



Revista Digital La Pasión del Saber

ISSN:2244-7857 / Depósito Legal: ppi200902CA3925

Diseño y construcción de un Prototipo de Exoesqueleto como multiplicador de las capacidades humanas

Carlos, Gubaira Viso¹
<https://orcid.org/0009-0007-7142-1370>
Universidad José Antonio Páez
Valencia, Venezuela.

Gustavo, García Pérez²
Universidad José Antonio Páez
Valencia, Venezuela.

Fernando, Montero Pasamar³
Universidad José Antonio Páez
Valencia, Venezuela.

Recibido: 21-05-2024
Aceptado: 05-06-2024

Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en la creación de un prototipo funcional de exoesqueleto que releve al ser humano a la hora de elevar o transportar una carga externa, permitiendo una actividad suave y libre de lesiones, además de demostrar que el cuerpo humano puede ser potenciado mecánicamente por medios externos. El presente trabajo requirió de un análisis sustancial acerca de la biomecánica del cuerpo humano, con el fin de obtener un diseño que permitiera cumplir con los objetivos establecidos. Tomando en cuenta las diferentes tecnologías existentes para la movilización de un sistema afín, se basó el diseño en la utilización de actuadores lineales, permitiendo una alta ganancia mecánica mientras garantiza al operador una seguridad plena gracias a su posibilidad de bloqueo al estar desenergizado. Se presenta una investigación del tipo tanto especial, documental como de campo ya que englobó actividades que son representativas de cada categoría, a su vez se le dio un enfoque cuantitativo por el hecho de que los resultados obtenidos fueron medidos bajo los parámetros de diseño en comparación a lo obtenido en la realidad.

Palabras clave: Exoesqueleto, Diseño, Biomecánica, Mecatrónica

¹Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad José Antonio Páez, especialista en mecatrónica e impresión 3D. Correo electrónico: cationio24@gmail.com.

²Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad José Antonio Páez, con experiencia en el área de mantenimiento, diseño mecánico y gestión de proyectos de mejora continua. Correo electrónico: gagp02@gmail.com

³Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad de Carabobo, Mphil. Mecánica aplicada.

Design and construction of an exoskeleton to improve human's capabilities

Abstract

The present degree work focuses on the creation of a functional exoskeleton prototype that relieves the human being when lifting or carrying an external load, allowing a smooth and injury-free activity, as well as demonstrating that the human body can be mechanically enhanced by external means. The present work required a substantial analysis of the biomechanics of the human body, in order to obtain a design that would meet the established objectives. Taking into account the different existing technologies for the mobilization of a related system, the design was based on the use of linear actuators, allowing a high mechanical gain while guaranteeing full safety to the operator thanks to its possibility of blocking when de-energized. A special, documentary and field research is presented, since it included activities that are representative of each category, and it was given a quantitative approach because the results obtained were measured under the design parameters in comparison to what was obtained in reality.

Keywords: Exoskeleton, Design, Biomechanics, Mechatronics.

Introducción

El cuerpo humano puede ser perfectamente modelado como una máquina, la cual no queda exenta a someterse a esfuerzos y desarrollar potencia, lo que puede conllevar a experimentar fallas crónicas en función del desgaste del sistema musculoesquelético ya sea por trabajos forzados, por posturas inadecuadas, trabajos repetitivos o incluso por el paso del tiempo y la debilitación de tejidos. Este tipo de lesiones afectan directamente la calidad de vida del individuo, sencillamente por el hecho de que perderá cualidades mecánicas que le permitan desarrollar sus actividades diarias; un claro ejemplo serían los deportistas que al sufrir cierto tipo de lesiones no vuelven a ser los mismos, su cuerpo no sana de la misma manera y comprometen su carrera como atletas.

Si se realiza un análisis mecánico al cuerpo humano, como si se tratase de una máquina, se puede determinar con relativa facilidad que el cuerpo humano no está diseñado para desarrollar fuerza, de hecho, la mayoría de sus palancas son de tercer grado, las cuales generan movimiento (o velocidad) más no proporcionan ganancia mecánica. Esta es la razón por la cual el ser humano es más débil proporcionalmente que cualquier otra especie del reino animal; un claro ejemplo es el de las hormigas, quienes a pesar de su reducido tamaño pueden soportar hasta 10 veces su peso, cosa que el ser humano no puede lograr. Se puede apreciar con mayor detalle la clasificación de las palancas de fuerza en la anatomía humana en la figura 1.

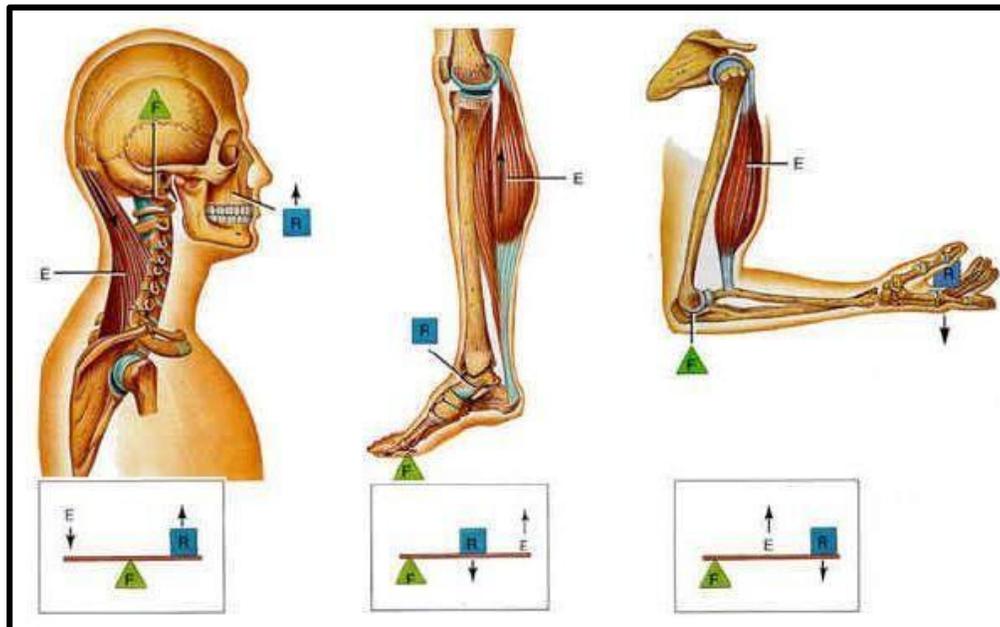


Figura 1. Tipos de palanca del cuerpo humano
Fuente: GSE (2001)

