece que el exoesqueleto realizara el esfuerzo para levantar la carga sin que el operario utilice su propia fuerza durante el proceso, haciendo que todo el trabajo sea recibido por el exoesqueleto. Como segunda opción tenemos la función de multiplicación de fuerza la cual establece que el operario podrá elevar una carga pesada utilizando su fuerza combinada con la fuerza ejercida por los motores del exoesqueleto, pudiendo logra el operario elevar una carga mayor que actuando por sí solo.

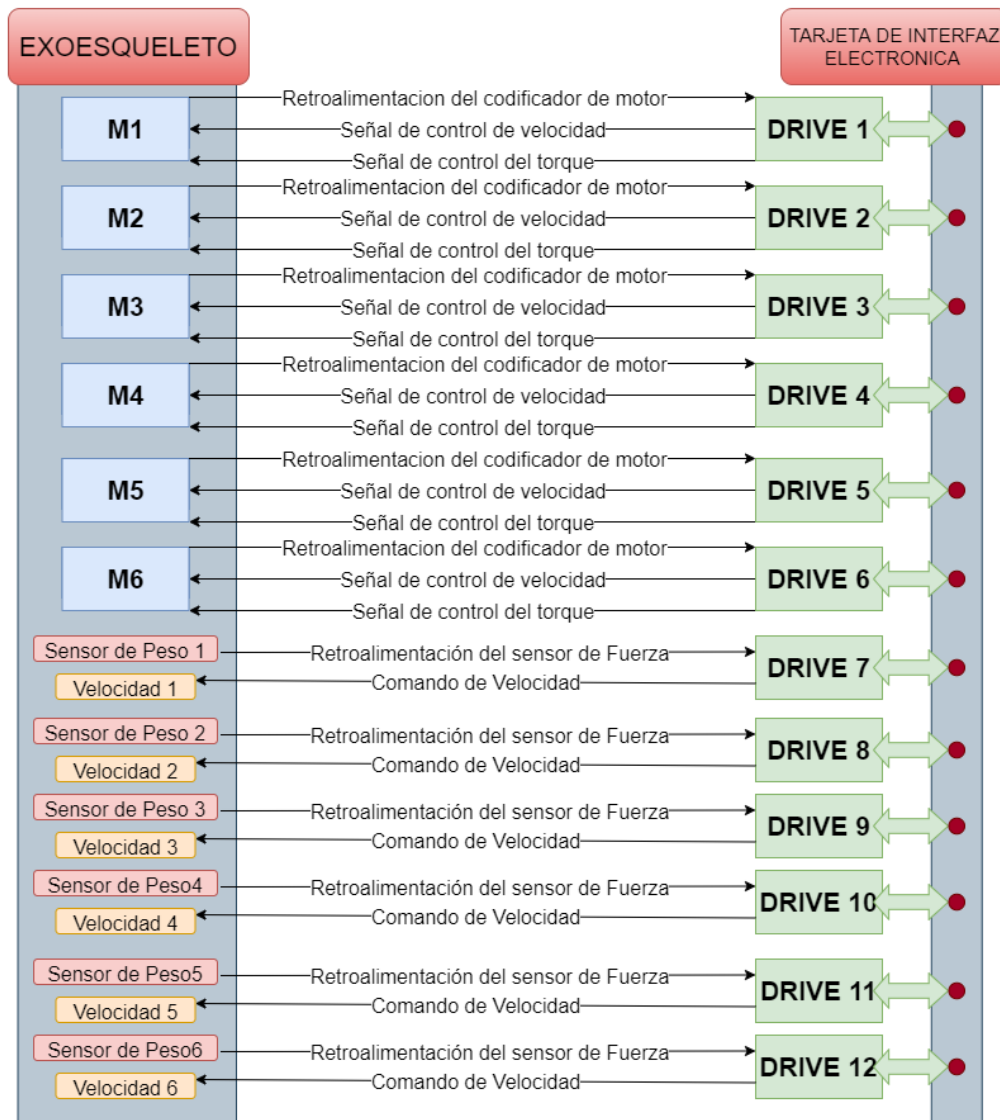
El desarrollo del presente exoesqueleto debe cumplir con los requerimientos de carga en sus modos de funcionamiento: multiplicador de fuerza y sustitución de fuerza.

Para ello se necesita que el exoesqueleto brinde el apoyo necesario. Esto se logra cumplir con un sistema de control mediante el cual se encuentran los motores Paso a paso Nema 23 con su caja de reducción de engranajes y su respectivo driver a los cuales se les enviara la señal y actuaran dependiendo la orden dada. Sensores tanto de fuerza como acelerómetros para poder determinar la fuerza ejercida en cada articulación y la velocidad de movimiento. Una placa de mando mediante la cual se trabajará un sistema de control proporcionando las señales que se requieren.

En la Figura 36 se muestra un diagrama de bloques de los equipos que componen el sistema eléctrico de un exoesqueleto de extremidades superiores realizado por la

Figura 36

Sistema eléctrico del exoesqueleto



Nota: Sistema de control de nuestro exoesqueleto tomando de referencia el modelo de control del exoesqueleto AGoRA

En la Figura 37 se muestra un esquema de los componentes eléctricos principales utilizados en el exoesqueleto diseñado.

Figura 37

Sistema eléctrico del exoesqueleto

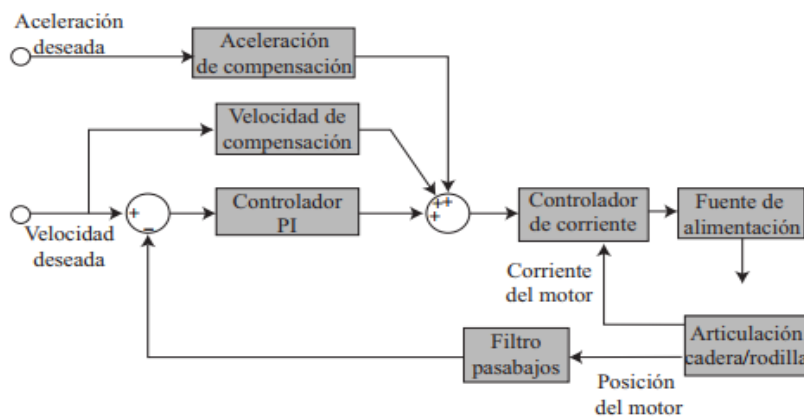


Nota: Modelo de instrumentos utilizados para el sistema de control del exoesqueleto basado en el encontrado del exoesqueleto AGoRA

El diagrama de control de la Figura 38 muestra como la información es procesada por la unidad de control (Arduino o RaspberryPi) para controlar el movimiento mediante controladores de aceleración de los eslabones del exoesqueleto.

Figura 38

Diagrama de control del exoesqueleto



Tomado de *Desarrollo E Implementación De Un Exoesqueleto De Miembro Inferior En Actividades De La Vida Diaria*. (p.47). Por Arciniegas Luis, 2020.

4.10. Selección de componentes

Después de haber analizado la cinemática del exoesqueleto se completó el diseño con la selección de los componentes estándar en los que se incluyen los motores, drivers, caja reductora y barras de aluminio necesarias para la implementación de este diseño.

4.10.1. Motores

Del diseño conceptual sabemos que los actuadores deben ser eléctricos, por tal razón se optó por usar motores paso a paso ya que estos presentan ventajas como alto torque, gran precisión y buena relación tamaño y potencia. En la Figura 39 se muestran las especificaciones básicas del motor seleccionado y el Anexo 8 se encuentra el Datasheet completo además de las dimensiones.

Figura 39

Stepper Nema 23



Características eléctricas

Tipo de motor	Bipolar
Ángulo de motor	1.8°
Par de retención (Holding Torque)	1.8 Nm (254 oz/in)
Corriente nominal / fase	4.2A
Resistencia de fase	0.6ohms
Tensión recomendada	2.5V
Inductancia	2.2mH ± 20%(1KHz)

Especificaciones físicas

Tamaño del marco	57 x 57mm
Longitud	78mm
Diámetro del eje	Ø7.5mm
Longitud del eje	21mm
Longitud de corte en D	18mm
Número de derivaciones	4
Longitud del cable	300mm

Nota: Adaptado de Stepper Nema 23 por XFOYO Electric C.O, 2021.

Alibaba (<https://bit.ly/3z3kfTE>)

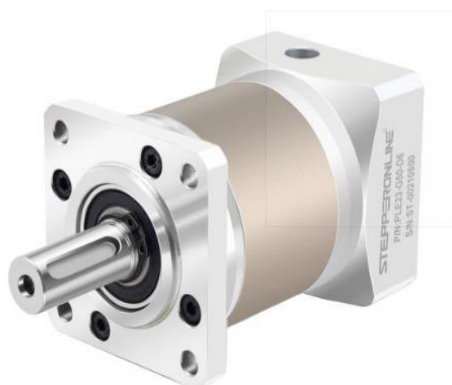
4.10.2. Caja reductora

Para el uso de los motores paso a paso se optó por utilizar una caja reductora o más conocida como Planetary GearBox el cual nos permite

distribuir las cargas que se generan en los ejes y aumentar la eficiencia en el uso de los motores. En la Figura 40 se muestra las especificaciones básicas De la caja reductora y el Anexo 8 se encuentra Datasheet completo además de las dimensiones.

Figura 40

Gear Box Stepper Nema 23



Product Type	PLE Series Planetary Gearbox
Frame Size(mm)	60 x 60
Suit for Motor	Nema 23
Gearbox Type	PLE Series
Gear Ratio	50
Backlash at No-load	<=20 arcmin
Output Shaft Type	Keyway Shaft
Weight(g)	1200

Nota: Adaptado de PLE Series planetary gearbox por Stepper online, 2021.
omc-stepper online (<https://bit.ly/32EiD6C>)

4.10.3. Drivers de potencia

Para el uso de los motores se requieren drivers para poder controlar el funcionamiento de cada uno los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta el Valor de Amperaje de 4.2A y 2.5 VDC del motor mostrados en el anexo 07. En la figura 41 se muestra la imagen referencial del modelo de driver a utilizar.

Figura 41

Driver de potencia DM542



Parameters	DM542T			
	Min	Typical	Max	Unit
Output Peak Current	1.0	-	4.2 (3.0 RMS)	A
Input Voltage Logic	+20	+36	+50	VDC
Signal Current Pulse	7	10	16	mA
input frequency Pulse	0	-	200	kHz
Width	2.5	-	-	uS
Isolation resistance	500			MΩ
Cooling	Natural Cooling or Forced cooling			
	Environment		Avoid dust, oil fog and corrosive gases	
Operating Environment	Ambient Temperature		0°C – 65°C	
	Humidity		40%RH – 90%RH	
	Operating Temperature		- 10°C – 45°C	
	Vibration		10-50Hz / 0.15mm	
Storage Temperature	-20°C – 65°C			
Weight	Approx. 210g (7.4oz)			

Nota: Adaptado Driver de potencia DM542T por Stepper online, 2021. omc-stepper online (<https://bit.ly/3pva86O>)

4.10.4. Material de la estructura

4.10.4.1 Planchas de aluminio

La estructura el exoesqueleto se diseñó para ser construida con aluminio 6061 T6 debido a las características físicas que posee como se muestra en el anexo 09. En la figura 42 se muestra la imagen referencial del aluminio.

