

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

**PROPUESTA DE PROTOTIPO DE UN EXOESQUELETO
DE MIEMBRO SUPERIOR “MANO” EN LA INDUSTRIA
AUTOMOTRIZ**

**PROTOTYPE PROPOSAL FOR AN “HAND” UPPER LIMB
EXOSKELETON IN THE INDUSTRIAL AUTOMOTIVE**

Ramírez, Jareth Sarahi¹

UVP Universidad del Valle de Puebla

II42778@uvp.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3552-5782>

López, Sergio²

UVP Universidad del Valle de Puebla

sergio.lopez@uvp.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9762-8109>

Recibido el 14 de febrero de 2026. Aceptado el 8 de abril de 2026.

Publicado el 30 de abril de 2026.

Reseña de Autor 1

Estudiante de la Universidad Del Valle De Puebla, cursando el octavo semestre de la carrera de Ingeniería Industrial, enfocada en la tesis de un prototipo de miembro superior “mano” para las estaciones de trabajo de cualquier sector industrial.

Reseña de Autor 2

Ingeniero Industrial por el Tecnológico Nacional de México Campus Puebla, Maestro en Ingeniería Administrativa y Calidad por la Universidad La Salle Benavente, Doctor en Alta Dirección por la Universidad del Valle de Puebla. Posdoctor en Administración de Negocios por el Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. TSU en Gestión y Administración de PyME por la Universidad Abierta y a Distancia de México.

Ha colaborado con organizaciones privadas de los sectores manufacturero, comercial y de servicios implementando Sistemas de Gestión de Calidad, desarrollando y mejorando procesos, gestionando información de sistemas y aplicándola en la toma de decisiones.

Ha trabajado en publicaciones e impartido conferencias en diversas instituciones como BUAP, UPAEP, CEUNI, IEU, UVP, etc., relacionadas con temas de liderazgo, productividad, motivación, marketing, ingeniería y uso de la información en procesos de investigación.

Resumen

Los exoesqueletos, especialmente para miembro superior de mano, son innovaciones tecnológicas que mejoran la calidad de vida de personas con lesiones musculoesqueléticas. Facilitan la inclusión social y laboral al promover la independencia y la eficiencia en actividades laborales, reduciendo la fatiga y el

riesgo de lesiones. Estos dispositivos no solo mejoran la productividad y la calidad del trabajo, sino que también contribuyen a crear entornos laborales más seguros y ergonómicos.

Por lo anterior, la presente investigación sobre la propuesta de un prototipo de miembro superior “mano” en la industria automotriz corresponde al diseño experimental derivado de que las variables constan de estudios cuantitativos y será manipulada para poder obtener información relacionada con el tema. Así mismo, es exploratorio Cuasiexperimental derivado de que es similar al tipo experimental puro o verdadero.

Sin embargo, los principales resultados obtenidos son: la estructura, la funcionalidad de cada material empleado para la mejora del exoesqueleto de miembro superior, como es el polímero poli láctico, por ser ligero, no tóxico y económico, brindando mayor confort y tiempo de vida prolongado.

El estudio del exoesqueleto de miembro superior con el polímero poli láctico revela su potencial para mejorar la funcionalidad y autonomía en individuos con falta de extremidades o enfermedades musculoesqueléticas destacando su relevancia en rehabilitación.

Palabras clave: Interfaz, Máquina-Hombre, Ergonomía, Exoesqueleto, Integración.

Abstract

Exoskeletons, especially for the upper limb of the hand, are technological innovations that improve the quality of life of people with musculoskeletal injuries. They facilitate social and labor inclusion by promoting independence and efficiency in work activities, reducing fatigue and the risk of injury. These devices not only improve productivity and quality of work, but also contribute to creating safer and more ergonomic work environments.

Therefore, the present investigation on the proposal of a prototype of an upper limb “hand” in the automotive industry corresponds to the experimental design derived from the fact that the variables consist of quantitative studies and will be manipulated in order to obtain information related to the topic. Likewise, it is exploratory Quasi-experimental derived from the fact that it is similar to the pure or true experimental type.

However, the main results obtained are: the structure, the functionality of each material used to improve the upper limb exoskeleton, such as the polylactic polymer, because it is light, non-toxic and cheap, providing greater comfort and life time. dragged on.

The study of the upper limb exoskeleton with polylactic polymer reveals its potential to improve functionality and autonomy in individuals with missing limbs or musculoskeletal diseases, highlighting its relevance in rehabilitation.

Keywords: Interface, Machine-Man, Ergonomics, Exoskeleton, Integration.

Introducción

A lo largo de las investigaciones de hace algunas décadas, los exoesqueletos son fundamentales para la calidad de vida en los usuarios, principalmente de la mano que representa una innovación tecnológica con un impacto social significativo en personas con discapacidades y en centros de trabajo como en empresas automotrices.

Estos dispositivos permiten a individuos con limitaciones físicas realizar actividades laborales promoviendo la independencia y la inclusión en la sociedad. La tecnología de exoesqueletos no solo restaura la funcionalidad perdida, sino que también desafía las percepciones tradicionales sobre las capacidades de las personas, fomentando con esto un cambio cultural hacia la seguridad y cuidado en la salud.

Esto beneficia a los trabajadores para minimizar los esfuerzos durante las jornadas laborales para tener un mayor rendimiento en su estancia, brindando gran capacidad de apoyo para evitar posibles desgastes articulares o lesiones musculoesqueléticas.

Planteamiento del problema

Por lo expuesto anteriormente, en las últimas décadas en diversos países se han desarrollado proyectos con alcances múltiples con respecto a prototipos de miembro superior, principalmente de brazo o mano, muchos de ellos con objetivos a nivel industrial en el que se ha perfeccionado a lo largo del tiempo.