El cuerpo humano se puede modelar perfectamente como una máquina, de hecho, cuenta con un almacenamiento de energía el cual debe recargarse constantemente, se agota, se sobrecarga, cuenta con actuadores, sistema eléctrico y su propio computador para procesar la información; la diferencia entre el cuerpo humano y las máquinas realizadas por el hombre es que el primero es totalmente autorregulable y sostenible, haciéndolo la máquina perfecta, pero como máquina al fin, no está exento de problemas mecánicos, el mismo sufre de desgaste, roturas, fatiga y con el tiempo su vida útil se va acortando, los músculos y huesos se debilitan e incluso las mismas articulaciones se van limitando en cuanto al movimiento. Esto es una realidad que vive el ser humano en su ciclo de vida, solo que no todos lo presentan con la misma frecuencia ni en el mismo periodo de su vida, las actividades diarias y sus estilos de vida serán aceleradores o ralentizadores de estos efectos.

El cuerpo humano es por mucho considerado la máquina perfecta, todo esto por sus sistemas de autorregulación, intercambios energéticos, capacidades motrices y grados de libertad bajo una estabilidad óptima. Sin embargo, a pesar de estas consideraciones, existen límites infranqueables que residen en la estructura ósea y muscular, ya que los huesos pueden fracturarse; por otro lado, están los tendones, que a pesar de que estos pueden aumentar su tamaño y fortalecerse, no son capaces de exceder un límite de fuerza sin romperse, por ello, para el ser humano, el hecho de elevar sus capacidades físicas siempre ha sido un reto, ya que una persona promedio puede desarrollar potencias de trabajo de 70W a 140W de manera continua y más de 3000W de manera instantánea, encontrándose posterior a dicho umbral en una zona de peligro para su integridad física.

Este tipo de limitaciones o problemas mecánicos no solamente afectan al individuo en el sentido de inhibirlo de ciertas capacidades motrices, pérdida de fortaleza, movilidad e incluso en factor tiempo por los períodos de recuperación si no también afectando a empresas e instituciones que presenten casos de lesiones laborales, donde la misma no solo debe cargar con las multas impuestas por el LOPCYMAT en caso de lesiones al trabajador e infracciones de seguridad por parte de la empresa que pueden ascender hasta las 75 unidades tributarias sino que también deberá cubrir los gastos médicos sumado a los períodos de reposo en los cuales el trabajador no traerá ningún beneficio a la empresa.

La problemática presentada tiene un impacto mayor en aquellos países menos industrializados donde la automatización no ha tomado tanto campo de acción y los trabajadores de las mismas siguen siendo sometidos a trabajos repetitivos y forzados, sobre todo en Latinoamérica donde estos casos son muy latentes. “Las pérdidas económicas por enfermedades y lesiones laborales en América Latina oscilan entre 9% y 12% del PIB” (García-Salirrosas & Sánchez-Poma, 2020, p.06). Por otro lado, llevando la problemática a un nivel más específico se presenta el caso de Venezuela, donde el mismo problema es quizás un poco más pronunciado ya que se encuentra en la brecha entre países industrializados y no industrializados de Latinoamérica, donde el sector industrial no cuenta con los suficientes avances tecnológicos que permitan delegar trabajos rutinarios a máquinas en vez de a seres humanos, donde nuevamente entra el juego el tópico principal de la investigación el cual no es más que potenciar las capacidades del cuerpo humano, las cuales se ven enfrentadas con las cargas laborales cíclicas abriendo el telón para futuras lesiones músculo esqueléticas a mediano y/o largo plazo.

Todo esto converge en un planteamiento del problema que se expone con la pregunta de ¿Cómo se pueden potenciar las capacidades físicas del cuerpo humano mediante el uso de la tecnología actual? Dicha pregunta se busca responder haciendo uso de la tecnología moderna, donde la mecatrónica hoy en día permite presentar soluciones tecnológicas bajo una diversidad de áreas, siendo la biomédica una de ellas; basado en esta premisa se propone como solución el diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto potenciador al cuál el usuario le delegue la carga a soportar quedando el mismo exento de riesgos lesivos en su tren superior. Teniendo todo esto en cuenta se plantea como objetivo general de la investigación: Diseñar y construir un prototipo de exoesqueleto como multiplicador de las capacidades físicas del cuerpo humano, que permita al usuario realizar trabajos repetitivos y reduzca el riesgo de lesiones, otorgando las facultades necesarias para levantar cargas que por sus propios medios requerirían de esfuerzos considerables.

Para poder conquistar el objetivo general de la investigación, se desglosa el mismo en una serie de objetivos específicos que permitan avanzar gradualmente en el prototipo, los mismos son:

1. Diagnosticar las variables del diseño y sus vinculaciones con el accionar del usuario
2. Analizar las variables que intervienen en la movilidad y multiplicación de fuerzas en las extremidades superiores de usuario
3. Seleccionar la alternativa que permita potenciar las capacidades físicas del cuerpo humano, y permita al usuario realizar trabajos repetitivos con las extremidades superiores, reduciendo el riesgo de lesiones
4. Diseñar el sistema de exoesqueleto seleccionado para multiplicar las capacidades físicas del cuerpo humano
5. Evaluar la viabilidad técnica, operativa, ambiental y económica del diseño elaborado.
6. Construir el prototipo bajo los criterios de diseño seleccionados.

La sustentación de esta investigación sienta sus bases en el hecho de mejorar las capacidades físicas del ser humano, lo cual tiene a su vez un impacto positivo y significativo en la salud del individuo particularmente aquellos que lleven una rutina diaria en la que se vean obligados a realizar actividades forzosas (trabajos rutinarios, cargas elevadas, malas posturas, entre otras) tanto en un entorno doméstico como laboral.

Asimismo, la incorporación de exoesqueletos en el sector industrial otorga beneficios a ambas caras de la moneda, tanto al personal como para la institución, ya que por un lado, cuida la salud de los trabajadores, permitiendo así un desempeño seguro y eficiente de sus actividades dentro de una planta y por el otro lado, reduce los riesgos de enfermedades o lesiones laborales contraídas en la planta que de existir deberán ser cubiertas por la propia empresa, siendo entonces esto un alivio ante posibles gastos significativos que la empresa podría contraer. Otra virtud es el hecho de que un operador mediante el uso del equipo pueda realizar trabajos en un menor tiempo y con un menor esfuerzo de su parte, ya que reduce los tiempos de descanso por fatiga muscular y siendo la máquina quien se someterá a los esfuerzos.