Figura 42

Placa de aluminio 6061



Nota: Adaptado de lámina de aleación de aluminio 6061 T6 por Sino Steel, 2021. Alibaba (<https://bit.ly/3EKne4N>)

4.10.4.2 Fibra de Kevlar

La fibra de poliparafenileno tereftalamida o más conocido como kevlar es el material seleccionado para moldear algunas partes del exoesqueleto debido a sus características de alta resistencia a la tracción. En la figura 43 se muestra fibra de kevlar utilizado para chalecos antibalas

Figura 43

Fibra de kevlar utilizado en chalecos antibalas



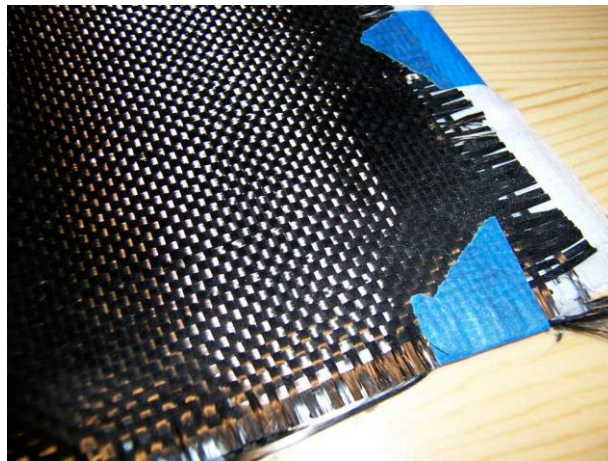
Nota: Adaptado de tejido de fibra de aramida de kevlar por Adesivi Sicurezza, 2021. adesivisicurezza (<https://bit.ly/3HhsA9e>)

4.10.4.1 Fibra de carbono.

Es una fibra constituida de carbono por filamentos de 5 a 10 micrómetros de diámetro. Al ser una fibra sintética es fabricado a base de poliacrilonitrilo. Sus principales características es que sus propiedades mecánicas son como las del acero, pero su ligereza es la misma que la madera.

Figura 44

Fibra de carbono utilizado en chalecos antibalas



Nota: Adaptado de Teña de Fibra de Carbono por Hadhuey, 2021. Wikipedia (https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono)

Para elegir el material a utilizar se planteó un cuadro donde se especifican y comparan las propiedades mecánicas de cada material. Este permite realizar un análisis de cada material para así determinar en base a las características requeridas la mejor opción. La tabla 12 muestra las características mecánicas de cada material

Tabla 12*Propiedades físicas y mecánicas de los materiales.*

Propiedades Físicas y Mecánicas	Aluminio 6061-T6	Fibra de Kevlar	Fibra de Carbono
Densidad	2.70 g/cm ³	1.44 g/cm ³	1.75 g/cm ³
Resistencia a la tracción	310 MPa	525MPa	3.5GPa
Módulo de Elasticidad	68.9 GPa	124GPa	400GPa
Fluencia	276MPa	-	-
Resistencia a la corrosión	Buena	Muy buena	Muy buena
Temperatura de fusión	660 c°	482 c°	3600 c°

En la tabla Número 12 se muestra las propiedades de cada material. Es aquí donde podemos observar que la densidad de la fibra de kevlar es mucho menor por lo cual al realizar la estructura de ese material el peso del exoesqueleto se reduciría casi en un 110% del peso con aluminio. Otra de las características que se observan es la alta resistencia a la tracción que posee la fibra de carbono y el módulo de elasticidad, material el cual permitiría aumentar el Factor de seguridad debido a su alta resistencia. Por los cual se determinó que uno de los materiales a utilizar una estructura a fase de Fibra de kevlar debido a sus parecidas características con el acero y su bajo peso para la estructura.

4.11. Elaborar los planos y el presupuesto total del equipo.

4.11.1.1 Diseño de Detalle

Los planos del exoesqueleto se encuentran en los anexos al anexo 18 donde se muestra el diseño completo de la máquina en diferentes vistas y los componentes que tiene el ensamble completo. En total se realizaron 7 planos que se encuentran listados en la tabla 13.

Tabla 13

Lista de planos del diseño de exoesqueleto

CÓDIGO	PLANO	FECHA
DG-EXO-01	1_ISOMÉTRICO	10/12/2021
DG-EXO-02	2_EXPLOSIONADO	10/12/2021
DG-EXO-03	3_ARMAZON	10/12/2021
DG-EXO-04	4_ESLABON A – ESLABON C	10/12/2021
DG-EXO-05	5_ESLABON B	10/12/2021
DG-EXO-06	6_L DE HOMBRO	10/12/2021
DG-EXO-07	7_PIN DE HOMBRO	10/12/2021

4.11.2. Presupuesto Total

El costo total de inversión se presenta en las tablas donde se detalla el costo total de fabricación del exoesqueleto. En materiales, construcción del chasis y el sistema de potencia el costo total asciende en s/8279.6 y en mano de obra para su construcción asciende a s/3204.00, sumando un total de s/12 033.60.

Tabla 14*Costo del chasis del exoesqueleto*

CHASIS			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO SUB TOTAL
Placas de Aluminio 6061 8mm	1	650.00	650.00
Fibra de Kevlar	1	150.00	150.00
Kit de Moldeado con resina	2	218.00	436.00
Brackets L aluminio	2	85.00	170.00
Electrodo para aluminio	1	145.00	145.00
Rodamiento 5mmx16mmx5mm	25	6.00	150.00
Arandelas	50	0.20	10.00
Perno	15	0.90	13.50
Total			s/1724.50

Tabla 15*Costo del Sistema Eléctrico del exoesqueleto*

SISTEMA ELÉCTRICO			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO SUB TOTAL
Motor Stepper Nema 23	8	150.00	1200.00
Planetary Gear Box Nema 23	6	195.00	1170.00
Planetary Gear Box Nema 23	2	450.00	900.00
Cable flexible calibre 18 Azul	1	10.00	10.00
Cable flexible calibre 18 Rojo	1	10.00	10.00
Total			s/3290.00

Tabla 16*Costo del Sistema de Potencia del exoesqueleto*

SISTEMA DE POTENCIA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO SUB TOTAL
Driver para Nema 23	8	95.40	763.10
Arduboard Mega 2560	1	65.00	65.00

Raspberry	1	225.00	225.00
Sensor de fuerza	6	45.00	270.00
Acelerómetro	6	25.00	150.00
Convertor de voltaje 36v-24v	1	98.00	98.00
Baterías de litio 36v	8	210.00	1680.00
Pulsadores	7	2.00	14.00
Total			s/ 3265.1

Tabla 17

Costo de Mano de obra equipos y servicios generales del exoesqueleto

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO SUB TOTAL
Ensamblaje	1	300.00	300.00
Soldador	1	200.00	200.00
Tornero	1	1500.00	1500.00
SERVICIOS GENERALES			
Doblado	1	120.00	120.00
Costo de Envío	1	354.00	354.00
EQUIPOS			
Torno CNC	1	300.00	300.00
Máquina de Soldar	1	250.00	250.00
Esmeril/ Taladro/ Fresadora	1	300.00	300.00
Amoladora	1	120.00	120.00
Impresora 3D	1	310.00	310.00
Total			s/3754.00

El costo total del exoesqueleto asciende a s/12 033.60 soles y el costo requerido por la empresa es de s/ 2000 soles por lo cual la diferencia de precio es de s/10 033,60 soles. Esta diferencia es muy amplia pero el exoesqueleto cubre todas las características requeridas y más. En comparación al mercado el precio de algunos exoesqueletos asciende a

s/ 18 000 soles lo cual nos indica que en nuestro diseño el costo total se encuentra dentro de otros exoesqueletos en competencia.

V. DISCUSIÓN

El presente trabajo está dirigido a solucionar el problema de desgaste en los operarios por la movilización de cargas pesadas permitidas. En la metodología propuesta se realizó la recolección de requerimientos necesarios para lo cual aplicamos entrevistas a los operarios y jefes de la empresa ETRAL S.A.C. Toda la información recolectada por la entrevista fue procesada para obtener valores y características las cuales son una guía para el diseño. Normativas asociadas a Disergonómica del trabajador, robótica y exoesqueletos también fueron recolectadas para las cuales permiten determinar características de ergonomía e inspección, pero no se asocian a características técnicas del diseño.

Las encuestas se realizaron a tres jefes y trece operarios. De los jefes se obtuvieron requerimientos que la empresa necesita en el diseño del equipo teniendo como la altura mínima de 1.65m y máxima de 1.85. Los operarios realizan trabajos de carga y descarga de material. Los trabajadores según los jefes no suelen reportar incidencias de lesiones a menudo. Las características técnicas que la empresa necesita del equipo son confort, seguridad, flexibilidad, resistencia y robustez. El equipo debe manejar un tiempo de trabajo de 8 horas de manera autónoma. Los trabajadores suelen tomar entre 5 a 10 min en realizar una actividad de carga y descarga. La empresa cuenta con equipos como compresora, bombas hidráulicas y fuentes de alimentación tanto monofásica como trifásica. La ergonomía es un factor importante para el diseño y la seguridad de la misma forma y la empresa está dispuesta a invertir entre un margen de s/1500.00 y s/2000.00 para el desarrollo del proyecto.

Se obtuvieron Normas relacionadas a la salud de los operarios entre las cuales están la guía técnica de manipulación la cual describe las cargas permitidas durante el trabajo y la directiva de maquinaria de la unión europea que permite a las maquinarias que cumplan con requisitos de salud circular libremente. Entre las normativas para el diseño de se encontraron las normas ISO 10218 la cual apunta hacia pautas y requisitos para el diseño seguro y medidas de protección para el uso de dispositivos robóticos industriales, iso 13482 norma dirigida al diseño seguro y brinda información para la utilización de sistemas robóticos, ASTM F3323 una norma que incluye términos

relacionados a exo-trajes para facilitar la comunicación entre las personas involucradas en el diseño de un equipo exoesqueleto, ASTM F3358 norma que establece pautas de etiquetado e indicaciones para la fabricación de exoesqueletos y el reglamento Europeo 89/686/EEC la cual establece que si un equipo exoesqueleto esta certificado como un equipo de protección personal puede usar como un equipo de asistencias y para evitar lesiones.

Luego se analizaron las recomendaciones brindadas por otros trabajos relacionados los cuales determinaron las características: Materiales de la estructura, uso de cajas reductoras para los motores, y diseñar unas estructuras para cubrir todos los sistemas eléctricos. En base a estos criterios se plantearon cuatro conceptos de diseño para el exoesqueleto y tres diseños de configuración.

Para los diseños conceptuales se elaboraron cuatro conceptos de diseño. El concepto uno sin alimentación el cual aprovecha la energía mecánica y el movimiento de la persona, el segundo concepto que requiere alimentación hidráulica, el tercer concepto que requiere alimentación neumática y el cuarto concepto con alimentación eléctrica usando motores paso a paso. De la misma forma se realizaron tres diseños de configuración para ubicar los motores en coincidentes con cada articulación. Para ambas etapas se realizó una matriz de criterio ponderado como especifica la metodología de Egger-Dieter con la que se determinó que el cuarto diseño conceptual y el segundo diseño de configuración como los óptimos para el diseño.

Para el dimensionamiento del exoesqueleto se tomaron medidas de trece trabajadores tomando en cuenta las medidas de articulación a articulación del antebrazo, el brazo medida de hombro a hombro y altura de la espalda teniendo un valor promedio de antebrazo de 0.28m desde la muñeca hasta el codo, una medida del brazo con un valor de 0.32m desde el codo hasta el hombro, las medidas de hombro a hombro con un valor de 0.49m y una altura de la espalda con un valor de 0.55m medidos desde la cadera hasta la nuca.

Para seleccionar el tipo de Actuador eléctrico se decidió usar entre motores paso a paso y motores BLDC o también llamados brushless entre los cuales se escogió por criterio de torque, eficiencia y costo. Teniendo en cuenta el uso de

motores paso a paso nema 23 de distintos tamaños e identificando que el mayor torque será soportado en la articulación del codo.

La estructura se pensó en un principio en utilizar aluminio, pero el peso alcanzado sobrepasaba el establecido por la guía técnica de manipulación de cargas por lo cual se buscó un material más liviano para la estructura pero que sea resistente a los esfuerzos establecido por el análisis cinemático. Para ello se encontraron piezas diseñadas en base a resina epóxica, endurecedor de resina, fibra de vidrio y kevlar el cual es un material utilizado para carrocerías debido a su alta resistencia a las cargas impuestas sobre él, determinando, así como el material a utilizar en la estructura del exoesqueleto.

Para el análisis cinemático se representó las coordenadas de todos los eslabones y se obtuvieron los parámetros DH para los brazos del exoesqueleto, adicionalmente a ello se generó el modelo del brazo en Simscape para simular el movimiento del brazo, logrando obtenerse los resultados de la Figura 17.