Durante los años 90's varios estudios relacionados con la ergonomía en los humanos por problemas laborales contrajo intereses sociales y académicos, por lo que estudiantes y docentes comenzaron a investigar temas relacionados al funcionamiento del cuerpo humano con problemas motrices para así poder llegar a una solución ante desgaste articular y muscular en los trabajadores de las industrias, esencialmente automotrices y de carga. Mientras tanto, el uso de herramientas como softwares facilita la capacidad de diseño para tener un simulador de lo que sería un prototipo, como es el trabajo de estudiantes que utilizaron SolidWorks de apoyo permitiendo un mayor funcionamiento de los equipos a través de pruebas. Para ello, intervienen personas con un rango de edad de 20 a 60 años, quienes normalmente trabajan en las empresas y a través de esas pruebas mecánicas se obtiene un resultado.

Así mismo, las pruebas van dirigidas para aquellas personas que los trabajos cuentan con cargas robustas de peso, movimientos repetitivos o excesivos (en caso de ser jornadas laborales prolongadas) y con dichos resultados se ve beneficiado a aquellas personas quienes buscan generar un exoesqueleto más funcional y a menor costo, por lo que genera mayor búsqueda de datos e información en universidades, hospitales y centros de rehabilitación.

La importancia de un exoesqueleto de miembro superior es de gran relevancia, ya que brinda comodidad y mejora los procesos productivos en los trabajadores, las consecuencias son en los procesos que se pueden realizar en un tiempo menor al normal, así mismo, evita lesiones y permite minimizar la carga ejercida en el brazo o mano. Una lesión o accidente en los trabajadores genera gastos y daños en el margen de la empresa por lo que los exoesqueletos son una buena herramienta para mejorar y evitar riesgos laborales para minimizar, disminuir o eliminar dichos accidentes en su totalidad. Sin embargo, proyectos enfocados a la mejora de calidad de la vida de los usuarios y un mejor costo para la obtención de equipos de apoyo para traumas o enfermedades musculoesqueléticas e industriales, no se han realizado con toda precisión, ya que no son equipos 100% enfocados en un problema a causa de falta de visión e información, así mismo, carecen de diversos elementos para un buen funcionamiento a largo plazo. La falta de información e investigación en el campo, ha permitido un conocimiento más ambiguo, generando dudas, errores y una capacidad limitada en los exoesqueletos industriales.

La mayoría de los exoesqueletos son de gran tamaño, inclusive demasiado pesados por lo que dificulta el traslado de un lugar a otro. No obstante, algunos de los equipos son por medio de funcionamiento eléctrico ocupando baterías, las cuales son de rendimiento limitado. Otro motivo que aún no está solucionado es el costo de material y mano de obra para la generación y creación de los aparatos, por lo que se complica a la hora de trabajar, como el caso de utilización de resina epoxi reforzada.

Finalmente, las causas de un desgaste articular o un problema hacia la salud en la estancia laboral se desconoce, pues surgen varios factores que lo generan como puede ser la alimentación, el descanso, las máquinas, el propio usuario, entre otros, por lo que se requiere de mayor indagación para la creación de un exoesqueleto. Por todo lo anterior, la pregunta de investigación resultante es la siguiente:

¿Cuáles son los factores y beneficios de un exoesqueleto industrial de miembro superior en los trabajadores de 20 a 60 años en la industria automotriz del estado de Puebla en el periodo 2023-2024?

Revisión bibliográfica

1. Exoesqueleto humano

Las estructuras de distintos tipos de material creados para el apoyo de organismos vivos que fortalece una parte del cuerpo a través de los movimientos mediante una fuerza generada mecánicamente, son usualmente conocidos como exoesqueletos de interiores, principalmente para los humanos. Así mismo, este aparato permite mitigar el peso en las zonas del cuerpo (Harmonic Drive SE, 2024).

Un exoesqueleto es un dispositivo mecánico realizado al ajuste de una extremidad del cuerpo humano para mejorar la calidad de los usuarios de los movimientos y fuerzas que realizan diariamente o en un periodo determinado, siendo capaces de cambiar el estilo de vida en las personas con dificultad o problemas que necesiten rehabilitación por un accidente, o inclusive de nacimiento (Martínez, 2019).

Mediante las mejoras de los movimientos del ser humano con la utilización de una máquina o armazón, también conocido como exotrajes, otorga habilidades que no podrían ser capaces de realizarse sin él. Estos armazones no generan daño, son ligeros y mejora la postura de los usuarios en las jornadas laborales, evitando lesiones musculoesqueléticas por fuerza (Morillo, 2022).

Basado en las definiciones anteriores, un exoesqueleto para humanos es de gran importancia para mejorar las condiciones de vida en las personas y facilitar los trabajos en los usuarios con la creación de estos equipos, surgiendo nuevas mejoras con el paso de los años. Así mismo, son creados mediante las necesidades fisiológicas de cada usuario o paciente acorde a los trabajos realizados.

Figura 1

Exoesqueleto industrial



Nota. Obtenido de F. Martínez, 2022, ITURRI. Exoesqueletos: mejorando la vida humana - @ITURRI blog

1.1 Ergonomía

La ergonomía se considera una disciplina que conlleva factores como físicos, sociales, ambientales y organizacionales que se considera como un “todo”. Del mismo modo, trae consigo reglamentos, folletos e instrumentos de carácter normativo relacionados con la parte del trabajo de los usuarios y situaciones que requieran de un análisis para la mejora de las estancias. Antes bien, el concepto de ergonomía se refiere al conocimiento científico donde se adaptan técnicas de mejora y adecuación en sistemas y en panoramas artificiales basado en las necesidades y requerimientos de las personas a través de características para eficientar su salud y seguridad. Esto permite mejorar la vida laboral, reduciendo riesgos que ejerzan problemas futuros e identificarlos.

No obstante, se destaca como una ciencia que se encarga de del estudio de la interacción entre máquina-hombre en un campo laboral, de este modo, se centra en las necesidades y limitaciones que se tengan para aplicar diferentes técnicas permitiendo una mejor comodidad, una mayor productividad haciendo esto más eficiente y aumentando el compromiso y reducción de estrés en una zona de trabajo.