Desde el punto de vista académico y tecnológico presenta un gran avance en cuanto al desarrollo de tecnología en Venezuela se refiere, ya que es el primer prototipo de exoesqueleto potenciador funcional registrado en el país, además de posicionarse en la carrera a nivel mundial por desarrollar un dispositivo funcional, ergonómico, práctico y comercial (cosa que aún no se ha logrado) al ser esta una tecnología tan extensa y compleja de desarrollar, por ende todavía queda demasiada tela que cortar y camino por recorrer, donde la presente investigación sienta las bases de nuevos diseños o nuevas opciones de abordar el problema del diseño de un dispositivo como el que se plantea, sirviendo de referencia para futuros prototipos siendo parte del historial de posibles soluciones.

La presente investigación se enfoca en el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto potenciador exclusivamente para el tren superior, permitiendo tener un amplio rango de aplicaciones, ya sea en sectores industriales, militares e incluso domésticos; a pesar de que las características de diseño tienden a variar según el área en el que se desee usar,

el prototipo mismo puede dirigirse con un enfoque más dedicado a un área específica de interés ya que la proyección de la investigación tiene la suficiente profundidad y contenido como para desembocar en futuros estudios, abriendo la puerta a nuevos avances tecnológicos. Por otro lado, no se pretende desarrollar un producto comercial definitivo ni tampoco un prototipo enfocado en el área de rehabilitación médica o fisioterapéutico. Se centrará únicamente en el diseño y construcción de un prototipo básico y funcional que permita demostrar la efectividad y funcionamiento como potenciador de capacidades humanas y reductor de riesgo de enfermedades o lesiones músculo esqueléticas.

Como antecedentes de la presente investigación se rescataron proyectos afines al mismo de talla mundial donde el objetivo de cada uno de ellos aportaba una perspectiva distinta a lo que se pretende realizar. algunos de estos antecedentes son:

Peña (2021), realizó una investigación titulada “Diseño de los miembros superiores de un exoesqueleto de cuerpo completo para incrementar la capacidad de carga de la persona”. Dicho proyecto fue realizado para optar por el título de ingeniero mecatrónico en la Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Análogamente, Centeno (2021) presenta una investigación bajo el título “Exoesqueleto para codo”, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, con vistas a obtener la titulación de Maestro en Ciencias de la Electrónica.

Por otro lado, Camacho (2018) presentaron una investigación titulada “Diseño De Una Prótesis Biomédica Del Miembro Superior Para Mejorar El Desempeño De Actividades Cotidianas En Jóvenes Utilizando Materiales Accesibles”, en La Universidad Privada Del Norte, Lima, Perú. El proyecto fue realizado para optar por el título de ingeniero mecatrónico.

De igual forma, Cervantes y Vásquez (2021) efectuaron una investigación titulada “Extracción de Intención de Movimiento en Señales Electroencefalográficas para el control de una Prótesis de mano”, en La Universidad de Guadalajara, México, como requisito para optar al título de ingeniero biomédico.

Finalmente, Arango (2018) presentó una investigación titulada “Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Exoesqueleto Para Miembro Inferior De Infantes Con Discapacidad Motriz” en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. El proyecto fue realizado para optar por el título de ingeniero en mecatrónica.

Para el desarrollo del proyecto de investigación se hizo uso de diversas teorías que sustentarán al mismo y se partieron de ellas para poder obtener un diseño óptimo y sustentado bajo estándares académicos y científicos; al tratarse de un proyecto de investigación de carácter mecatrónico las teorías que salen a relucir se basan en ramas de la mecánica, la electrónica e incluso de ciencias de la computación, además se rescatan teorías anatómicas y biomecánicas por el hecho de ser un sistema que se

encontrará en contacto directo con el cuerpo humano. Estas teorías se enuncian a continuación.

Entre teorías centrales se presentan:

- **La teoría de la energía de distorsión máxima**, muy utilizada en la predicción de fallas de materiales medianamente dúctiles (como ciertos aceros) sometidos a distintos tipos de cargas, relacionando así a partir del círculo de Mohr los esfuerzos principales con la tensión máxima admisible.
- **La teoría de control**, La teoría de control estudia el control de sistemas dinámicos, modificando las variables del sistema para poder obtener el resultado deseado. Se trata de una combinación de las matemáticas y las distintas ramas de la ingeniería, como lo son la electrónica, la mecánica y la computación.
- **La teoría de la mecatrónica aplicada**, La mecatrónica se define como el área multidisciplinaria de la ingeniería que abarca las ramas de la mecánica, electrónica, informática y la ingeniería de control, permitiendo desarrollar sistemas automatizados e inteligentes a partir de la integración de las áreas previamente mencionadas que en la mayoría de los casos buscan aliviar o simplificar tareas a los seres humanos.
- **La teoría de la computación**, La teoría de la computación o informática se basa en el hecho de traducir problemas a lenguaje de símbolos, reglas lógicas y algoritmos que puedan sistematizar una solución, una vez sistematizado el proceso se puede decir que la solución fue computarizada.

Entre las demás bases teóricas presentes se encuentran:

- **Ingeniería biomédica**, área de la ingeniería que combina disciplinas como la electrónica, mecánica e informática en conjunto con diversas ramas de las ciencias de la vida con la finalidad de diseñar y crear tecnologías que sirvan de apoyo como equipos médicos, prótesis, avances en el mundo de los biomateriales, entre otras tareas.
- **Biomecánica**, rama que se encarga del estudio y análisis cinemático y dinámico de los eslabones que componen a un organismo vivo pudiendo entonces determinar características como: cargas, rangos de movimiento, cantidad de movimiento, palancas, momentos, entre otras.
- **Antropometría**, estudio de todas las dimensiones de partes del cuerpo como son, hueso, músculo, y adiposo (grasa) del tejido.
- **Inteligencia artificial**, sistemas computarizados que en base a diversos tipos de algoritmos y redes neuronales buscan imitar la capacidad de análisis y resolución de problemas como si de la mente humana se tratase.
- **Enfermedades musculoesqueléticas**, engloban todas aquellas lesiones que pueden ocurrir en el sistema óseo y/o muscular, ocasionando problemas motrices en el cuerpo humano, ya sea por el padecimiento de lesiones puntuales y transitorias o enfermedades degenerativas que con el pasar del tiempo degradan la vida útil de la zona afectada.