A modo de verificar la resistencia estructural del exoesqueleto se tuvo de modelar y optimizar dicho modelo para lograr reducir el peso de la estructura y por consiguiente hacer el diseño más liviano. Después de la optimización la estructura termino teniendo un peso de 4.05 kg y con todo el sistema montado el exoesqueleto llegaría a los 14.73 kg si emplea aluminio, por otra parte, si se empleara Klevlar el peso de solamente la estructura seria 2.15 kg y de todo el equipo 12.83. Estos valores muestran la gran ventaja de usar un polímero para la estructura del exoesqueleto. Para el movimiento de los eslabones se estarán usando cuatro motores por brazo para los movimientos verticales del hombro y el codo, mientras que el movimiento horizontal en el codo tendrá una articulación libre.

En la selección de componentes se incluyó al motor pasos a paso con su respectiva caja de engranajes con una relación de transmisión de 15:1 para motores Nema 23 los cuales en total serna 6, 4 para las extremidades superiores y 2 para las extremidades inferiores. Para este tipo de motor se consideraron driver de potencia individuales con código DM542 con corriente máxima de 7.2 A.

Al realizarse la simulación por el método de elementos finitos (FEM) tuvo que prepararse de antemano un modelo 3D de todo el equipo. Como inicialmente se consideró como material base el aluminio se realizó una optimización de la estructura del exoesqueleto, logrado reducir la masa del mismo hasta los 4.05 kg. Con este valor y considerando el peso de los motores es que finalmente se obtuvieron como resultados que factor de seguridad mínimo que se alcanza es de 2.12.

El presupuesto total del exoesqueleto asciende a s/ 12 033.6 como un costo de fabricación sin contar el costo de desarrollo.

VI. CONCLUSIONES

Para dar inicio con el diseño del exoesqueleto fue necesario obtener información relacionada a las necesidades de la empresa, encontrar normativas y recomendaciones para establecer los detalles de ingeniería que permitieron establecer rangos para el funcionamiento del equipo. Esto fue el primer paso para poder desarrollar los siguientes objetivos planteados: Generar conceptos de diseño, diseño de configuración y selección de materiales para diseñar el exoesqueleto.

Para seleccionar el mejor diseño conceptual se utilizó una matriz de criterio ponderada de La metodología de Egger Dietter, la cual nos permitió, mediante criterios de selección y valoraciones, determinar cuál era el diseño conceptual óptimo entre los cuatro realizados escogiendo así el diseño conceptual número cuatro. De la misma forma se determinó el diseño de configuración óptimo permitiéndonos establecer ventajas y desventajas de las tres configuraciones optando según la evaluación por la segunda configuración.

En el análisis cinemático se empleó Simscape para modelar el movimiento de los eslabones de un solo brazo del exoesqueleto, esto debido a que el control de fuerzas se centró en los miembros superiores. En este caso para un movimiento aleatorio las gráficas muestran las trayectorias seguidas por cada eslabón.

Debido a la densidad de los materiales utilizados como son aluminio y Kevlar, se encontró que la reducción del peso de la estructura al utiliza Kevlar es cerca del 50% del peso de la estructura con aluminio ahorrándose un 15% del peso del todo el equipo.

Para el análisis paramétrico se determinó mediante las curvas de los motores seleccionados la ventaja mecánica, Potencia, reducción de esfuerzos y Eficiencia de los motores con respecto a las cargas que requieren ser levantadas por el operario

Como sistema de control se tomó de referencia los sistemas implementados en el exoesqueleto AGoRA Teniendo en cuenta un aumento de elementos como

lo son las baterías y los sensores tanto de aceleración y sensores de fuerza para el funcionamiento del exoesqueleto en dos modos. El primer modo de asistencia evitado que el operario realiza esfuerzo alguno y el segundo modo de multiplicador de fuerza el cual dirige las fuerzas del exoesqueleto y el operario para levantar una carga mayor a la establecida por las normativas de manipulación de cargas en operarios.

Para culminar el diseño se generaron los planos de fabricación y montaje del exoesqueleto. En total se ha elaborado 7 planos los cuales se encuentran en el Anexo 10.

Después de optimizar el peso de la maquina se logró alcanzar un factor de seguridad mínimo de 2.12 en carga trabajando a su máxima capacidad.

Tomado en cuenta los materiales seleccionados se determinó el presupuesto de fabricación del exoesqueleto teniendo un precio de s/ 12 033.6 soles. Precio que se determinó incluyendo costes de mano de obra, servicios generales, materiales para la elaboración del chasis y elaboración del sistema eléctrico.

VII. RECOMENDACIONES

Para la estructura trasera se determinó que usar fibra de Kevlar reduciría el peso y mejoraría la resistencia de la estructura. Una recomendación sería usar una aleación de fibra de carbono con Kevlar lo que aumentaría la resistencia del material y permitiría soportar más cargas y reducir partes de la estructura que le eliminaría un poco de peso.

El dispositivo debido a las cargas altas que debe soportar el operario se planteó el uso de motores eléctricos de alta potencia bajo peso y económicos, Para lo cual se presentaron dos opciones Motores Paso a paso y motores sin BLDC o brushless. Los motores pasan a paso llegan a ofrecer altas potencias son ergonómicos, pero son más pesados en comparación a los motores BLDC los cuales ofrecen mayor potencia y son más ligeros y compactos, pero al ser una tecnología nueva en el mercado el precio es mayor al de un motor paso a paso. Bajo estos criterios priorizando la economía y la potencia se utilizaron motores Paso a paso. En trabajos futuro si se requiere disminuir mucho más el peso se recomienda utilizar motores Brushless aumentando la eficiencia del sistema y reduciendo en gran cantidad el peso.

Como la estructura es rígida y el operario debe mantener su comodidad debe existir entre los eslabones un recubrimiento ergonómico de bajo peso para lo cual escogimos entre dos opciones: Gel ergonómico y espuma viscoelástica. En el caso de la espuma es que tiene una baja densidad, pero en comparación al gel ergonómico tiene menor comodidad durante el uso. Es así que priorizando la comodidad se escogió el uso de gel. Para trabajadores posteriores si se requiere disminuir el peso del equipo se recomienda usar la espuma viscoelástica.

REFERENCIAS

- ABI Research (18 de Mayo de 2021). *Commercial and Industrial Robotics*. <https://www.abiresearch.com/market-research/product/7777986-commercial-and-industrial-robotics/>
- Agila-Palacios, E., Colunga-Rodríguez, C., González-Muñoz, E., & Delgado-García, D. (2014). Síntomas músculo-esqueléticos en trabajadores operativos del área de mantenimiento de una empresa petrolera ecuatoriana. *Ciencia & trabajo*, 16(51), 198-205.
- Bonilla Ramos, J. A., & Díaz Rueda, N. Diseño de un exoesqueleto para uso industrial de miembros superiores a base de materiales reciclados.
- Chiu J and Robinovitch SN: Prediction of upper extremity impact forces during falls on the outstretched hand, *J Biomech* 31:1169, 1998.
- Cho, Y. K., Kim, K., Ma, S., & Ueda, J. (2018). A robotic wearable exoskeleton for construction worker's safety and health. In *ASCE Construction Research Congress* (pp. 19-28).
- Del-Ama, A. J., Azorín, J. M., Pons, J. L., Frizera, A., Rodrigues, T., Gil-Agudo, Á., & Moreno, J. C. (2018). Lower Limb Exoskeletons in Latin-America. In *International Symposium on Wearable Robotics* (pp. 206-209). Springer, Cham.
- Galán Cutipa, F. W. (2017). Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de extremidades superiores
- Han, H. J., & Shim, K. C. (2019). Development of an engineering design process-based teaching and learning model for scientifically gifted students at the Science Education Institute for the Gifted in South Korea. *Asia-Pacific Science Education*, 5(1), 1-18.
- Hedrich, P., Brötz, N., & Pelz, P. F. (2018). Resilient Product Development-A New Approach for Controlling Uncertainty. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 885, pp. 88-101). Trans Tech Publications Ltd.
- Khin, R. A., Carlos, M. M. R., Badillo, G., Germánico, G. M. G., & Jimmy, J. R. J. Diseño de exoesqueleto de tres grados de libertad para miembro superior.

- Ordóñez-Hernández, C. A., Gómez, E., & Calvo, A. P. (2016). Desórdenes músculo esqueléticos relacionados con el trabajo. *Revista colombiana de salud ocupacional*, 6(1), 27-32.
- Ortega, R., & Kaminski, P. C. (2020). Open innovation integration to product development: a sector level analysis within the manufacturing industry. *Production*, 30.
- Rodríguez García, Pedro Luis; Moreno Murcia, Juan Antonio. «Justificación de la continuidad en el trabajo de estiramiento muscular para la consecución de mejoras en los índices de amplitud articular». *Apuntes. Educación física y deportes*, [en línea], 1997, Vol. 2, n.º 48, pp. 54-61, <https://www.raco.cat/index.php/ApuntsEFD/article/view/310988> [Consulta: 5-05-2021].
- Rosen, J. (Ed.). (2019). *Wearable Robotics: Systems and Applications*. Academic Press.
- Stetter, R., Paczynski, A., & Zajac, M. (2008). Methodical development of innovative robot drives. *Strojniški vestnik*, 6(54), 486-498.
- Etral S.A.C (s.f). Misión y visión de la empresa. <https://etral.pe/>
- Ford Media Center (07 de agosto del 2017). *Exoesqueleto: Tecnología Que Integramos Para Reducir La Fatiga Y Lesiones En Los Trabajadores De Ford De México*. <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/mx/es/news/2018/08/07/exoesqueleto--tecnologia-que-integramos-para-reducir-la-fatiga-y.html>
- Japan Band (04 de marzo de 2017). Exo Muscle -Social Welfare Innovation. ProgramMinisterio de asuntos exteriores de Japon. <https://www.mofa.go.jp/files/000250658.pdf>
- CAIZALUISA, A. G. L., & CEBALLOS, L. J. L. Investigación De Mecanismos Multiplicadores De Fuerza Para El Diseño Y Construcción De Un Exoesqueleto Robótico De Extremidad Superior Para Levantamiento De Carga.

Salam Moubarak, M. T. (2009). Design and Modeling of an Upper Extremity Exoskeleton. *Archives Ourvertes*, 476-479.
- García, Andres. Desarrollo E Implementación De Un Exoesqueleto De Miembro Inferior En Actividades De La Vida Diaria. Universidad del Rosario. Bogotá DC, 2020

- Arias, J. L. R., & Fonseca, A. R. (2012). Modelamiento matemático de la cinemática directa e inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad. *Ingeniería solidaria*, 8(15), 46-52.
- Granja Oramas, M. V. (2014). Modelación y análisis de la cinemática directa e inversa del manipulador Stanford de seis grados de libertad (Bachelor's thesis, Quito, 2014.).
- Cortés, J. (2008). La representación Denavit-Hartenberg.
- Celigüeta-Lizarza, J. T. (2011). Método de los elementos finitos para análisis estructural.
- Gómez, F. S. (2020). Modelizado y optimización de problemas biomecánicos mediante la combinación del método de los elementos finitos (mef) y técnicas avanzadas de optimización (Doctoral dissertation, Universidad de La Rioja).
- Martín Pelacho, À. (2021). Estudio comparativo de diferentes elementos finitos para simulaciones de FEM (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- BEDOYA, E. A., OSORIO, I. C., TOVAR, C., ROQUEME, K., & ESPINOSA, E. A. (2018). Determinación de la carga física como factor de riesgo de desórdenes osteomusculares. *Revista espacios*, 39(06).
- Díaz Barrera, M. A., & Trujillo Ramírez, C. J. (2020). Análisis de los trastornos musculoesqueléticos asociados a factores de riesgo ergonómicos en el personal de enfermería en servicios asistenciales.
- Cusido Macías, W. F. (2019). PLAN DE ACCIÓN PARA ELIMINAR LOS RIESGOS LABORALES IDENTIFICADOS EN EL ALMACÉN DEL OPERADOR LOGÍSTICO LOGÍSTICAS (Bachelor's thesis, Instituto Superior Tecnológico Bolivariano de Tecnología).
- Gómez Carmona, P. (2018). Normativa reguladora de las máquinas industriales en el ámbito de la prevención de riesgos laborales.
- Gómez Carmona, P. (2018). Normativa reguladora de las máquinas industriales en el ámbito de la prevención de riesgos laborales.
- Yin, Y. (2019). *Biomechanical Principles on Force Generation and Control of Skeletal Muscle and Their Applications in Robotic Exoskeleton*. CRC Press.
- Hall, S. J. (2019). *Basic Biomechanics*, 8e.