1.2 Anatomía y fisiología de la mano

La mano está conformada por 3 principales regiones: el carpo, metacarpo y las falanges. Así mismo, en esta zona la piel es más delgada y elástica permitiendo una mejor movilidad. Sin embargo, presenta en su exterior una presencia de vello y una red venosa dorsal que es más evidente en hombres que en mujeres y en personas con una complexión más delgada. En ella se encuentran los nudillos, que son las articulaciones metacarpofalángicas y al extender se encuentran los tendones extensores extendiéndose en el dorso. Mas llanamente, la piel de la zona palmar es más gruesa, en ella se encuentran los pliegues palmares en las que se visualizan dos eminencias, una que es la pulgar y la segunda del meñique. En vista de ello, Los dedos de las manos se encuentran las falanges, en donde hallamos la falange proximal, media y distal (Dimitris et al., 2020).

Por consiguiente, el número de huesos que contiene una mano es de 27, por lo que se divide en tres grandes grupos: falanges (divididos en: distal, media y proximal), metacarpianos (Cinco huesos largos) y carpianos (Ocho huesos). Principalmente las falanges son los huesos más pequeños que conectan directamente con los huesos metacarpianos y los carpianos localizados en la parte central de la mano (Pmedic,2022).

Además, en la mano se encuentran músculos para dar soporte a los movimientos que se generan acorde a una dirección basada en la función que se requiera, las cuales pueden ser una cabeza oblicua, que es un hueso grande y una transversa que

es profunda a los músculos tenares junto con el tendón del flexor largo del dedo pulgar. Sin embargo, en los músculos se localizan fibras entre la cabeza oblicua y la transversa, mediante el cual, la inserción de las dos cabezas es distribuida en la base de la falange proximal, la aponeurosis dorsal del pulgar y el hueso sesamoideo de su cara lunar.

Antes bien, la mano cuenta con un sistema nervioso periférico que se extienden desde el sistema nervioso central, lo que permite tener señales eléctricas hacia el cerebro a cualquier estímulo generado. Así mismo, se encuentra el nervio mediano, que es el nervio protagonista de la mano, ya que controla a los músculos y es quien proporciona la sensibilidad de los dedos, a excepción del meñique, para continuar, sigue el nervio radial, quien proporciona la cara dorsal de la mano quien se hace cargo del movimiento de flexión.

Sin embargo, las arterias de la mano que suministran sangre son: arteria radial, arteria cubital y la arteria palmar superficial que a través de ellas se ramifica una red de vasos sanguíneos que se encargan de llevar la sangre desoxigenada al corazón.

Figura 2

Anatomía de la mano



Nota. Pmedic, 2019. La mano humana: Explorando su anatomía, fisiología y relevancia en la fisioterapia - Pmedic

2. Enfermedades por desgaste articular

Para comenzar, una articulación es la unión de dos o más huesos que se encuentran en diferentes partes del cuerpo como, por ejemplo: mano, tobillo, brazo, pierna e inclusive en la columna vertebral se localizan varias articulaciones. Así mismo, incluyen en ellos tejidos blandos, cartílagos, ligamentos y tendones que cubren o rodean la unión de los huesos para evitar rozamiento y daño hacia los huesos. Sin embargo, algunas enfermedades pueden ocasionar dolor e hinchazón que pueden llegar a ser crónicas e incurables como: artritis, lupus o síndrome de Sjögren secundario (Medline Plus, 2021).

Por consiguiente, una de las enfermedades más comunes en mexicanos es la artritis reumatoide o poliartritis crónica, siendo una enfermedad sistemática que su principal punto de partida es el sistema inmune, lo que provoca inflamación y dolor e inclusive una deformidad en las articulaciones.

Dicho de otra forma, si una de las 140 articulaciones del cuerpo humano llegase a tener una irritación o inflamación, las actividades que comúnmente se realizan dejarían de hacerse afectando al sistema locomotor. Las causas más comunes para tener esta afección son: consumo de tabaco, virus y bacterias y congénitos. Sin embargo, el lupus es considerada una enfermedad con problemas en las articulaciones, músculos y huesos. El lupus puede causar mialgia o dolores en los músculos o calor en las zonas afectadas, causando dolor en la movilidad de caminar, sentarse o agacharse, así mismo, puede causar osteoporosis que es causada por la edad, hábitos de sedentarismo, entre otros (Lupus, 2024).

3.- Materiales para exoesqueletos

Los materiales en los exoesqueletos son de gran interés al momento de realizarlo, ya que de eso dependerá la calidad y duración del dispositivo en los pacientes o usuarios que lo implementen en su día a día por lo que deben ser ligeros que permitan el buen funcionamiento sin ser incomodo o pesado.

Uno de los principales materiales de los cuales debe estar compuesto un exoesqueleto, debe ser a través de aleaciones de aluminio, por ser un aluminio liviano y resistente, ya que esto debe estar compuesto las partes estructurales del dispositivo, además su maleabilidad permite que su fabricación y realización sea más personalizada para el usuario (Planes, 2023).

El segundo material es la fibra de carbono, conocida por su alta resistencia y su bajo peso que favorece al momento del peso del exoesqueleto, así mismo, contribuye a la durabilidad y la comodidad del exoesqueleto como el acero ligero de alta resistencia que debe ser considerado como el tercer material para la construcción del dispositivo por tener una alta protección y resistencia a la deformación. Dicho de otra manera, el siguiente material es el plástico reforzado con fibra de vidrio por tener propiedades de una alta flexibilidad (Dunai et al., 2019).

Estos materiales se utilizan en combinación para diseñar exoesqueletos que cumplan con los requisitos específicos de resistencia, durabilidad y comodidad para los usuarios, con el objetivo de mejorar la movilidad y la funcionalidad en una variedad de aplicaciones, desde la asistencia en la rehabilitación hasta el apoyo en entornos industriales.

4.- Avances tecnológicos de los exoesqueletos

Las investigaciones con respecto a los exoesqueletos son de gran avance a través de los últimos años, así mismo, se pretende mejorar la salud de los usuarios mediante tratamientos ortopédicos que mejoren la calidad de vida con el uso de impresión 3D, robots o incluso nanotecnología.