- **Par de apriete**, apriete es una característica que se relaciona directamente con el tensado o fuerza axial que ejerce el tornillo.

El marco metodológico hace referencia al ¿cómo se llevará a cabo la investigación? Para ello se debe definir previamente el tipo de enfoque que tendrá la investigación. En el caso del presente proyecto de investigación el mismo contará con un enfoque cuantitativo por el simple hecho de que se fundamenta en valores objetivos, calculables y medibles que tienen sustento matemático, esto por tratarse de un proyecto de diseño de ingeniería el cuál debe ser calculado previo a su construcción para garantizar su correcta funcionalidad, determinar sus características geométricas y esfuerzos máximos, entre otros.

El tipo de investigación que se presenta es de carácter “proyecto especial” ya que la misma está destinada a la creación de un proyecto tangible con el fin de dar solución a un problema específico poniendo a prueba dicha solución en un entorno real. La construcción del exoesqueleto se sustenta en la creación de un prototipo dirigido a solucionar debilidades musculoesqueléticas del cuerpo humano.

En cuanto al diseño de la investigación, la misma cuenta con dos tipos: un diseño experimental, ya que la misma someterá una o más variables no controladas en un entorno controlado con el fin de obtener resultados de procesos en los que se someterá a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento las variables de estudio, para observar los efectos o reacciones que se producen; por otro lado, se tiene un diseño de campo, ya que para llevar a cabo este tipo de proyecto es necesario un proceso de recolección de datos, entrevistas, análisis de la información obtenida, entre otros.

Hablando del nivel de la investigación, se puede decir que por medio del estudio de las variables obtenidas se aplicarán conocimientos de ingeniería y biomecánica para diseñar un prototipo funcional y ergonómico que permita potenciar las capacidades humanas, todo con el fin de reducir la carga mecánica a la que se somete el cuerpo humano y delegar la misma al dispositivo, esto trayendo como consecuencia una reducción del desgaste físico minimizando la probabilidad de padecer de lesiones musculoesqueléticas.

En cuanto a la población de estudio la misma engloba a los distintos tipos de exoesqueleto existentes, pudiendo clasificarse en dos tipos: exoesqueletos potenciadores y exoesqueletos de apoyo, siendo los primeros aquellos que aumentan las capacidades mecánicas del cuerpo humano y los segundos aquellos que ayudan a recuperar dichas cualidades. Por otro lado, la muestra de la investigación se acota únicamente a los exoesqueletos potenciadores, ya que son aquellos de interés y de mira para el proyecto de investigación, el prototipo a diseñar contará con dicha característica de potenciación.

Análisis-Disertación/Resultados/Discusión de Resultados

Dentro del análisis del proyecto de investigación se parte diagnosticando todas aquellas variables que sean de interés y requerimiento para el diseño a realizar, estas pueden ser tanto mecánicas como eléctricas dependiendo del subsistema que se esté analizando. Partiendo de las variables mecánicas, se deben establecer criterios de afinidad con el cuerpo humano, una de ellas son los grados de libertad que no son más que las capacidades de movimiento en los diferentes ejes de rotación que tiene cada articulación, para poder estudiar esta característica se puede hacer uso de la figura 2 donde se representan los grados de libertad pertenecientes al brazo humano.

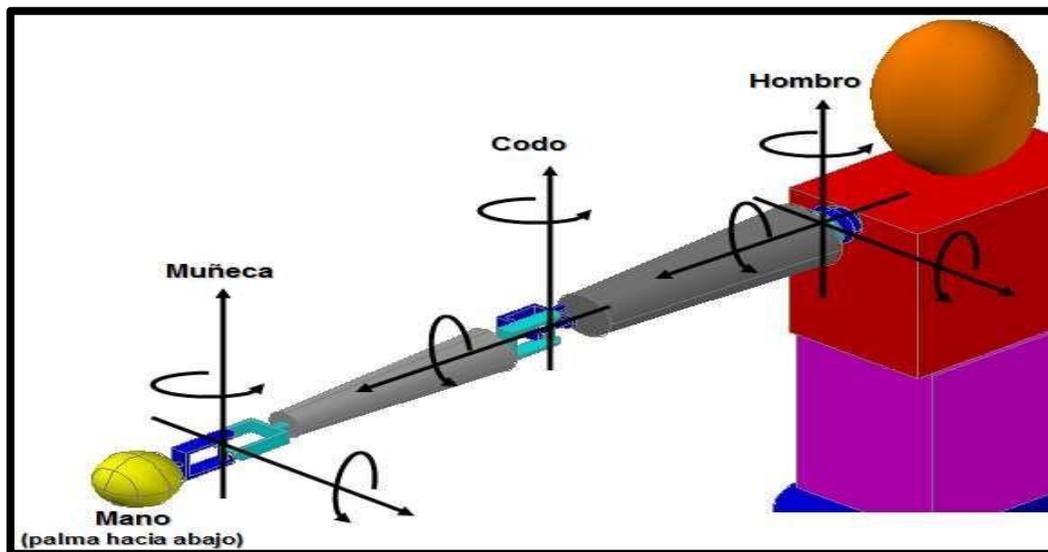


Figura 2. Grados de libertad del brazo humano
Fuente: D. Tibaduiza, N. Chio, J. M. Grosso y M. Anaya (2009)

Se puede apreciar que en el brazo humano se tienen 7 grados de libertad, 2 en la muñeca, 2 en el codo y 3 en el hombro, es decir, se tienen 7 ejes de rotación en los cuales se pueden desarrollar movimiento angular. Para el desarrollo del prototipo se acotaron dichos grados de libertad a los necesarios para permitir un funcionamiento y manipulación cómoda y eficiente, por lo tanto, se eliminaron los 3 grados de libertad de la muñeca, se mantuvo 1 grado de libertad en el codo y 2 en el hombro, permitiendo la rotación del antebrazo respecto al brazo por acción de la flexión del bíceps, la elevación frontal del hombro y la apertura de los mismos con el fin de expandir o cerrar el agarre de acuerdo al objeto o carga a elevar.