- Cardona, M., Solanki, V. K., & Cena, C. E. G. (2020). Exoskeleton Robots for Rehabilitation and Healthcare Devices. Springer.
- Yang, Z., Gu, W., Zhang, J., & Gui, L. (2017). Force control theory and method of human load carrying exoskeleton suit. Berlin Heidelberg: Springer.

ANEXOS

9.1. Anexo 01

Variables de estudio

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
CARGA DE LEVANTE	Es la fuerza Limite que hace El cuerpo Humano para no Sobre esforzar los músculos tanto del brazo, espalda, piernas, etc.	Se presenta como la secuencia de pasos en los cuales se aplica el conocimiento en la realización de piezas, estructuras y máquinas para llegar con el fin de la elaboración de un diseño Eficiente y funcional	Carga de levante	Intervalo
			Eficiencia	Nominal
CONFIGURACIÓN DE EXOESQUELETO	La ingeniería del diseño, es el arte de aplicar los conocimientos científicos en la ordenación de los elementos básicos, tangibles e intangibles, de un objeto o estructura con el fin de aumentar su belleza o utilidad.		Factor de Seguridad	Nominal
REDUCCIÓN DE ESFUERZOS	Como esfuerzo denominamos la fuerza que aplicamos contra algún impulso o resistencia, para contrarrestarlo o revertirlo. Asimismo, se llama esfuerzo a	El peso máximo que los trabajadores pueden manipular manualmente es de 25 kilos. Se prohíbe manipulación manual de carga y descarga para mujeres embarazadas. Los menores de 18 años y	Velocidad del actuador	razón
			Altura de levante	Intervalo

	la energía o el vigor que se pone en la realización de algo, venciendo obstáculos.	mujeres, no pueden llevar, transportar, cargar, arrastrar o empujar de manera manual, sin ayuda mecánica, cargas mayores a 20 kilos.		
VENTAJA MECÁNICA	La ventaja mecánica es una magnitud adimensional que indica cuánto se amplifica la fuerza aplicada usando un mecanismo para contrarrestar una carga de resistencia.		Potencia	Nominal

9.2. Anexo 02

DISEÑO DE LA ENCUESTA

Objetivo de la encuesta:

El objetivo de la presente encuesta es conocer las medidas longitudinales de muñeca-codo, codo-hombro, ancho de espalda y largo de espalda.

Tamaño de la muestra:

15 operarios dedicados al montaje de carrocerías en la empresa ETRAL SAC empresa que se ha consolidado en los rubros de mantenimiento industrial y metal mecánico en la ciudad de Trujillo.

Técnica de recolección:

Cuestionario impreso.

Fecha de recolección de la información:

(Por confirmar)

Diseño y realización:

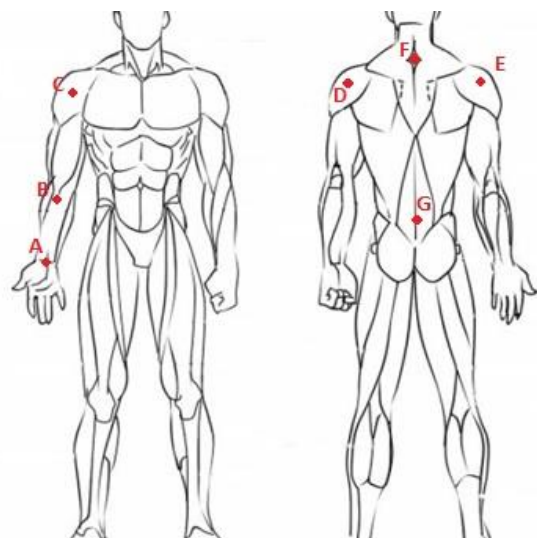
La encuesta fue diseñada y realizada por los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica eléctrica de la universidad Cesar Vallejo, Jorge Alejandro Guerra Guerra y Diego Alonso Castañeda Gonzales, con el objetivo de conocer las medidas ya mencionadas para el diseño de un exoesqueleto.

Universo:

Personal operario encargado del montaje de carrocerías en la empresa ETRAL SAC en la ciudad de Trujillo.

Preguntas que se formularon:

- ¿Cuál es la medida del punto A hacia B?
- ¿Cuál es la medida del punto B hacia C?
- ¿Cuál es la medida del punto D hacia E?
- ¿Cuál es la medida del punto E hacia F?



9.3. Anexo 03

Ficha de registro.

FICHA DE REGISTRO – CARGAS DE LEVANTE					
FECHA:	ACTIVIDAD:	NUMERO DE OPERARIOS:		HORA DE INICIO:	
RESPONSABLES: <ul style="list-style-type: none"> • Castañeda Gonzales, Diego Alonso. • Guerra Guerra, Jorge Alejandro. 				HORA DE TERMINO:	
Objetivo: El objetivo de la presente ficha es conocer acerca del tipo de trabajo que realiza y el tipo de cargas que manejan los operarios del sector de almacén en el la empresa Etral S.A.C					
Nota: A continuación, registrar el valor con los datos que se muestran en la tabla estableciendo el tipo de carga como Liviano, Pesado, Muy pesado y especificando el peso con el valor estimado por cada carga.					
<u>Nro.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Tipo de carga</u>	<u>Peso</u>	<u>Equipo Utilizado</u>	<u>Observaciones</u>
1					
2					
3					
4					
5					

9.4. Anexo 04: Entrevista

ENTREVISTA N° _____

ENTREVISTA PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA CENTRAL SAC RESPECTO AL DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE EXTREMIDADES SUPERIORES

ENTREVISTADOR:

Apellidos y Nombres: Castañeda Gonzales Diego Alonso

Guerra Guerra Jorge Alejandro

ENTREVISTADO:

Apellidos y nombres:

Cargo:

I. ASPECTO ERGONÓMICO.

1. ¿Cuál es la altura de mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa?

Minima = _____m

Maxima = _____m

2. ¿Qué tipos de trabajos realizan los operarios en los que intervengan el uso de los brazos para manipular objetos? Mencione las actividades, los equipos o herramientas que manipulan.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

3. ¿Durante el desarrollo de sus actividades ha tenido alguna dolencia por fatiga en alguna parte de su torso o extremidades superiores? Mencione en que parte.

.....
.....
.....

II. ASPECTO DE DISEÑO.

4. Desde su perspectiva mencione ¿Qué características técnicas (Ejemplo: flexibilidad, confort, resistencia) esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo de manera más eficiente?

.....
.....
.....
.....
.....

5. En cuanto a autonomía ¿Cuánto tiempo considera usted que el exoesqueleto deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?

.....
.....
.....
.....

6. De su experiencia profesional mencione ¿En promedio por cuanto tiempo realiza alguna actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado? Mencione también el peso aproximado del objeto.

.....
.....
.....
.....
.....

7. ¿La empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, toma trifásica o toma monofásica? Mencione con cual se cuenta junto a su capacidad.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

8. De su experiencia comente algún detalle adicional respecto del diseño ideal de este equipo, Ejemplos: Funciones deseables, problemas persistentes, innovación en el diseño, aspectos de seguridad, etc.

.....
.....
.....
.....

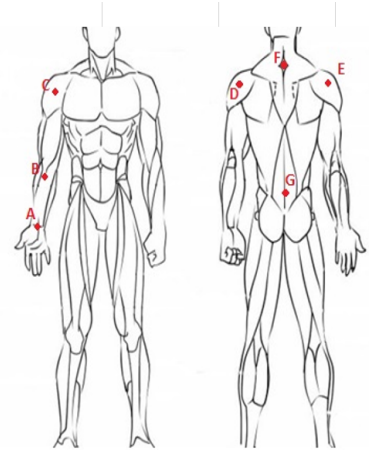
IV. ASPECTO ECONÓMICO.

9. Desde su perspectiva ¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?

.....
.....
.....
.....

9.5. Anexo 05: Tabla de medidas

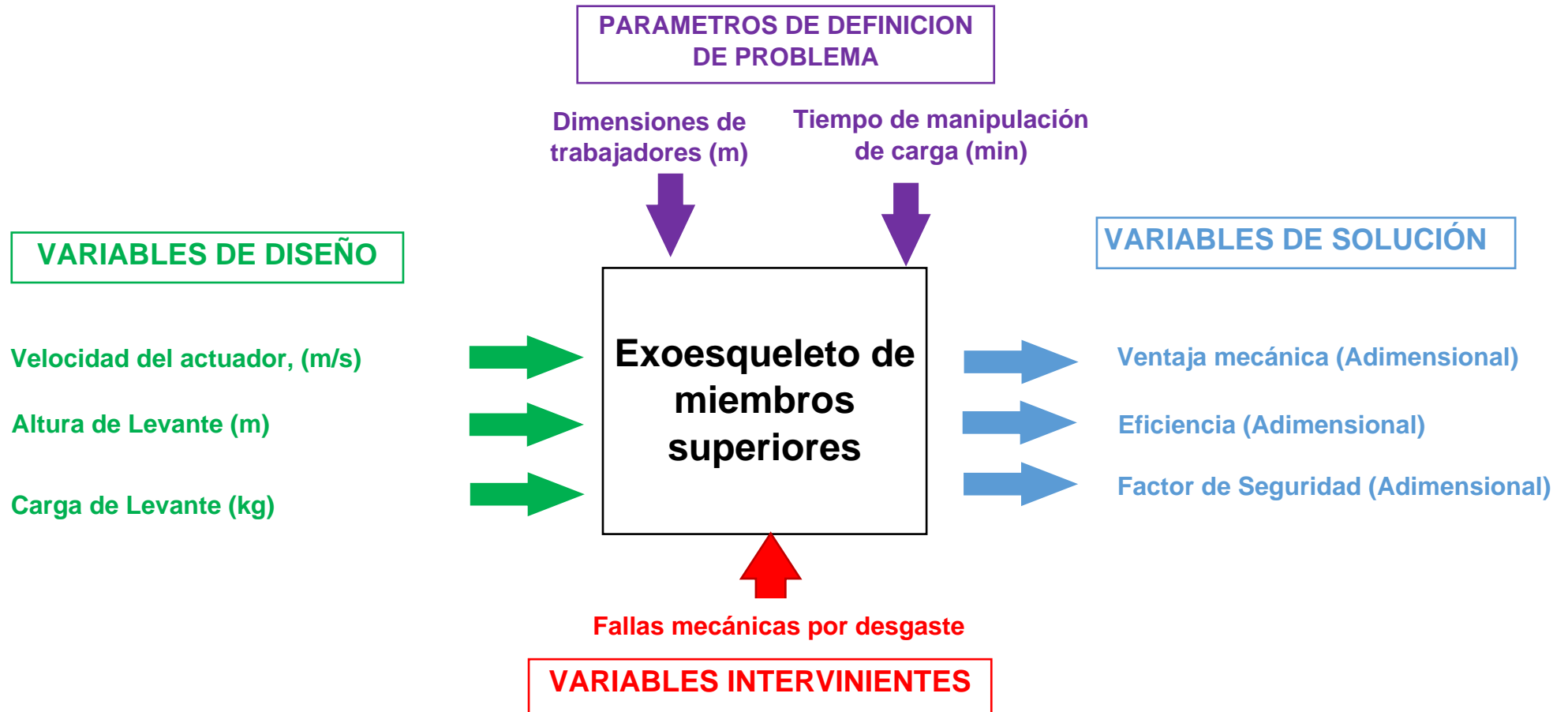
TRABAJADOR	Medida A-	Medida B-	Medida D-	Medida F-	Unidad
Trabajador Nro.1	30	34	57	45	cm
Trabajador Nro.2	23	28	44	47	cm
Trabajador Nro.3	21	24	46	48	cm
Trabajador Nro.4	26	33	50	60	cm
Trabajador Nro.5	28	31	50	53	cm
Trabajador Nro.6	29	35	52	55	cm
Trabajador Nro.7	29	33	48	50	cm
Trabajador Nro.8	28	30	44	50	cm
Trabajador Nro.9	28	31	50	55	cm
Trabajador Nro.10	25	30	40	50	cm
Trabajador Nro.11	23	28	42	51	cm
Trabajador Nro.12	29	30	50	55	cm
Trabajador Nro.13	25	30	48	52	cm
PROMEDIO	26.46	30.54	47.77	51.62	cm