Sin embargo, en el país de España los avances tecnológicos han sido cada vez impresionantes beneficiando las cirugías con intervención robótica, tal es el caso del robot quirúrgico que tiene una gran precisión que su principal funcionamiento es para cirugías pélvicas obteniendo una realización quirúrgica menos invasiva,

menor tamaño de complicaciones y más efectiva. Así mismo, con impresión 3D, se han realizado diversos equipos, como el caso de Exovite, genera férulas que se imprimen en 30 segundos, siendo eficientes como la clínica de UCA de Vitoria que replica huesos afectados a través de una lesión con impresión 3D por lo que su precisión permite una calidad exuberante en los grados, ángulos y guías de borde (Orliman, 2020).

Así mismo, dos ejemplos de los avances que más han destacado son en el país de Corea del Sur y en España, en la que el primero en la empresa de Daewoo de sector automotriz, implementó un dispositivo exoesquelético en el que un trabajador podía levantar hasta 30 kilos de piezas con un sistema de energía con duración de 4 horas autónomas. El segundo es en España, en la planta Valenciana, en la empresa de Ford que desarrolló pruebas de exoesqueletos en sus trabajadores en las que consistían en líneas de montaje y ensamblaje de coches, recibiendo premios por la prevención y control de riesgos laborales (Téllez, 2020).

Figura 3

Primer exoesqueleto motorizado práctico.



Nota. Téllez, 2020, CCS . Exoesqueletos, los avances tecnológicos puestos a disposición de la salud y la prevención de enfermedades - ccs.org.co

4.1 Normatividad de dispositivos médicos

Uno de los principales requerimientos para la implementación de un exoesqueleto, es la normatividad. La normatividad de dispositivos médicos se refiere al conjunto de regulaciones y estándares establecidos por autoridades sanitarias y organismos internacionales para garantizar la calidad, seguridad y eficacia de los dispositivos utilizados en la atención médica. Estas normativas buscan proteger la salud de los pacientes y usuarios, así como promover la innovación en el desarrollo y la fabricación de dispositivos médicos.

Los fabricantes y proveedores de dispositivos médicos deben cumplir con estas normativas y obtener la aprobación correspondiente antes de poder comercializar sus productos. Además, estas regulaciones suelen requerir la realización de pruebas clínicas y evaluaciones de seguridad para demostrar la eficacia y la seguridad de los dispositivos médicos antes de su lanzamiento al mercado. El incumplimiento de estas normas puede resultar en sanciones legales y restricciones en la comercialización de los productos.

A saber, de la Norma Oficial Mexicana NOM-241-SSA1-2021 para buenas prácticas de fabricación de dispositivos médicos establece que todo sistema deberá ser gestionado a fines de calidad para el diseño e implementación del producto dispositivo fabricado para conocer el tamaño, y estructura. Motivo por el cual la secretaria de Salud, ejercerá el control sanitario antes y durante la fabricación siguiendo los criterios de la norma oficial mexicana antes mencionada.

5. Sector automotriz

El sector automotriz es una industria crucial a nivel global que se dedica al diseño, desarrollo, fabricación, comercialización y venta de vehículos motorizados. Este sector abarca una amplia gama de actividades que incluyen la producción

de automóviles, camiones, motocicletas, así como la fabricación de piezas y componentes relacionados con estos vehículos. Además, el sector automotriz se subdivide en varias áreas, como la fabricación de vehículos eléctricos, vehículos autónomos, vehículos de combustión interna y otros tipos de vehículos especializados.

Además, la industria automotriz está sujeta a cambios y desafíos constantes, como las fluctuaciones en los precios de la materia prima, la competencia global, las regulaciones gubernamentales, las tendencias del mercado y las preferencias del consumidor. Los avances en la tecnología y la innovación continúan impulsando la evolución de la industria, con un enfoque cada vez mayor en la conectividad, la movilidad compartida y las soluciones de transporte inteligente. En resumen, el sector automotriz desempeña un papel fundamental en la economía global y sigue evolucionando para adaptarse a las demandas cambiantes del mercado y las necesidades de sostenibilidad.

Por consiguiente, el sector automotriz es de gran importancia en el mundo, ya que se encargan de la creación y producción de vehículos circulantes que benefician a la entrega de productos y movilización de un gran entorno. A causa de esto, a nivel mundial, en 2021 se produjeron 80 millones 145 mil 988 vehículos de cualquier estilo, por lo que esta cantidad de producción contrajo un 3% más en comparativa con el año 2020, sin embargo, estas cifras arrojan un 13% menos que el año 2019, ya que la producción fue de 92 millones 183 mil 11 vehículos (Sánchez, 2020).

A continuación, se muestra una tabla con valores de países con más producción en el año 2021.

Tabla 1

Producción de vehículos de países del 2021

País	2019	2020	2021	Variación 2021/2019	Variación 2021/2020
China	25 750 650	25 225 242	26 082 220	1%	3%
EUA	10 892 884	8 821 026	9 167 214	-16%	4%
Japón	9 684 507	8 067 943	7 846 955	-19%	-30%
India	4 524 366	3 381 819	4 399 112	-30%	30%
Corea del Sur	3 950 614	3 506 774	3 462 404	-12%	-1%
Alemania	4 947 316	3 742 570	3 308 692	-33%	-12%
México	4 013 137	3 177 251	3 145 653	-22%	-1%
Brasil	2 944 988	2 014 055	2 248 253	-24%	12%
España	2 822 632	2 268 185	2 098 133	-26%	-8%
Tailandia	2 013 710	1 427 074	1 685 705	-16%	18%

Nota. Mena ,2023, Statista. La producción mundial de vehículos aumentó un 6% en 2022 | Statista

Riesgos en el área laboral de los trabajadores

Por otro modo, las lesiones musculoesqueléticas en trabajadores del sector automotriz son comunes debido a la naturaleza físicamente exigente de muchas tareas en este campo. Estas lesiones pueden afectar músculos, tendones, ligamentos, huesos y articulaciones. Algunos de los factores que contribuyen a estas lesiones incluyen movimientos repetitivos, posturas incómodas, levantamiento de cargas pesadas, vibraciones y contacto con herramientas y equipos. Como por ejemplo: las lesiones en los hombros y brazos: Movimientos repetitivos, como el ensamblaje de piezas o el uso de herramientas manuales, pueden llevar a lesiones en los hombros y brazos, como el síndrome del túnel carpiano, tendinitis y bursitis y por consiguiente las lesiones en las manos y muñecas: La manipulación constante de herramientas y piezas pequeñas puede dar lugar a lesiones en las manos y muñecas, como el síndrome del túnel carpiano, tenosinovitis y lesiones por esfuerzo repetitivo (Muñoz, 2021).