Otra variable mecánica que se debió acotar o manipular según los requerimientos fue el peso del prototipo, de manera de no solo garantizar su funcionamiento si no que el mismo se lleve a cabo de manera cómoda y ergonómica, siendo el mismo lo más ligero posible siempre y cuando cumpla con sus características mecánicas, se estimó un tope de 15kg como peso del sistema completo. Cabe recordar que se busca minimizar la carga mecánica que el usuario soporte en su rutina, no aumentarla, por ende, a pesar de que

el exoesqueleto será una masa extra para el portador, la misma debe minimizarse en lo posible, incluso ubicando su centro de masa de manera centrada y lo más bajo que se pueda, obteniendo una distribución de masa uniforme que no afecte la movilización, para ello se deben considerar tanto los materiales a utilizar como la geometría del prototipo.

Las variables de diseño protagónicas en la investigación son la fuerza y velocidad a desarrollar, es decir, la potencia mecánica añadida al usuario, para ello se diseñó en función de aquella de mayor interés, siendo en este caso la fuerza por el hecho de que realmente se busca es poder aumentar la capacidad de carga del usuario, obteniendo la velocidad como consecuencia de la fuerza.

A nivel eléctrico y electrónico las variables de diseño se consisten en la recepción de datos por sensado de la actividad eléctrica muscular y en la energía a utilizar, es decir, la autonomía del dispositivo bajo trabajo continuo. Tomando como punto de partida la energía necesaria, se debe procurar tener un sistema recargable y eficiente que permita alimentar tanto actuadores, sensores y procesadores de manera eficiente para un tiempo prudente, para ello se debe de implementar un sistema de alimentación de alta densidad energética, como lo son las baterías de litio o las de níquel metal-hidruro.

Desde el punto de vista anatómico se llegó a la conclusión de que el punto o eslabón más crítico o propenso a fallar es la columna, por ende, debe de ser esta la zona más protegida al utilizar el traje, evitando que la misma se vea sometida a la carga que se pretende levantar, para ello, lo ideal es transferir esta fuerza hacia las piernas al ser estas los eslabones o extremidades más fuertes del sistema musculoesquelético.

Con el fin de analizar la naturaleza de cada uno de variables diagnosticadas se hizo uso del diagrama de Ishikawa en función del hecho de multiplicar las capacidades biomecánicas del cuerpo humano, donde las ramificaciones corresponderán a las áreas a tratar para que el prototipo funcione según lo deseado, esto se puede visualizar a detalle en la figura 3.

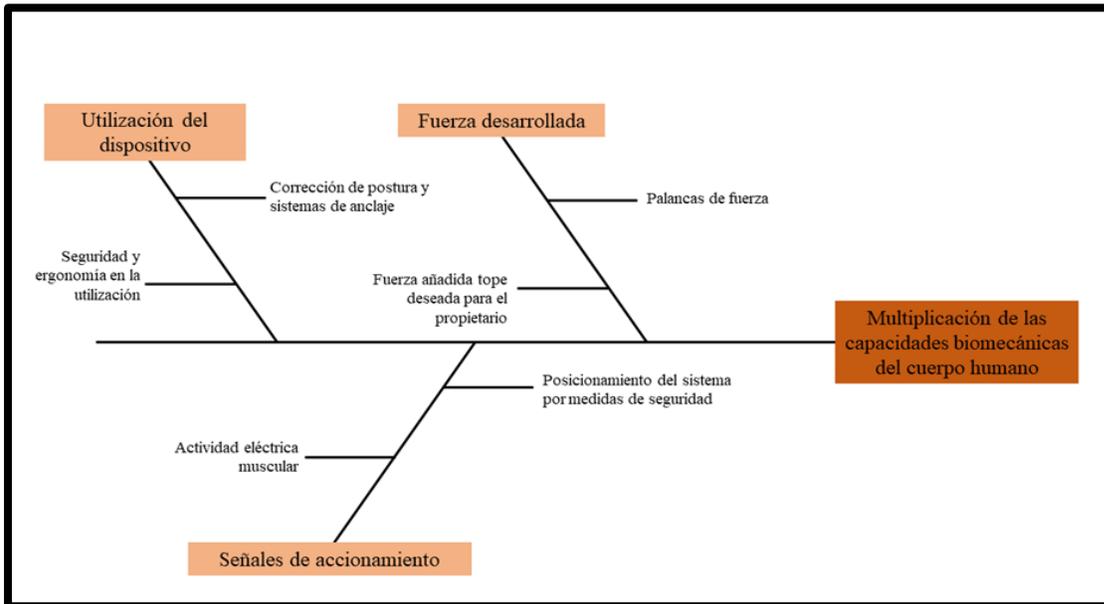


Figura 3. Diagrama de Ishikawa
 Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

Partiendo del diagrama de causa y efecto o de Ishikawa se puede observar que uno de los principales puntos a tratar es el de las palancas de fuerza, ya que de ellas dependerá la fuerza que ejercerá el exoesqueleto como ganancia extra a la nominal que el cuerpo humano presenta, por ende, serán criterios de diseños fijos en el desarrollo del prototipo. Para el análisis mecánico de la investigación se parte analizando la palanca menos favorable desde el punto de vista de fuerza que se presenta en el tren superior, esta es la del bíceps, ya que se obtiene una palanca de tercer grado entre la carga, el codo y la inserción del bíceps en el antebrazo, esto se puede apreciar con detalle en la figura 4. El objetivo es potenciar dicha palanca aumentando la fuerza que se pueda ejercer en ella.

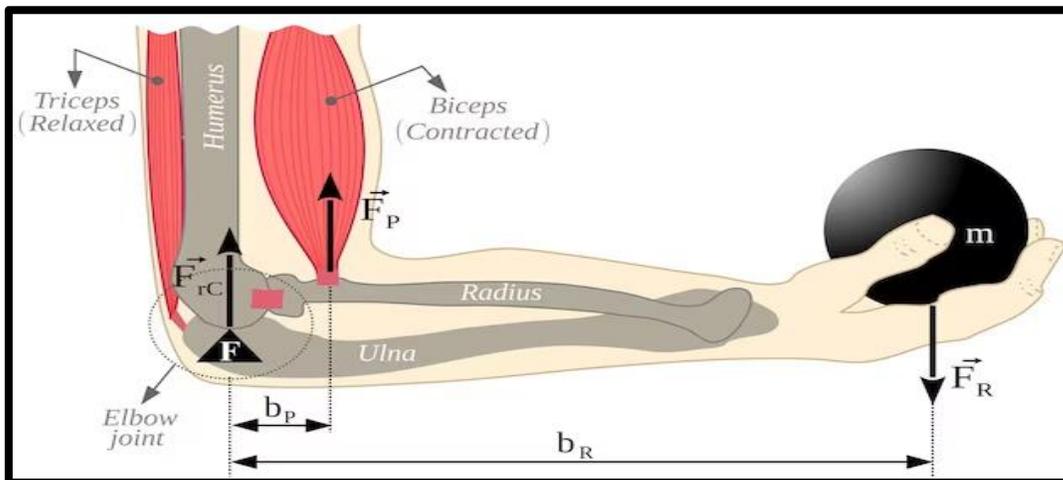


Figura 4. Palanca de fuerza en el brazo
 Fuente: Freepik (2010)

Dentro del tema ergonómico y de seguridad entra el equilibrio del sistema exoesqueleto humano, ya que se debe procurar que el centro de masa se mantenga siempre dentro del área de apoyo del conjunto con el fin de evitar accidentes producto de caídas por desequilibrio, esto se obtiene con una buena distribución de masa sumado a cierta capacitación a la que debe de someterse el usuario para la utilización del prototipo.