9.6. Anexo 06: Tabla de trabajos

FICHA DE REGISTRO – CARGAS DE LEVANTE						
FECHA:	ACTIVIDAD:	NUMERO DE OPERARIOS: 13	HORA DE INICIO: 7:30 am			
RESPONSABLES:			HORA DE TERMINO: 3:00pm			
<ul style="list-style-type: none"> • Castañeda Gonzales, Diego Alonso. • Guerra Guerra, Jorge Alejandro. 						
Objetivo: El objetivo de la presente ficha es conocer acerca del tipo de trabajo que realiza y el tipo de cargas que manejan los operarios del sector de almacén en el la empresa Etral S.A.C						
Nota: A continuación, registrar el valor con los datos que se muestran en la tabla estableciendo el tipo de carga como Liviano, Pesado, Muy pesado y especificando el peso con el valor estimado por cada carga.						
Nro.	Descripción	Tipo de carga	Peso	Equipo Utilizado		Observaciones
1	Descargue de planchas	Pesada	54 kg	15min	Guantes anticorte, zapatos punta de acero	
2	Soldadura	ligera	2kg	28min	Careta, ropa antinflama,	
3	corte de planchas	ligera	5kg	12 min	Guantes anticorte, zapatos punta de acero	
4	transporte de vigas ligeras	pesada	30 kg	15 min	Guantes anticorte, zapatos punta de acero	
5	taladrado	ligera	1.5kg	20 min	Guantes anticorte, zapatos punta de acero	

9.7. Anexo 07: Diagrama de caja negra de la estructura del botalón.

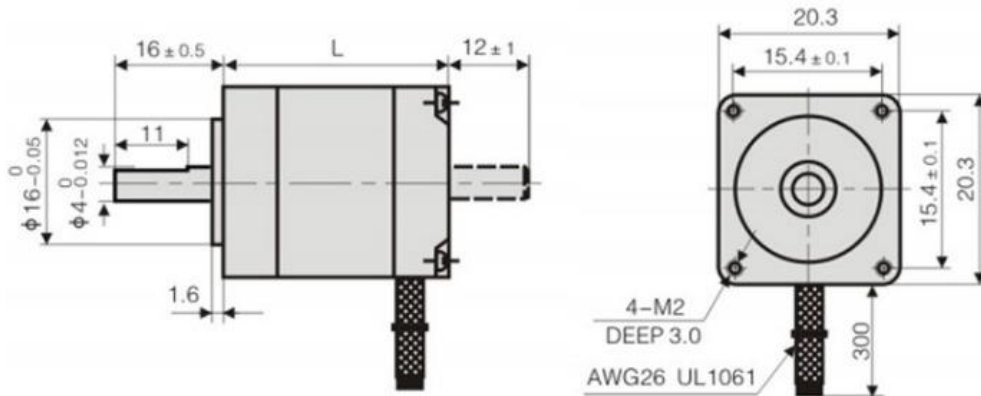


9.8. Anexo 08: Motor Nema 23



Model Name	FY56EL300A
Step Angle	1.8deg
Step Angle Accuracy	±5%(Full step,no load)
Resistance Accuracy	±10%(20°C)
Inductance Accuracy	±20%(1KHZ)
Temperature Rise	80°C Max(Rated current,2 phase on)
Ambient Temperature	-20°C~~50°C
Insulation Resistance	100MΩ Min., 500VDC
Dielectric Strength	500VAC for one minute
Shaft Radial Play	0.02Max (450g-load)
Shaft Axial Play	0.08Max (450g-load)
Length	76mm
Holding Torque	1.5N.m
Current / Phase	3.0A
Resistance / Phase	1.0ohms
Inductance / Phase	3.5mH
Rotor Inertia	460g.cm2
Weight	1.0Kg
Wires	4

Mechanical Dimensions



SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR	TYPE OF CONNECTION (EXTERN)	MOTOR																											
AMPS/PHASE		2.80																													
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		1.13±10%																													
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1kHz		4.80±20%																													
HOLDING TORQUE(Nm) [lb-in]		1.85 [16.39]																													
STEP ANGLE(°)		1.80																													
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5.00%																													
ROTOR INERTIA(g-cm ²)		—																													
WEIGHT(Kg) [lb]		—																													
TEMPERATURE RISE: MAX. 80°C (MOTOR STANDSTILL; FOR 2PHASE ENERGIZED)																															
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C [14°F-122°F]																															
INSULATION RESISTANCE 100 MΩmin (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)																															
INSULATION CLASS B 130°C [288°F]																															
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN. (BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)																															
AMBIENT HUMIDITY MAX. 85% (NO CONDENSATION)																															
			<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr> <th>PIN NO</th> <th>BIPOLAR</th> <th>LEADS</th> <th>WINDING</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>A+ —</td> <td>BLK</td> <td>A+</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>A- —</td> <td>GRN</td> <td>A-</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>B+ —</td> <td>RED</td> <td>B+</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>B- —</td> <td>BLU</td> <td>B-</td> </tr> </tbody> </table>	PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING	1	A+ —	BLK	A+	2	A- —	GRN	A-	3	B+ —	RED	B+	4	B- —	BLU	B-								
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING																												
1	A+ —	BLK	A+																												
2	A- —	GRN	A-																												
3	B+ —	RED	B+																												
4	B- —	BLU	B-																												
			<p>FULL STEP 2 PHASE-Ex. WHEN FACING MOUNTING END (X)</p> <table border="1" style="font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>STEP</th> <th>A+</th> <th>B+</th> <th>A-</th> <th>B-</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;"> ↓ CCW ↑ CW </td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> </tr> </tbody> </table>	STEP	A+	B+	A-	B-		1	+	+	-	-	↓ CCW ↑ CW	2	+	-	+	-	3	-	+	-	+	4	-	-	+	+	
STEP	A+	B+	A-	B-																											
1	+	+	-	-	↓ CCW ↑ CW																										
2	+	-	+	-																											
3	-	+	-	+																											
4	-	-	+	+																											
STEPPERONLINE®			APVD	10.30.2020																											
			CHKD																												
1:1.5			DRN																												
SCALE			SIGNATURE	DATE																											
			STEPPER MOTOR																												
			23HS30-2804S																												

9.9. Anexo 09: Caja de engranajes

PL/PF(80)系列性能参数 Technical data

减速比 Ratio	额定扭矩 Nominal output torque	最大扭矩 Maximum output torque	紧急制动扭矩 Emergency stop torque	额定转速 Nominal output speed	径向负荷 Permissible radial load	轴向负荷 Permissible axial load	转动惯量 Moment of inertia
	N.m	N.m	N.m	rpm	N	N	Kgcm ²
3	50	70	140	3000	650	900	0.77
4	50	110	220	3000	650	900	0.52
5	50	105	210	3000	650	900	0.45
8	32	52	104	3000	650	900	0.39
10	22	34	68	3000	650	900	0.34
9	70	110	140	3000	650	900	0.74
12	110	160	220	3000	650	900	0.72
15	105	150	210	3000	650	900	0.71
16	110	160	220	3000	650	900	0.50
20	110	160	220	3000	650	900	0.44
25	105	150	210	3000	650	900	0.44
32	110	160	220	3000	650	900	0.39
40	105	150	210	3000	650	900	0.39
64	32	52	64	3000	650	900	0.39
60	110	160	220	3000	650	900	0.70
80	110	160	220	3000	650	900	0.50
100	110	160	220	3000	650	900	0.44
120	105	150	210	3000	650	900	0.70
160	110	160	220	3000	650	900	0.39
200	105	150	210	3000	650	900	0.39
256	110	160	220	3000	650	900	0.39
320	105	150	210	3000	650	900	0.39
512	32	52	64	3000	650	900	0.39

段数 Stage	噪音 Noise	背隙 Backlash		寿命 Life time	满载效率 Efficiency	抗扭刚性 Torsional stiffness	重量 Weight
		精密 Precision	标准 Standard				
一	< 60dB(A)	≤ 5arcmin	≤ 8arcmin	2,0000h	η ≥ 96%	1.8 N.m/arcmin	2.1kg
二		≤ 8arcmin	≤ 12arcmin		η ≥ 94%		2.6kg
三		≤ 10arcmin	≤ 15arcmin		η ≥ 90%		3.1kg

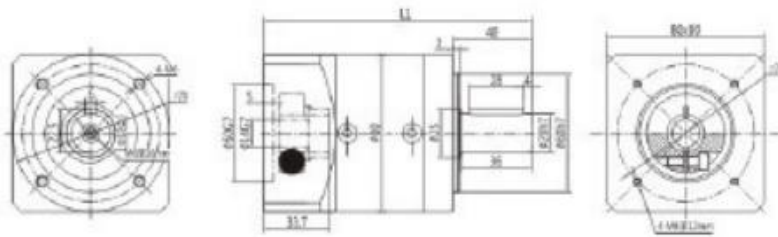
1. 额定扭矩由减速机的高可靠性计算得出。最大扭矩由减速机的一般可靠性计算得出。
2. 噪音值是输入转速3000rpm时，距离1m测量。
3. 使用寿命在连续运转工作下为额定值的1/2。
4. 背隙是由额定扭矩的2%测量。
5. 径向力和轴向力是在输出转速100rpm时作用于输出轴中心位置的许用力。

1. Rated torque is calculated by high reliability. Max. torque is calculated by normal reliability..
2. Noise level is tested based on input speed 3000rpm and 1m distance.
3. Actual life span is 1/2 of rated life span under the condition of continuous working.
4. Backlash is test by 2% of rated torque.
5. Radial force and axial force are the permissible force on output distance position when output speed 100rpm.

www.reductor.cn.alibaba.com

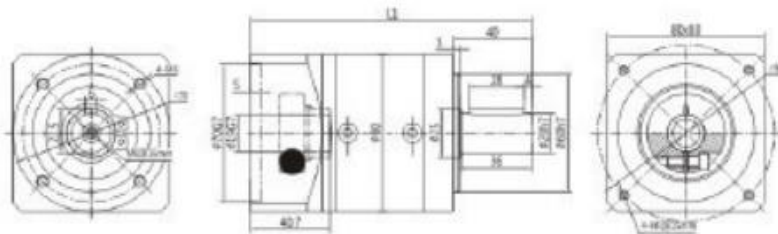
PL80系列外观尺寸图 Outline dimensions

400W外观及尺寸图 Outline dimensions



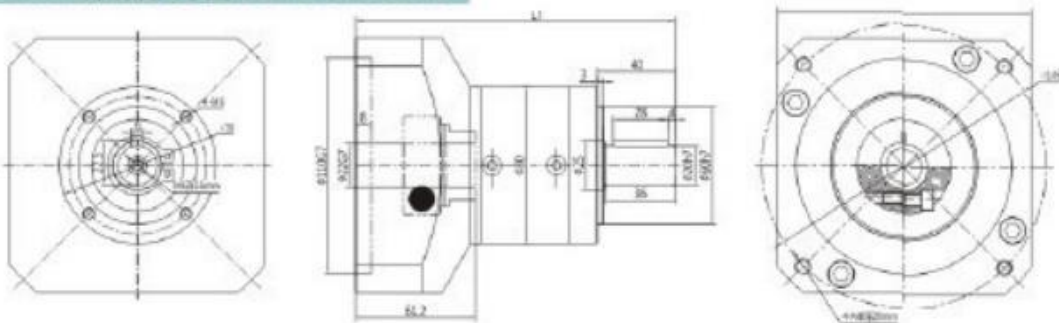
总长 Total length	1-Stage	2-Stage	3-Stage
L1	136.5	154.5	172