Para prevenir estas lesiones, es importante implementar medidas de ergonomía en el lugar de trabajo, proporcionar capacitación sobre técnicas de levantamiento seguro, rotar tareas para evitar movimientos repetitivos prolongados y fomentar el uso de equipo de protección personal adecuado. Además, los programas de salud y seguridad laboral deben ser una prioridad para identificar y abordar riesgos potenciales antes de que se conviertan en problemas graves.

En cualquier cosa, en el sector automotriz, los riesgos por lesiones musculoesqueléticas son principalmente por manipulación excesiva de piezas y componentes demasiado pesados que triplican el peso normal que podría soportar el cuerpo humano, una de los principales planes de acción son la capacitación de técnicas ergonómicas que benefician a la disminución de movimientos repetitivos, así como también el ajuste de las mesas y sillas de los centros de trabajo, inclusive la rotación de personal.

6.- Desafíos técnicos y futuras direcciones

La evaluación crítica de la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de los exoesqueletos en diversos campos implica considerar varios aspectos, como la tecnología, la economía, la ergonomía, la aceptación social y los impactos ambientales ya que estudios mencionan que el uso de un exoesqueleto a nivel industrial puede reducir un 60% de esfuerzo muscular.

Abordar estos desafíos y explorar estas direcciones futuras es fundamental para el desarrollo sostenible y la adopción generalizada de la tecnología de exoesqueletos en diversos campos. La colaboración interdisciplinaria jugará un papel crucial en este proceso. En los desafíos tecnológicos, se encuentra el peso y la ergonomía, es decir, la mayoría de los exoesqueletos son pesados y pueden causar fatiga a largo plazo en los usuarios. Posteriormente la dirección hacia el futuro conlleva a la investigación en materiales más ligeros y diseño ergonómico para reducir la carga física y mejorar la comodidad del usuario.

Método y Metodología

Los diseños de investigación experimental se basan en estudios de evaluación que conllevan intervención de proyectos a fines de obtener resultados de interés, por lo que se refiere a la manipulación intencional de una de las variables.

Por lo anterior, la presente investigación sobre una propuesta de un prototipo de miembro superior “mano” en la industria automotriz corresponde a este tipo de diseño, ya que una de las variables consta de estudios cuantitativos durante el periodo de estudio.

El diseño cuasiexperimental consiste en manipular una variable independiente antes de calcular la variable dependiente, por lo tanto, se elimina el problema de direccionalidad. Para fines de esta investigación se realiza el Cuasi experimental.

El enfoque mixto, combinarán aspectos de los 2 enfoques anteriores, darán como resultado una investigación con mayores alcances y resultados que permitirán analizar la problemática con una perspectiva integral. Por lo anterior, la presente investigación corresponde a un enfoque mixto

Para esta investigación no se contempla una población, ya que se considera un caso de estudio particular que va a buscar una población indefinida. Así mismo, como es un caso de estudio, se analizará los diferentes aspectos del exoesqueleto de miembro superior (mano) para fines de encontrar resultados que permitan mejorar la calidad de vida de los trabajadores de diferentes sectores industriales.

El presente proyecto se considera una propuesta derivada de limitaciones tecnológicas, ya que a veces, la tecnología necesaria para desarrollar un exoesqueleto funcional puede no estar completamente desarrollada o puede ser prohibitivamente costosa.

Para poder realizar la propuesta de un exoesqueleto de miembro superior “mano” se realizará el análisis de la investigación de necesidades y requerimientos basados en los problemas musculoesqueléticos comunes en los trabajadores y estableciendo los requisitos del exoesqueleto para abordar dichas especificaciones.

Así mismo, investigar las tecnologías como *AutoCAD* y diseños existentes de exoesqueletos de mano para desarrollar conceptos de diseño inicial basados en las necesidades identificadas, permitirán el desarrollo de familiarizarse con la interfaz y las herramientas disponibles en estos programas.

Dicho de otro modo, se debe realizar investigaciones como tutoriales en línea: Buscar tutoriales en línea específicos para *AutoCAD* o *SolidWorks*, así como también la documentación oficial: Visitar página web oficial de *AutoCAD* o *SolidWorks* para acceder a guías de usuario, manuales y documentación técnica.

Estos recursos suelen proporcionar una visión detallada de todas las funciones y herramientas disponibles. Al seguir estos pasos, se estará mejor preparado para comenzar a crear dibujos en programas como *AutoCAD* o *SolidWorks*.

La práctica constante y la disposición para aprender son clave para desarrollar tus habilidades en el diseño asistido por computadora. Por lo tanto, el siguiente paso es seleccionar el diseño detallado, que sea el más adecuado en base a las investigaciones previas y detallar las especificaciones técnicas y mecánicas del exoesqueleto.

Así mismo, la realización de simulaciones y pruebas virtuales del diseño para realizar pruebas de funcionamiento y sistemas ergonómicos en el programa de *AutoCAD* o *SolidWorks*. Por lo tanto, el siguiente paso es el seguimiento y mejora continua del diseño virtual del exoesqueleto para poder recapitular a corto y mediano plazo los ajustes en el diseño, por lo que se obtendrán cambios del diseño de miembro superior.