Con el fin de obtener un diseño definitivo del prototipo se plasmaron sobre la mesa diversas opciones para dar solución a la escogencia del sistema o mecanismo de accionamiento, para ello aplicaron ciertos criterios de selección en función de las virtudes que cada uno presenta al desarrollo del prototipo. En primera instancia, se plantearon 5 posibles soluciones que se enuncian a continuación:

- 1. Posible solución No.1:** Accionamiento por músculos neumáticos. Alta velocidad de respuesta, fuerzas elevadas en relación a su tamaño, requieren de un sistema compresor de gas. Se ven acotados por su retracción máxima.
- 2. Posible solución No.2:** Accionamiento por cilindros neumáticos, Alta velocidad de respuesta, carreras variables, fuerzas considerablemente elevadas, requiere de un sistema compresor de gas.
- 3. Posible solución No.3:** Accionamiento por servomotor y poleas. Torque elevado, distribución de fuerzas uniforme a lo largo del cable, movimiento limitado por los grados de rotación permisibles del servo (180° o 270° dependiendo del modelo).
- 4. Posible solución No.4:** Accionamiento por motor reductor y polipasto. Sistema de alta complejidad de construcción, facilidad y economía en cuanto a conseguir los componentes, torque elevado y alta ganancia mecánica por efecto del juego de poleas móviles.
- 5. Posible solución No.5:** Accionamiento por músculo neumático. Fuerzas sumamente considerables con un par de apriete relativamente bajo, elevada seguridad en cuanto al bloqueo del descenso (la carga no hace ceder al sistema), velocidades moderadas.

Para la escogencia de la mejor solución se evaluaron criterios según su orden de importancia, donde los mismos pueden ser visualizados en la tabla 1:

Tabla 1
Criterios de evaluación de posibles soluciones

CRITERIO	PONDERACIÓN	ORDEN DE IMPORTANCIA
Criterio 1 Buena confiabilidad funcional	6	Primero
Criterio 2 Bajo costo de fabricación	5	Segundo
Criterio 3 Mayor facilidad de construcción	3	Cuarto
Criterio 4 Mayor velocidad de respuesta	4	Tercero
Criterio 5 Menor mantenimiento	1	Sexto
Criterio 6 Menor peso	2	Quinto

Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

Evaluando las características en función de su ponderación y de la puntuación obtenida en cada categoría o criterio para cada una de las soluciones se obtiene una solución ganadora la cual correspondió a la solución N°5.

Una vez determinada la solución a llevar a cabo se procede a diseñar la misma, bajo criterios de diseño mecánicos y eléctricos con el fin de garantizar que los elementos de máquina, piezas y sistemas no fallen. Partiendo del diseño mecánico, se hace énfasis en que los criterios de fatiga o desgaste no formarán parte del proyecto ya que al tratarse de un prototipo que no experimentará cargas cíclicas con una frecuencia considerable ni mucho menos estará encendido por tiempos prolongados, la fatiga y el desgaste no serán factores de gran influencia, ahora bien, los esfuerzos combinados si forman parte de los criterios de diseño mecánico, haciendo uso de la teoría de la energía de distorsión máxima (Von Misses – Hencky).

Todos los cálculos realizados para la escogencia de los perfiles estructurales, perfiles para la conformación de los actuadores lineales, ejes, pasadores, tornillos y engranajes se resumen en la tabla número 2, siendo estos resultados productos de desarrollos matemáticos que involucran ciencias de materiales y diseño de ingeniería mecánica bajo criterios de análisis de fallas.

Tabla 2
Valores de diseño mecánico

Elemento	Criterio de Falla o diseño	Valores obtenidos
Perfil de aluminio estructural	Von Misses- Hencky	1,5"x1,5"X2,4mm
Pletinas de fijación de acero	Tracción pura	12mmx1,5mm
Ejes	Torsión	5mm
Ejes	Flexión	8mm
Pasadores	Corte	4mm
Tornillos	Corte	4mm
Vástago de actuador lineal	Pandeo	1"x1"x1,7mm
Camisa de actuador lineal	Esfuerzo simple	1,25"x1,25"x1,8mm
Par en la salida del actuador	Par de apriete	20kgcm
Fuerza axial del actuador	Par de apriete	200kg
Diámetro de la barra roscada	Pandeo y torsión	9mm
Paso de la barra roscada		2mm
Hilos de la barra roscada		1
Rodamientos del actuador	Catálogo SKF	639
Potencia requerida	Conservación de energía	142,68W
Potencia del motor	Conservación de energía	200W
Velocidad angular del motor escogido		35000RPM
Relación de transmisión obtenida (bíceps)	Relación de transmisión	64:1
Relación de transmisión obtenida (hombros)	Relación de transmisión	52:1
Velocidad de ascenso		1,85cm/s

Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

Los valores obtenidos en la tabla 2 fueron calculados en función de las características mecánicas a las que se somete el sistema, partiendo de la palanca que se genera no solo por efecto de la carga a elevar si no por el efecto conjunto de la carga sumado a la reacción que ejercerá el actuador lineal para contrarrestarla. Este principio se evalúa mediante un análisis de palanca y momento flector donde se tenían 2 posibles opciones, siendo la primera ubicar el efecto del actuador entre la carga y el fulcro o ubicarlo del otro lado del fulcro siempre a la misma distancia respecto al mismo por criterios de ergonomía (por ende, siempre se tendría una palanca de tercer grado en todo momento). Esto se puede apreciar con detalle en las figuras 5 y 6.