750W外观及尺寸图 Outline dimensions



总长 Total length	1-Stage	2-Stage	3-Stage
L1	143.5	161.5	179

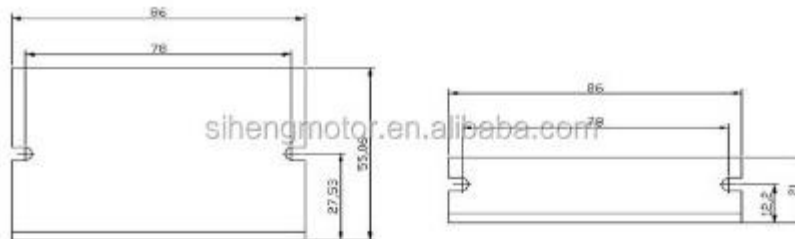
1.0KW外观及尺寸图 Outline dimensions



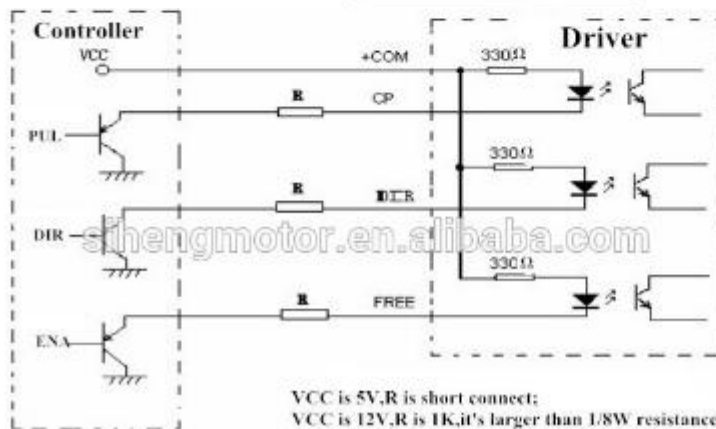
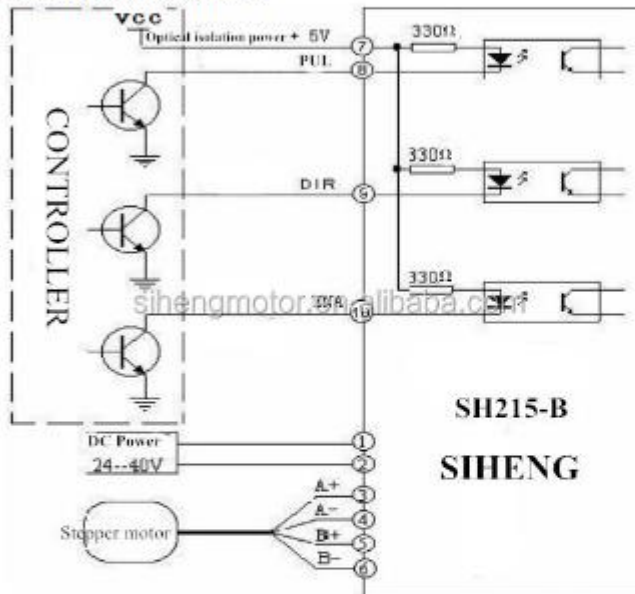
总长 Total length	1-Stage	2-Stage
L1	163.5	181.5

9.10. Anexo 10: Driver de potencia DM542

Tamaño de la instalación



El diagrama de cableado



VCC is 5V, R is short connect;
 VCC is 12V, R is 1K, it's larger than 1/8W resistance;
 VCC is 24V, R is 2K, it's larger than 1/8W resistance;
 R must connect the signal port of controller

9.11. Anexo 11: Tabla de propiedades del kevlar

Property	Unit	Kevlar® 29	Kevlar® 49
Yarn			
Type	denier	1,500	1,140
	(dtex)	(1,670)	(1,270)
	# of filaments*	1,000	768
Density	lb/in. ³	0.052	0.052
	(g/cm ³)	(1.44)	(1.44)
Moisture Levels			
As Shipped**	%	7.0	3.5
Equilibrium from Bone-Dry Yarn***	%	4.5	3.5
Tensile Properties			
Straight Test on Conditioned Yarns†			
Breaking Strength	lb	76.0	59.3
	(N)	(338)	(264)
Breaking Tenacity	g/d	23.0	23.6
	(cN/tex)	(203)	(208)
	psi	424,000	435,000
	(MPa)	(2,920)	(3,000)
Tensile Modulus	g/d	555	885
	(cN/tex)	(4,900)	(7,810)
	psi	10.2 x 10 ⁶	6.3 x 10 ⁶
	(MPa)	(70,500)	(112,400)
Elongation at Break	%	3.6	2.4
Resin Impregnated Strands††			
Tensile Strength	psi	525,000	525,000
	(MPa)	(3,600)	(3,600)
Tensile Modulus	psi	12.0 x 10 ⁶	18.0 x 10 ⁶
	(MPa)	(83,000)	(124,000)

9.12. Anexo 12: Tabla de propiedades del Sika Carbo dur láminas de fibra de carbono

Propiedades de las láminas Sika CarboDur:

Propiedad	Tipo S
Módulo de elasticidad* (valor medio)	165 000 MPa (1 650 000 kg/cm ²)
Módulo de elasticidad* (valor mínimo)	> 160 000 MPa (1 600 000 kg/cm ²)
Módulo de elasticidad* (valor fractil 5%)	162 000 MPa (1 620 000 kg/cm ²)
Módulo de elasticidad* (valor fractil 95%)	180 000 MPa (1 800 000 kg/cm ²)
Resistencia a la tensión* (valor medio)	3 100 MPa (31 000 kg/cm ²)
Resistencia a la tensión* (valor mínimo)	> 2 800 MPa (28 000 kg/cm ²)
Resistencia a la tensión* (valor fractil 5%)	3 000 MPa (30 000 kg/cm ²)
Resistencia a la tensión* (valor fractil 95%)	3 600 MPa (36 000 kg/cm ²)
Deformación a la ruptura* (valor mínimo)	> 1.69 %
Deformación de diseño**	0.85 %

9.13. Anexo 13: Tabla de propiedades del Aluminio 6061

-6061- (ALUMINIO – MAGNESIO – SILICIO)

COMPOSICIÓN QUÍMICA

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos		Al
Mínimo	0,40		0,15		0,80	0,04			Otros	Total	
Máximo	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15	0,05	0,15	El resto

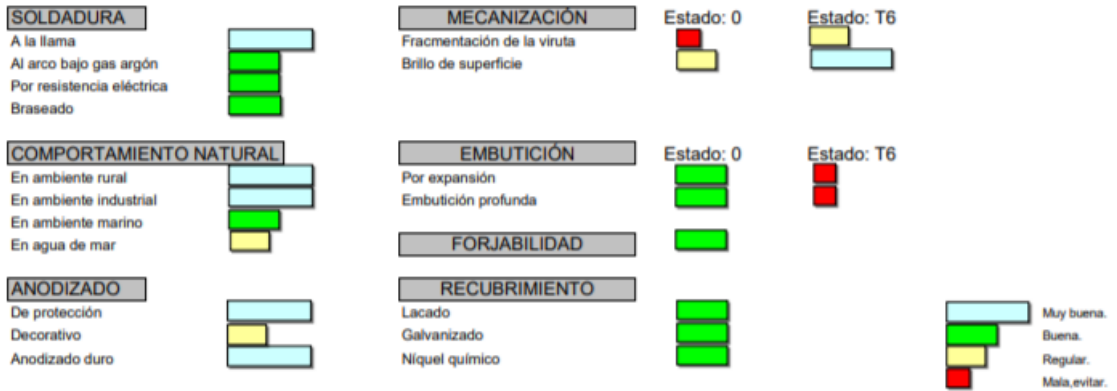
PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Estado	Características a la tracción				Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Dureza Brinell (HB)
	Carga de rotura Rm. N/mm ²	Límite elástico Rp 0,2, N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²		
0	125	55	27	120	85	30
T4	235	140	21	180	150	65
T6	310	270	14	190	190	95

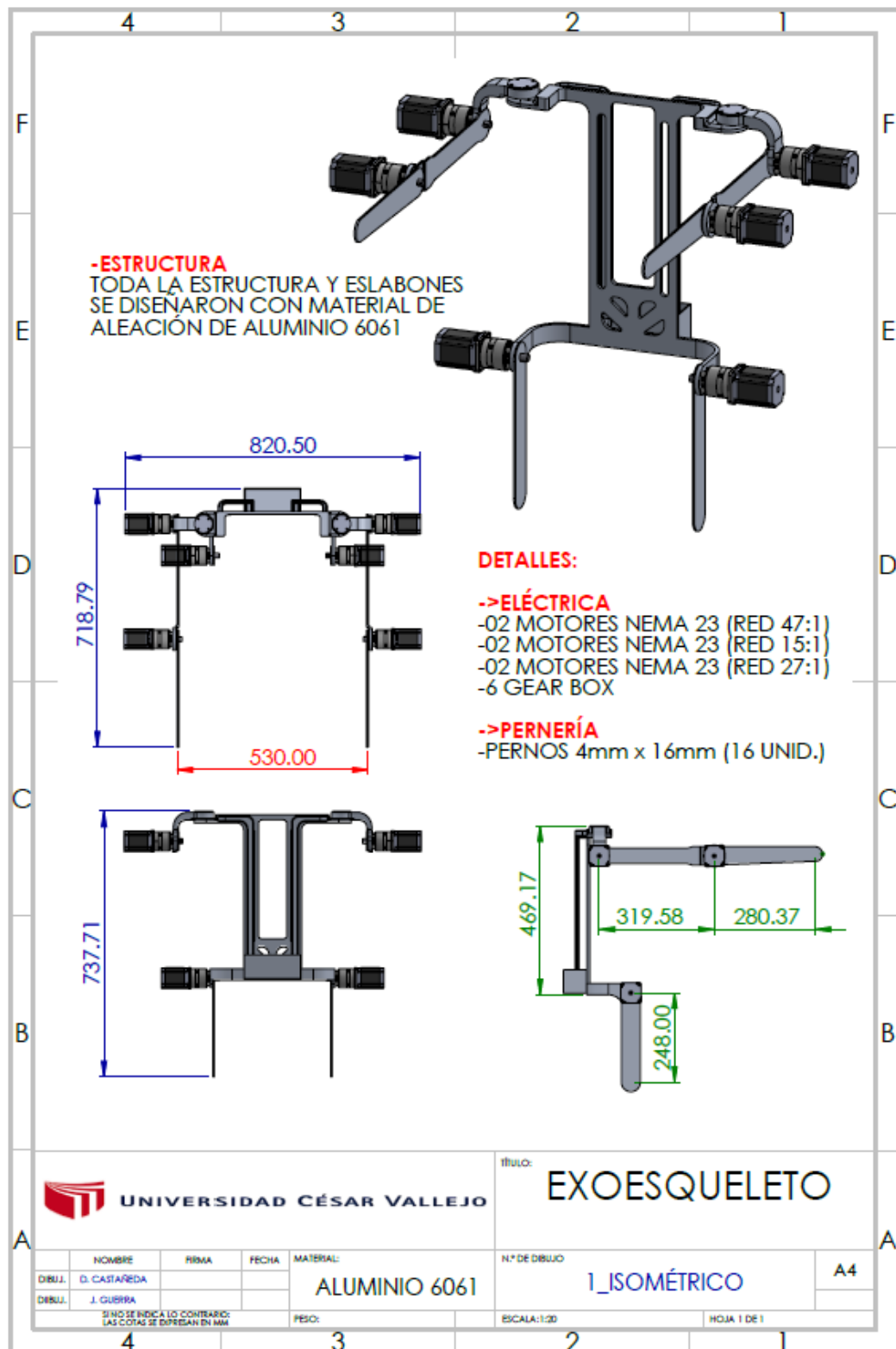
PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁻⁶ K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V
70,000	2,70	580-650	23,3	T4-155 T6-166	T4-4,3 T6-4,0	T4-40 T6-43	-0,83