Resultados

De acuerdo con la aplicación de los instrumentos de la investigación, los promocionales resultados obtenidos son los siguientes:

El uso de ABC o BioMed Clear Resin brinda una gran oferta en el mercado por las grandes propiedades que tiene; por ser ligero, no tóxico y económico (Martínez, 2019).

Para comenzar, se realiza la medición de ambas manos (izquierda y derecha), por lo que esto permite tener medidas con una muestra real de una mano para posteriormente realizarlo en el programa *SolidWorks*.

Figura 5

Medición con regla de la mano derecha



Por lo tanto, se realiza el dibujo de cada una de las partes de la mano en la aplicación llamada *Paint*, esto permite la realización de un boceto para posteriormente ensamblarlo en el programa *SolidWorks*.

Figura 6

Modelo de perfil de pulgar en SolidWorks.

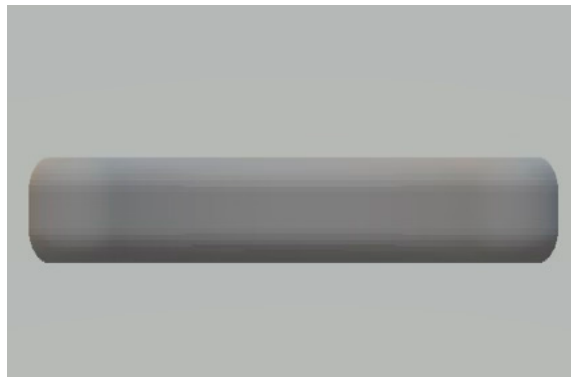
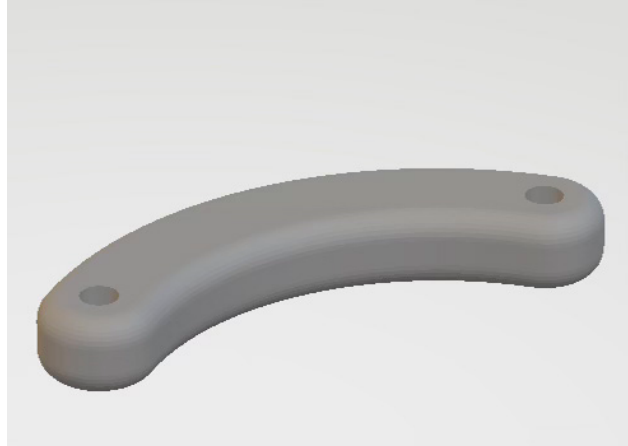


Figura 7

Modelo frontal del pulgar en SolidWorks



Brinda la visualización inicial: Aunque Paint no es un software de diseño avanzado, puede proporcionar una representación visual básica del concepto que estás desarrollando. Esto puede ser útil para comunicar ideas y conceptos iniciales antes de invertir tiempo y recursos en un diseño más elaborado. Así mismo, la planificación y diseño preliminar en Paint puede servir como punto de partida para planificar y diseñar el exoesqueleto del pulgar. Puede ayudarte a visualizar la forma y la función básica del dispositivo, así como a identificar posibles desafíos y consideraciones de diseño.

Sin embargo, aunque no sea sofisticado, la comunicación en un diseño en Paint puede servir como una herramienta de comunicación efectiva, especialmente si estás trabajando en un equipo multidisciplinario donde algunos miembros pueden no tener experiencia en diseño técnico. Puedes compartir el diseño para discutir ideas y recibir comentarios de colegas y expertos.

Así mismo, aunque no sea el diseño final, el dibujo en Paint puede servir como documentación preliminar de tu proceso de diseño. Puede ayudar a recordary documentar ideas y decisiones de diseño a medida que avanzas el proyecto del exoesqueleto.

Figura 8

Modelo de frontal del índice, medio, anular y meñique en SolidWorks

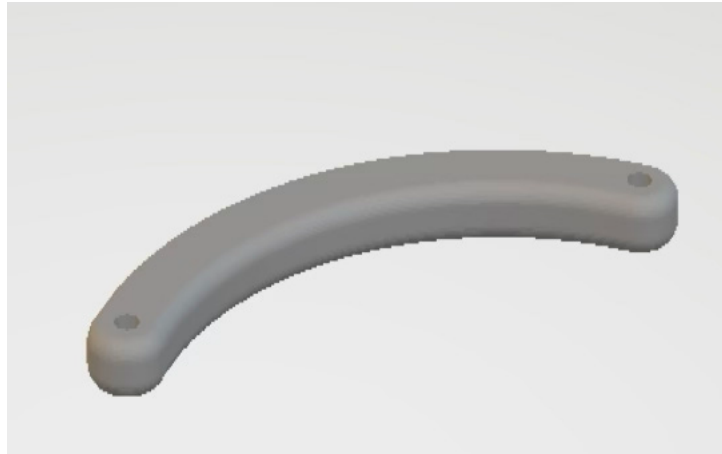
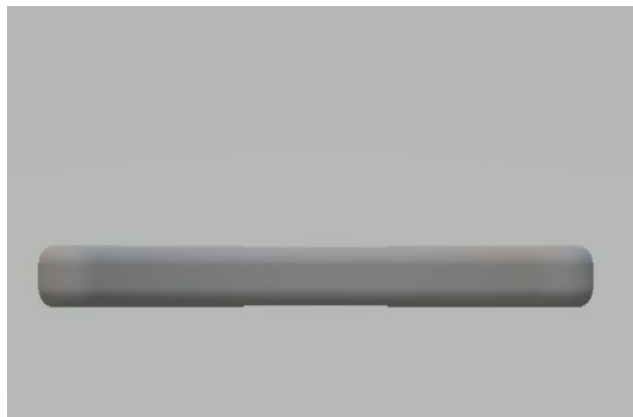