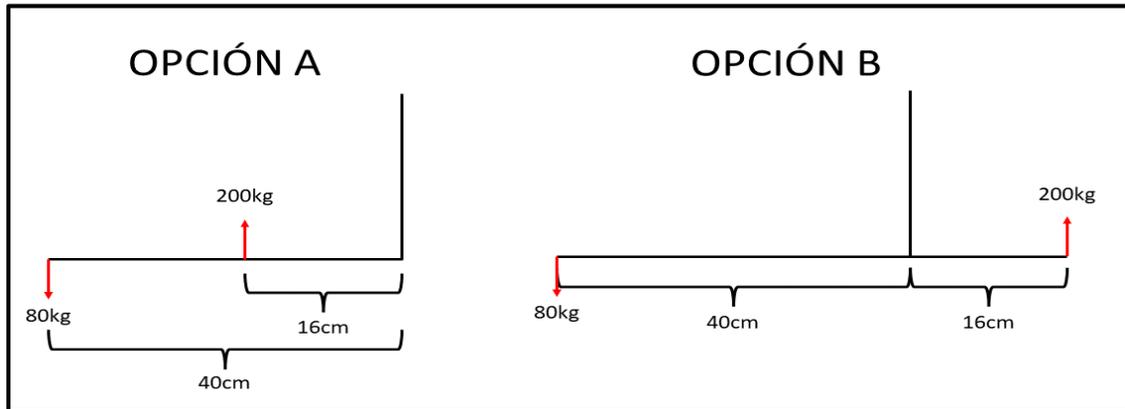


Figura 5. Ubicación de la fuerza ejercida por el actuador
 Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

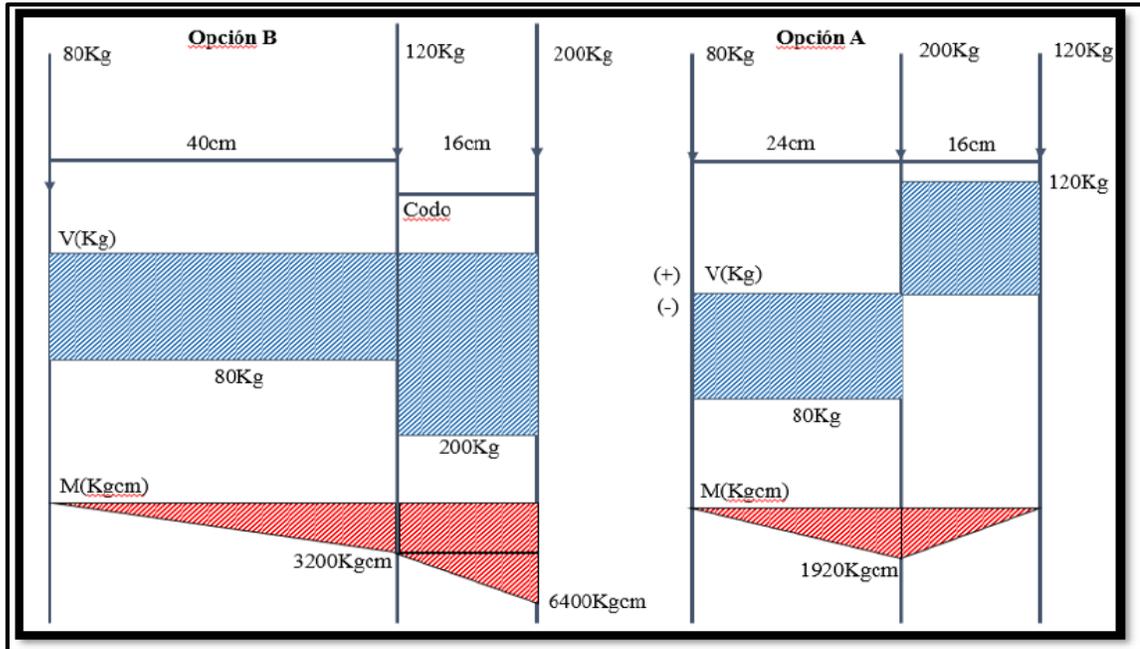


Figura 6. Diagramas de momento de cada opción
 Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

Claramente se puede apreciar que el momento flector en la opción B es mucho más elevado que en su contraparte, por dicha razón se seleccionó como punto de aplicación de la fuerza resistiva aquel ubicado entre la carga y el fulcro, ya que es menos probable que el brazo falle bajo dichas condiciones. Seguidamente se procede a dar noción de los problemas tratados en el diseño eléctrico del prototipo.

Para la alimentación del sistema se hizo uso de 40 baterías de níquel metal hidruro AA de 1,2 voltios y 2Ah de capacidad de carga, las mismas se agruparon en serie dentro de 2 paquetes los cuales a su vez se agruparon en paralelo uno respecto al otro, esto con

el fin de obtener en cada paquete 24V y aumentar la capacidad de carga del sistema a 4Ah (sistema similar al que se usa en los vehículos eléctricos). Dicha conexión se puede apreciar con mayor detalle en la figura 7.