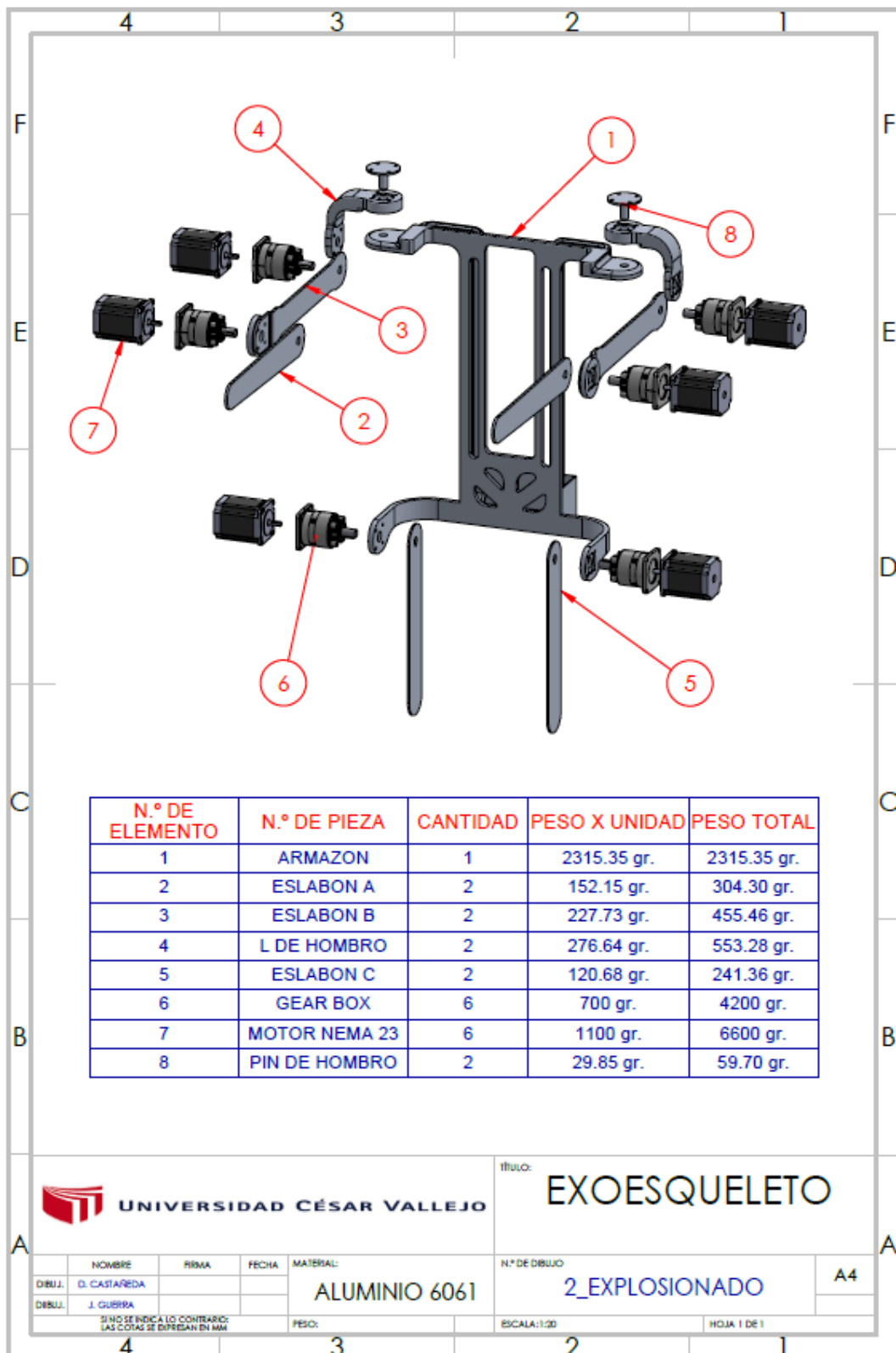
APTITUDES TECNOLÓGICAS



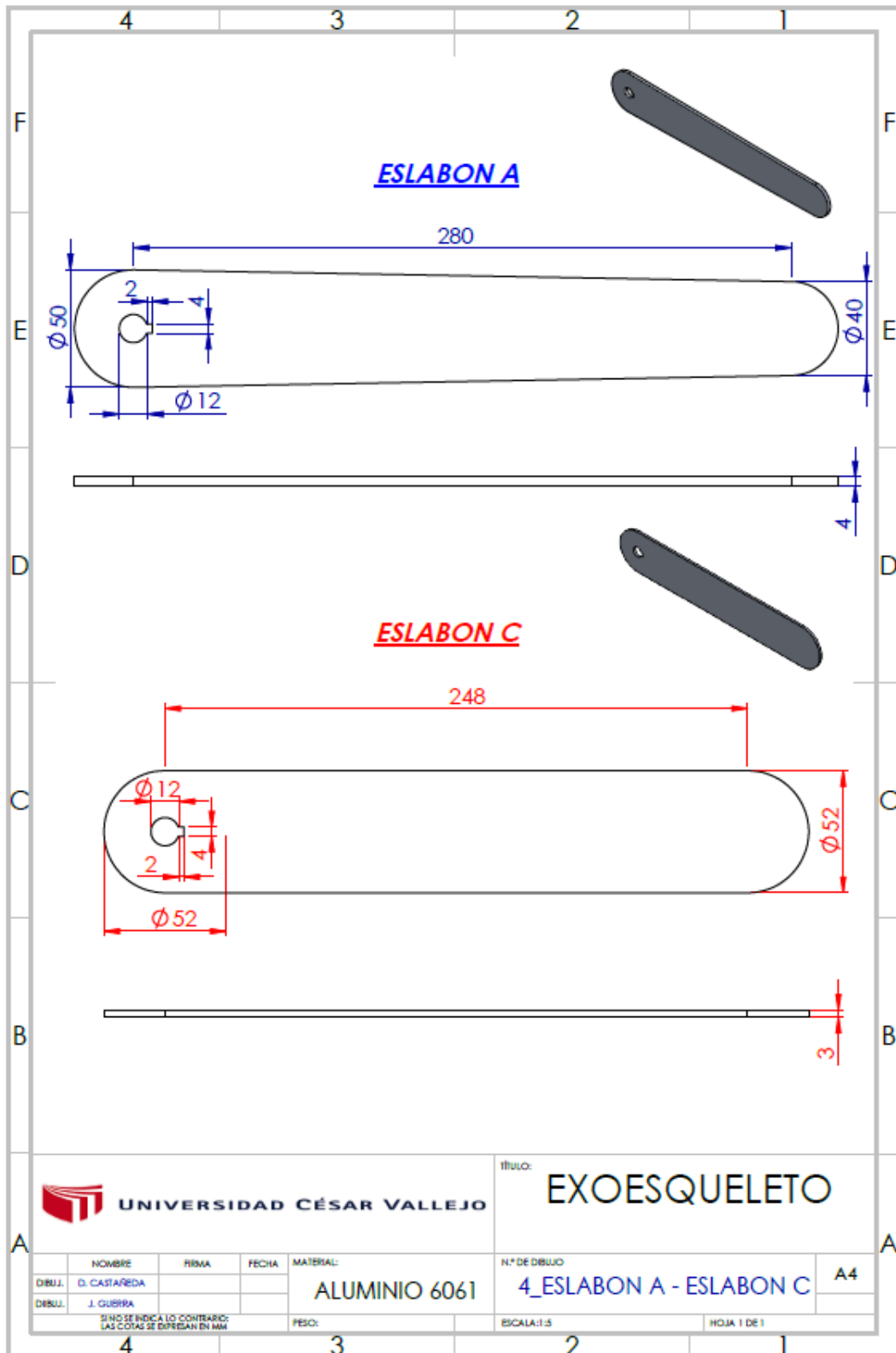
9.14. Anexo 14: Plano isométrico del exoesqueleto



9.15. Anexo 15: Plano Explotado del exoesqueleto



9.17. Anexo 17: Planos del eslabón del exoesqueleto



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

título:

EXOESQUELETO

NOMBRE		FIRMA		FECHA		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4
DIBUJ. D. CASTAÑEDA						ALUMINIO 6061		4_ESLABON A - ESLABON C		
DIBUJ. J. GUERRA						PESO:		ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1