Figura 9

Modelo de perfil del índice, medio, anular y meñique en SolidWorks

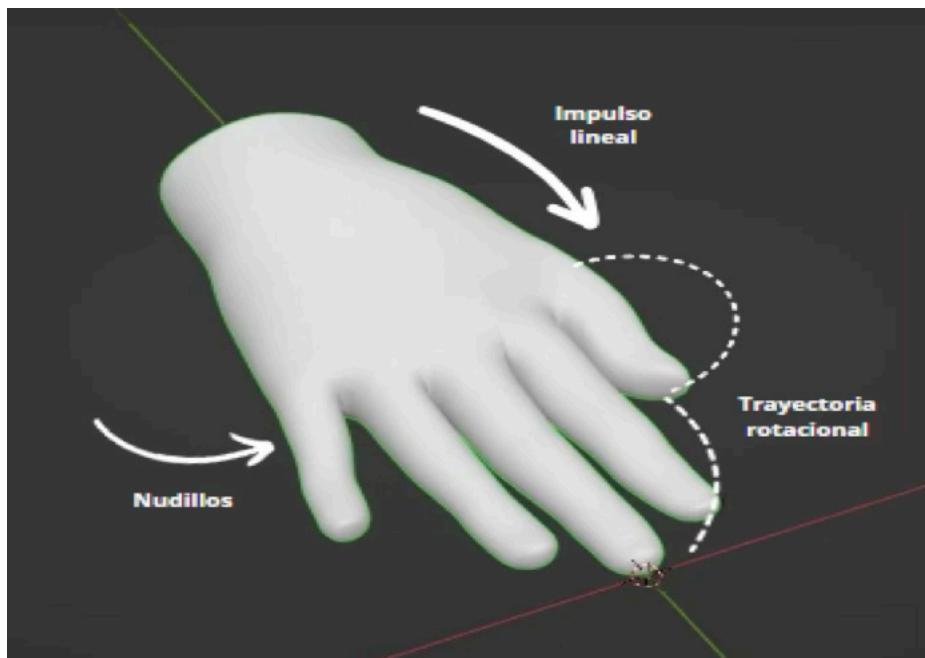


Lo mismo sucede con el índice, ya que se hace el mismo procedimiento anterior con todos los dedos restantes. Sin embargo, lo diferente es el tamaño y grosor. Mientras tanto, se opta por generar los puntos articulares de cada uno de los dedos (pulgares, índice, medio, anular y meñique), o también conocidos como mecanismos de enlace que enlaza 2 trayectorias.

El exoesqueleto de mano por cadena de eslabones o articulado será el diseño a implementar en este proyecto. Por medio del diseño, se muestra que, para poder realizar el exoesqueleto, deberá contener en la línea de impulso, una trayectoria circular rotacional junto con nudillos que permitan el movimiento del exoesqueleto. Así mismo, entre más simple, es más funcional, esto quiere decir que es más fácil de ensamblar.

Figura 10

Modelo en SolidWorks de la mano derecha



Por lo que realiza un concéntrico, lo que permite que gire sobre el mismo centro de rotación del mismo eje.

Estas piezas permiten el primer eslabón de unión del exoesqueleto de mano.

Figura 11

Diseño en SolidWorks del eslabón de los dedos

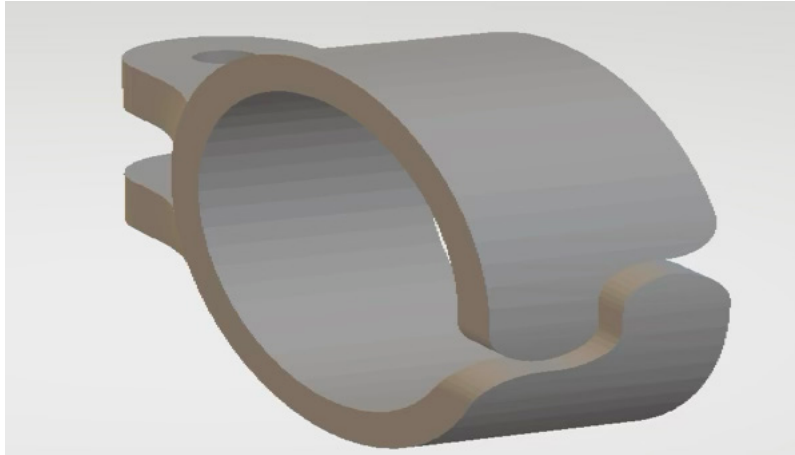
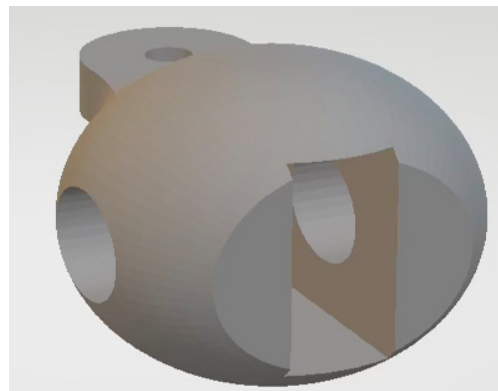
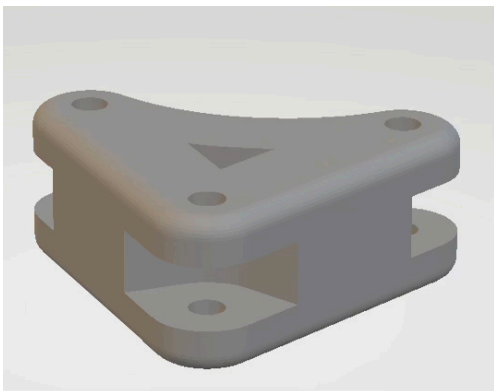


Figura 12

Modelos en SolidWorks de las piezas que unen los eslabones con la estructura de los dedos



Así mismo, se muestra una tabla donde describe las características propias de los materiales del uso de exoesqueletos para facilitar el mecanismo de función.