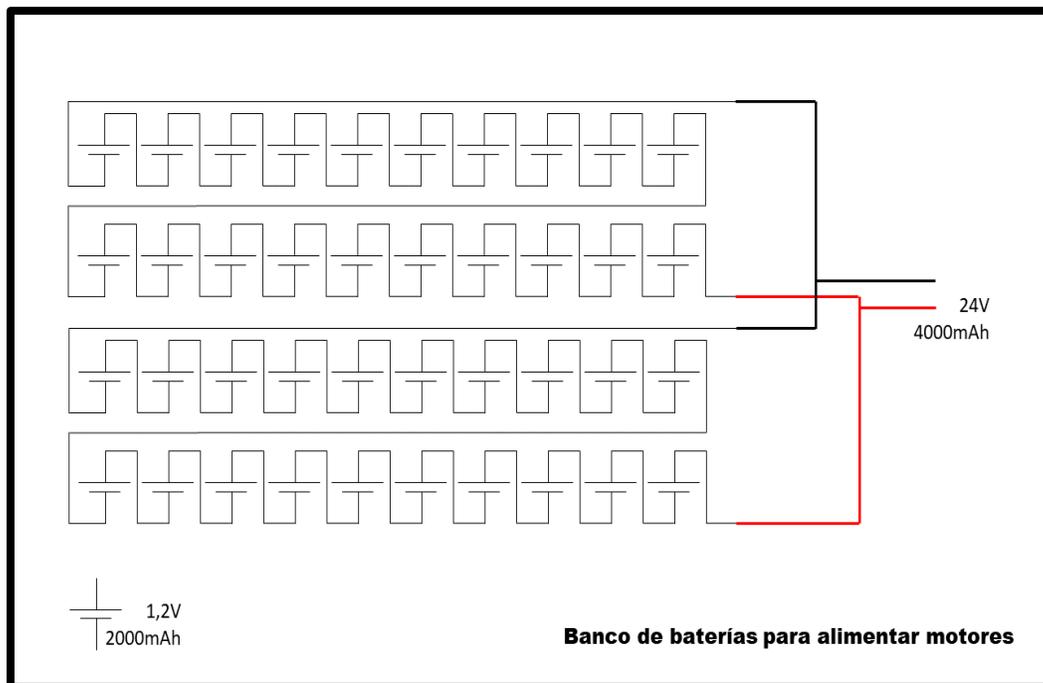


Figura 7. Bancos de baterías
Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

La alimentación del sistema electrónico es independiente de la de potencia, se alimenta mediante un paquete de baterías de 5 voltios, el mismo suministra la alimentación al Arduino y a los sensores simultáneamente. Por otro lado, el cableado utilizado debe soportar el amperaje que se maneja en el sistema, calculándose así bajo la condición más crítica que es los 4 motores accionados en simultaneo a plena carga, obteniendo calibres de 18AWG en la salida de los bancos de batería y de 14AWG en la entrada de cada motor.

Una vez diseñado el prototipo el mismo se materializó haciendo uso de herramientas básicas de taller, herramientas electrónicas y de soldadura blanda e incluso se utilizó la tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D) para la fabricación de diversas piezas plásticas. Los resultados obtenidos se observan en las figuras 8 y 9.



Figura 8 Exoesqueleto en reposo
Fuente: García G., Gubaira C. (2024)



Figura 9. Vista lateral y trasera del exoesqueleto
Fuente: García G., Gubaira C. (2024)

Conclusiones

Durante el desarrollo del trabajo, se lograron diagnosticar las variables requeridas para poder realizar un diseño satisfactorio. Se destaca la importancia de conocer las variables o características mecánicas del cuerpo humano, como afectan las mismas al desempeño diario y como se pueden potenciar, para este último punto se hace crítico el hecho de manejar los conceptos de palancas de fuerza. Al haber acotado los distintos factores que se debían tomar en cuenta para el diseño del prototipo, se estudió una serie de posibles soluciones, posteriormente determinando que la que mejor se adaptaba a las necesidades particulares que fueron planteadas fue el mecanismo de actuador lineal compuesto por una tuerca y una barra roscada, el cual tenía las mejores prestaciones de fuerza además de proporcionar una velocidad aceptable para actividades varias.

Con el sistema seleccionado se realizaron los cálculos y el diseño del prototipo, obteniendo una serie de resultados que avalan la construcción del mismo. Se obtuvieron valores para el dimensionamiento de las distintas partes que componen el diseño. Se encontró que el uso de motores DC de altas RPM, en conjunto con un sistema de reducción y el diseño del actuador lineal, permite crear un sistema factible de elevación de cargas, obteniendo la reducción necesaria a partir del torque requerido para obtener una fuerza axial de 200kg en la barra roscada y poder elevar las cargas planteadas.

A nivel técnico, se determinó que el diseño del prototipo fue exitoso desde el punto de vista mecánico como eléctrico ya que se obtuvo una fuerza ejercida por cada brazo de 76kg en las pruebas realizadas, lo que se encuentra 4kg por debajo de lo diseñado, por otro lado, se justifica el peso del conjunto el cual terminó llegando a los 14kg ya que la ganancia mecánica que se obtiene haciendo uso del mismo es de 152kg según los valores obtenidos. Las relaciones de transmisión seleccionadas se probaron múltiples veces bajo condiciones severas y no se vieron síntomas de falla a flexión o a desgaste. Desde el punto de vista eléctrico, los paquetes de baterías diseñados cumplen con la capacidad de carga e incluso no se sobrecalientan, protegiendo la vida útil de las mismas; por otro lado, el circuito de control de motores presentó un desempeño cómodo ya que la robustez de los relés da cierto margen de seguridad en cuanto a fallas eléctricas.

Se puede concluir que a pesar de no haber obtenido los valores topes de diseño (80kg de fuerza por brazo) se obtuvieron resultados excelentes y sumamente cercanos al valor de diseño, por lo tanto el proceso de diseño y construcción de un exoesqueleto potenciador de las capacidades humanas converge en un rotundo éxito a nivel técnico y funcional, presentando consigo una tecnología innovadora desarrollada a partir de material de desecho y con métodos de manufactura poco precisos en comparación a aquellos que utilizan maquinaria de precisión.

Referencias

Anaya M, Chio N., Grosso J., Tibaduiza D. (2009). Diseño De Un Exoesqueleto Mecatrónico De Brazo Basado En Screws Y Robots Paralelos Arango, L. (2018) Diseño Y Construcción De Un Prototipo De

- Exoesqueleto Para Miembro Inferior De Infantes Con Discapacidad Motriz. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Camacho M. (2018). Diseño De Una Prótesis Biomédica Del Miembro Superior Para Mejorar El Desempeño De Actividades Cotidianas En Jóvenes Utilizando Materiales Accesibles. Universidad privada del norte
- Centeno D. (2021). Exoesqueleto Para Codo. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- Cervantes, J. & Vásquez, M. (2021) Extracción De Intención De Movimiento En Señales Electroencefalográficas Para El Control De Una Prótesis De Mano. Universidad de Guadalajara
- Freepik (2010). Palanca, bíceps - codo - sistema mecánico antebrazo. Movimiento de antebrazo con carga en la mano https://www.freepik.es/vector-premium/palanca-biceps-codo-sistema-mecanico-antebrazo-movimiento-antebrazo-carga-mano_33790502.htm
- García-Salirrosas, Elizabeth Emperatriz, & Sánchez-Poma, Raquel Amelia. (2020). Prevalencia de trastornos musculoesqueléticos en docentes universitarios que realizan teletrabajo en tiempos de COVID-19. <https://dx.doi.org/10.15381/anales.v81i3.18841>
- Peña J. (2021). Diseño De Los Miembros Superiores De Un Exoesqueleto De Cuerpo Completo Para Incrementar La Capacidad De Carga De La Persona. Pontificia Universidad Católica del Perú