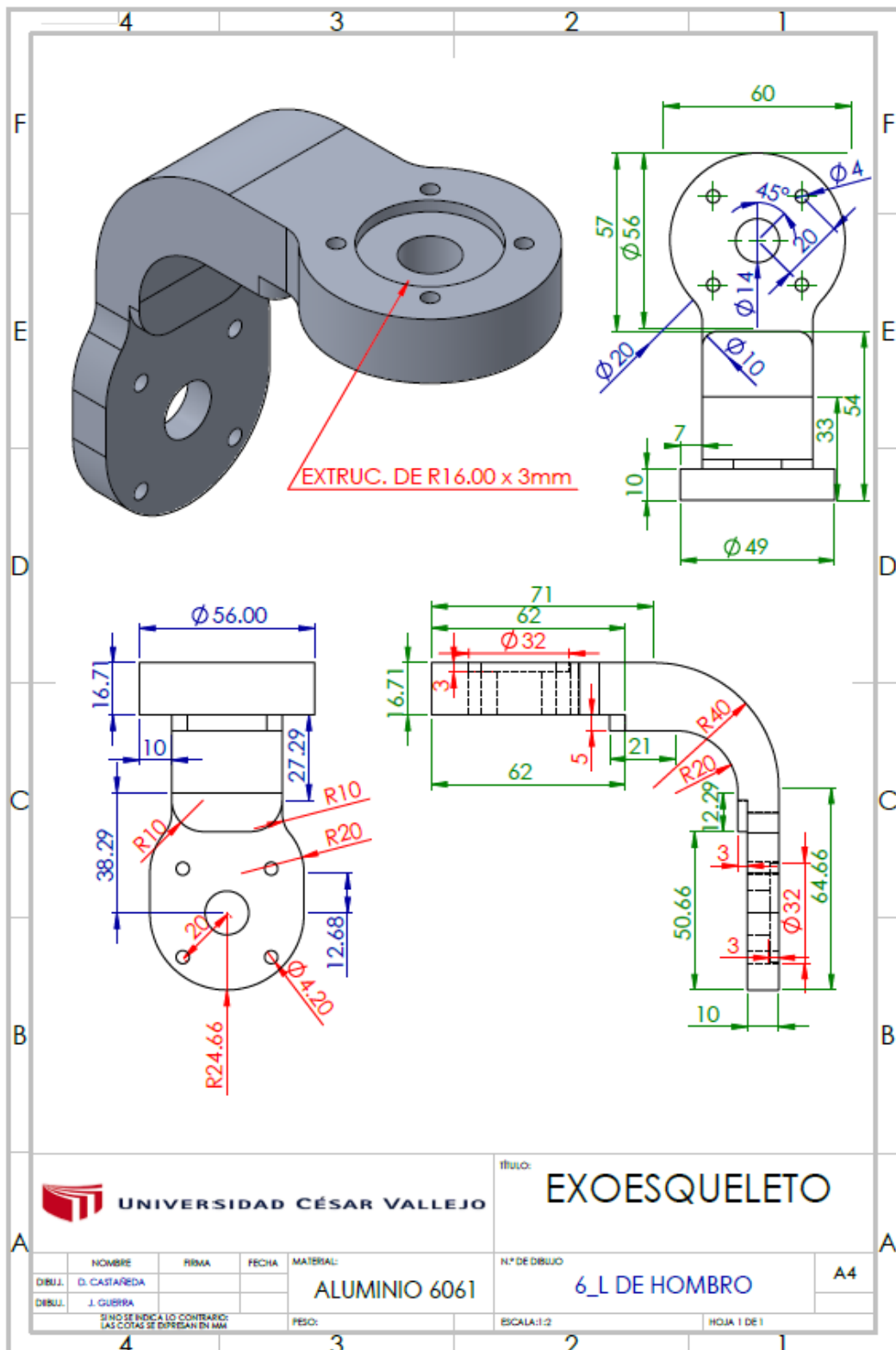
4

3

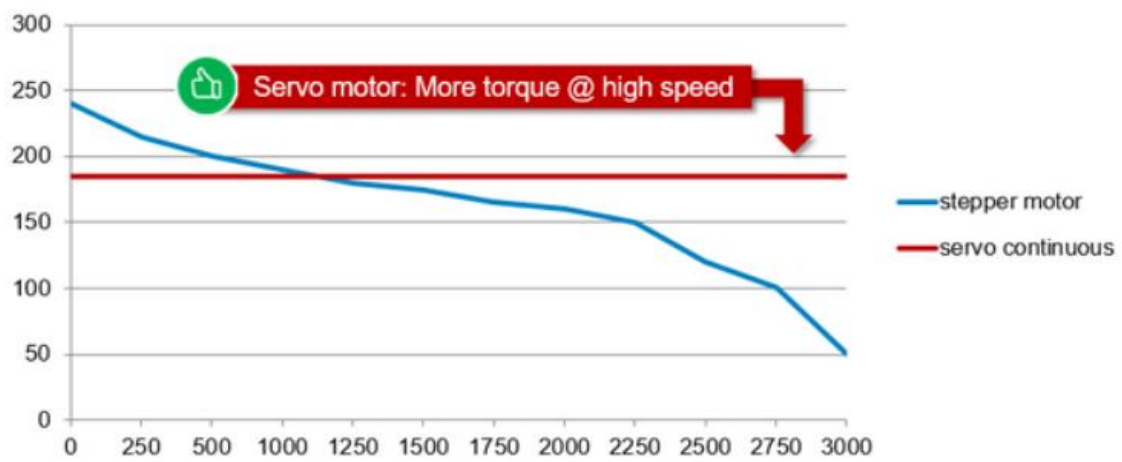
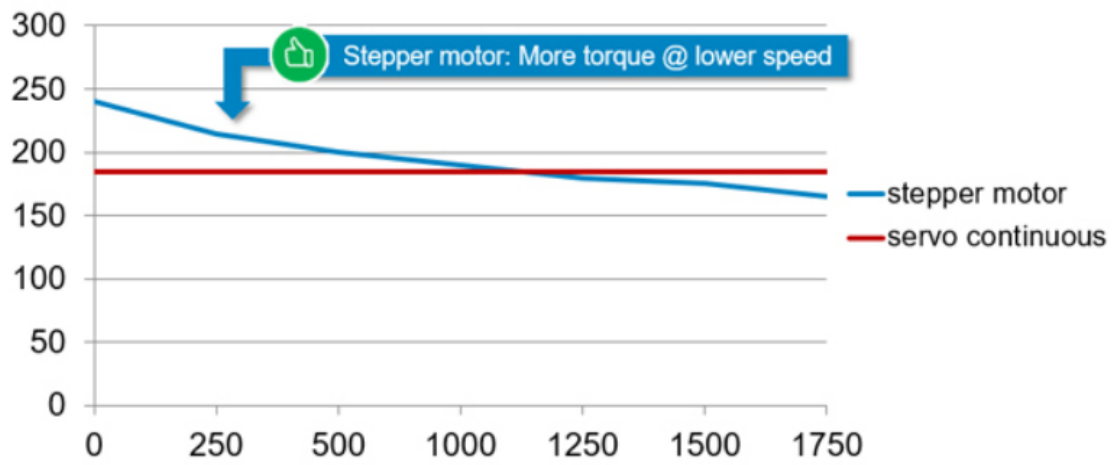
2

1

9.18. Anexo 18: Planos de la Unión del hombro del exoesqueleto



9.19. Anexo 19: Graficas de diferencias entre servomotores y motores paso a paso



9.20. Anexo 20: Motor paso a paso 47:1 L=76mm



Nema 23 Stepper Motor Bipolar L=76mm w/ Gear Ratio 47:1 Planetary Gearbox

★★★★★ 0 reviews | Write a review

SKU: 23HS30-2804S-PG47

\$61.29

Bulk quantity price break:

Qty	5	10	50	100
Price	\$59.75	\$58.22	\$56.69	\$55.16
Save	2.51%	5.01%	7.51%	10%

Availability: 45

* Ship from

China

- 1 + [ADD TO CART](#)



9.21. Anexo 21: Motor paso a paso 47:1 L=56mm



Nema 23 Stepper Motor Bipolar L=56mm w/ Gear Ratio 47:1 Planetary Gearbox

★★★★★ 4 reviews | Write a review

SKU: 23HS22-2804S-PG47

\$54.77

Bulk quantity price break:

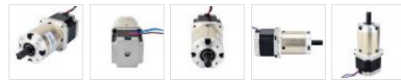
Qty	5	10	50	100
Price	\$53.40	\$52.03	\$50.66	\$49.29
Save	2.5%	5%	7.5%	10.01%

Availability: 163

* Ship from

China United States Germany Russian Federation

- 1 + [ADD TO CART](#)



9.22. Anexo 22: Encuesta realizada al jefe de ingeniería de la empresa ETRAL SAC:

ENTREVISTA N° 01

ENTREVISTA PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA ETRAL SAC RESPECTO AL DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE EXTREMIDADES SUPERIORES

ENTREVISTADOR:

Apellidos y Nombres: Castañeda Gonzales Diego Alonso

Guerra Guerra Jorge Alejandro

ENTREVISTADO:

Apellidos y nombres: CRUZADO CRUZADO, MARCOS

Cargo: ING. A CARGO

I. ASPECTO ERGONÓMICO.

1. ¿Cuál es la altura de mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa?

Minima = 1.54 m

Maxima = 1.74 m

2. ¿Qué tipos de trabajos realizan los operarios en los que intervengan el uso de los brazos para manipular objetos? Mencione las actividades, los equipos o herramientas que manipulan.

Cargas de planchas de acero, trabajos de soldadura.

3. ¿Durante el desarrollo de sus actividades ha tenido alguna dolencia por fatiga en algún parte de su torso o extremidades superiores? Mencione en que parte.

Ningunas mencionables.

II. ASPECTO DE DISEÑO.

4. Desde su perspectiva mencione ¿Qué características técnicas (Ejemplo: flexibilidad, confort, resistencia) esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo de manera más eficiente?

hídrulica en preferencia, presenta flexibilidad, y confort.

5. En cuanto a autonomía ¿Cuánto tiempo considera usted que el exoesqueleto deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?

autónoma. 7hrs.

El equipo debe ser autónomo 2hrs. diarias.

6. De su experiencia profesional mencione ¿En promedio por cuanto tiempo realiza alguna actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado? Mencione también el peso aproximado del objeto.

5min. Carrocería, planchar.

En promedio 5min., cargas de carrocería y planchas de acero.

7. ¿La empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, toma trifásica o toma monofásica? Mencione con cual se cuenta junto a su capacidad.

La empresa cuenta con todo lo mencionado anteriormente.

8. De su experiencia comente algún detalle adicional respecto del diseño ideal de este equipo, Ejemplos: Funciones deseables, problemas persistentes, innovación en el diseño, aspectos de seguridad, etc.

Como principal característica debe
presentar seguridad.

IV. ASPECTO ECONÓMICO.

9. Desde su perspectiva ¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?

~~7000~~ Inversión requerida de 2 mil soles.

9.23. Anexo 22: Encuesta realizada al jefe de producción de la empresa ETRAL SAC:

9.4. Anexo 04: Entrevista

ENTREVISTA N° 02

ENTREVISTA PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA ETRAL SAC RESPECTO AL DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE EXTREMIDADES SUPERIORES

ENTREVISTADOR:

Apellidos y Nombres: *Castañeda Gonzales Diego Alonso*

Guerra Guerra Jorge Alejandro

ENTREVISTADO:

Apellidos y nombres: *Pierre Huaman Grados*

Cargo: *Jefe de Producción*

I. ASPECTO ERGONÓMICO.

1. ¿Cuál es la altura de mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa?

Minima = 1.65 m

Maxima = 1.79 m

2. ¿Qué tipos de trabajos realizan los operarios en los que intervengan el uso de los brazos para manipular objetos? Mencione las actividades, los equipos o herramientas que manipulan.

*Carga y descarga de soldadura, taladros
y ensamble.*

3. ¿Durante el desarrollo de sus actividades ha tenido alguna dolencia por fatiga en algún parte de su torso o extremidades superiores? Mencione en que parte.

No

II. ASPECTO DE DISEÑO.

4. Desde su perspectiva mencione ¿Qué características técnicas (Ejemplo: flexibilidad, confort, resistencia) esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo de manera más eficiente?

Flexibilidad - Confort - Resistencia - Seguridad

5. En cuanto a autonomía ¿Cuánto tiempo considera usted que el exoesqueleto deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?

8 hr.

6. De su experiencia profesional mencione ¿En promedio por cuanto tiempo realiza alguna actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado? Mencione también el peso aproximado del objeto.

10 min

7. ¿La empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, toma trifásica o toma monofásica? Mencione con cual se cuenta junto a su capacidad.

Todo lo antes mencionado.

8. De su experiencia comente algún detalle adicional respecto del diseño ideal de este equipo, Ejemplos: Funciones deseables, problemas persistentes, innovación en el diseño, aspectos de seguridad, etc.

Seguridad para los operarios.

IV. ASPECTO ECONÓMICO.

9. Desde su perspectiva ¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?

5/. 2000.00

9.24. Anexo 22: Encuesta realizada al gerente de la empresa

ETRAL SAC:

9.4. Anexo 04: Entrevista

ENTREVISTA N° 03.

**ENTREVISTA PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA
ETRAL SAC RESPECTO AL DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE
EXTREMIDADES SUPERIORES**

ENTREVISTADOR:

Apellidos y Nombres: Castañeda Gonzales Diego Alonso

Guerra Guerra Jorge Alejandro

ENTREVISTADO:

Apellidos y nombres: Gianpero Tawjillo Neyra:

Cargo: Gerente.

I. ASPECTO ERGONÓMICO.

1. ¿Cuál es la altura de mínima y máxima de los operarios que laboran en la empresa?

Minima = 1.63 m

Maxima = 1.85 m

2. ¿Qué tipos de trabajos realizan los operarios en los que intervengan el uso de los brazos para manipular objetos? Mencione las actividades, los equipos o herramientas que manipulan.

*Montaje de Perfiles, carga y descarga
de material.*

3. ¿Durante el desarrollo de sus actividades ha tenido alguna dolencia por fatiga en algún parte de su torso o extremidades superiores? Mencione en que parte.

No.

II. ASPECTO DE DISEÑO.

4. Desde su perspectiva mencione ¿Qué características técnicas (Ejemplo: flexibilidad, confort, resistencia) esperaría de un sistema de asistencia física como el exoesqueleto para realizar su trabajo de manera más eficiente?

Seguridad, Confort, Confiabilidad.

5. En cuanto a autonomía ¿Cuánto tiempo considera usted que el exoesqueleto deba funcionar de manera continua para que sea de ayuda en su trabajo?

6 horas.

6. De su experiencia profesional mencione ¿En promedio por cuanto tiempo realiza alguna actividad que requiera sostener o levantar un objeto pesado? Mencione también el peso aproximado del objeto.

8 minutos

7. ¿La empresa cuenta con algún equipo compresor de aire, bomba hidráulica, toma trifásica o toma monofásica? Mencione con cual se cuenta junto a su capacidad.

todo lo antes mencionado.

8. De su experiencia comente algún detalle adicional respecto del diseño ideal de este equipo, Ejemplos: Funciones deseables, problemas persistentes, innovación en el diseño, aspectos de seguridad, etc.

Considerable carga de levante.

IV. ASPECTO ECONÓMICO.

9. Desde su perspectiva ¿Cuánto cree usted que sería una inversión razonable o accesible para la implementación de un exoesqueleto de extremidades superiores?

S/ 1500.00