Tabla 2

Parámetros de análisis de funcionalidad de exoesqueletos

Característica	Polímero Poli Láctico (PLA)	ABC o BioMed Clear Resin	Titanio
Peso	Ligero	Moderado	Pesado (pero ligero para metal)
Resistencia Mecánica	Moderada	Alta	Muy alta
Durabilidad	Baja a moderada	Alta	Muy alta
Biocompatibilidad	Buena (biodegradable)	Muy buena	Excelente
Costo	Bajo	Moderado	Alto
Facilidad de Fabricación	Alta (impresión 3D)	Alta (impresión 3D)	Baja (procesos avanzados)
Resistencia a la Corrosión	Baja	Alta	Muy alta
Rigidez	Baja	Moderada	Alta
Flexibilidad	Alta (dependiendo del diseño)	Moderada	Baja
Aplicaciones	Prototipos, partes no estructurales	Componentes médicos, prótesis	Componentes estructurales, partes críticas

Característica	Polímero Poli Láctico (PLA)	ABC o BioMed Clear Resin	Titanio
Procesabilidad	Fácil (termoformado, impresión 3D)	Moderada (resinas)	Difícil (maquinado, forjado)
Impacto Ambiental	Bajo (biodegradable)	Moderado	Alto (minería, procesamiento)
Estabilidad Térmica	Baja	Moderada	Muy alta
Uso en Exoesqueletos	Partes no críticas, prototipos	Partes médicas, componentes no estructurales	Estructura principal, partes críticas

Nota. UNAM, 2019. Una vida de plástico.

Análisis:

Polímero Poli Láctico (PLA):

Ventajas: Fácil de procesar y bajo costo. Biodegradable y ligero, ideal para prototipos y componentes no estructurales.

Desventajas: Baja durabilidad y resistencia, no apto para partes críticas de exoesqueletos.

ABC o BioMed Clear Resin:

Ventajas: Alta biocompatibilidad, buena resistencia y durabilidad, adecuado para componentes médicos y prótesis.

Desventajas: Moderado costo y facilidad de fabricación comparada con PLA. No tan resistente como el titanio para aplicaciones estructurales.

Titanio:

Ventajas: Excelente resistencia, durabilidad, y biocompatibilidad. Ideal para partes críticas y estructurales de exoesqueletos.

Desventajas: Alto costo y dificultad en el procesamiento. Más pesado que los polímeros, aunque ligero para ser un metal. Cada material tiene sus propias ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación específica dentro del diseño de exoesqueletos. Los materiales plásticos como PLA y resinas como BioMed Clear Resin son más adecuados para partes no estructurales y componentes médicos, mientras que el titanio es esencial para las partes que requieren alta resistencia y durabilidad.

Conclusiones y discusión

La investigación y desarrollo de exoesqueletos de mano representan una convergencia significativa entre la biomecánica, la ingeniería robótica y la neurorrehabilitación, reflejando tanto los alcances como las limitaciones en el proyecto.

Algunos de los alcances más importantes de la implementación de exoesqueletos destacan que son eficaces en los post-accidentes, promoviendo la neuro plasticidad a través de la repetición de movimientos guiados. Esta tecnología facilita la recuperación de la funcionalidad motora, logrando mejoras en la fuerza y la coordinación de la mano afectada. Así mismo, la capacidad que estos dispositivos brindan en la vida cotidiana para asistir a personas con discapacidades motoras permanentes es notable. Los exoesqueletos amplifican los movimientos y la fuerza de la mano, permitiendo a los usuarios realizar tareas cotidianas con mayor independencia. Esto mejora significativamente su calidad de vida y autonomía por el uso de tecnologías artificiales y materiales ligeros que permite tener un mejor alcance. Sin embargo, las deficiencias de los exoesqueletos son por el alto costo de producción y mantenimiento de estos dispositivos, limitando a la sociedad afectada o industrias utilizar estas herramientas, también otra deficiencia se debe a la adaptabilidad de las personas al usar o implementar este dispositivo en una jornada laboral.

Referencias

- Dimitris, R.M, & Carlos, R.M, & Miguel, N.B, & Sergio, L.T, & Miguel, G.R. (2020). La mano. Aspectos anatómicos I. Generalidades, osteología y artrología. *Morfología* 12(1), 20. <https://www.udocz.com/apuntes/644826/la-mano-aspectos-anatomicos-ipdf>
- Dunai, L., Lengua, I., Peris-Fajarnés, G. y Defes-García, B. (2019). Diseño de un exoesqueleto de extremidades inferiores. *Dyna*, 94(3), 297-303. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6917261>
- Harmonic Drive SE. (2019). EL EXOESQUELETO. <https://harmonicdrive.de/es/glosario/el-exoesqueleto>
- Lupus. (2024). El lupus y las articulaciones, los músculos y los huesos. <https://www.lupus.org/es/resources/como-el-lupus-afecta-los-musculos-los-tendones-y-las-articulaciones#:~:text=El%20%20lupus%20puede%20%20causar%20dolor,causan%20%20da%C3%B1o%20a%20largo%20%20plaz>
- Martínez J. J. (2019). Control de un brazo robótico virtual usando un exoesqueleto robot de miembro superior. [Tesis de grado, Universidad Libre]. Repositorio Institucional Unilibre. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11029>
- Miranda, C. (2021). DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EXOESQUELETOS ULTRALIVIANOS. <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/505/CMiranda-TFG-IM-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morillo, Y. (2022). Futuro Eléctrico. Qué es un exoesqueleto mecánico y qué utilidad podría darle el ser humano. <https://futurollectrico.com/exoesqueleto-mecanico/>
- Muñoz, V. D. (2021). Evaluación de funcionalidad de un exoesqueleto de mano en usuarios sanos. [Título profesional, Escuela colombiano de ingeniería Julio Garavito] . Repositorio Digital. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1523>

- Orliman. (2020). Exoesqueletos: la tecnología del futuro. <https://www.orliman.com/exoesqueletos-robots-llega-la-tecnologia-del-futuro/#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20de%20los%20exoesqueletos,aer%C3%B3bica%20y%20disminuye%20la%20espasticidad>
- PLANES, F. (2023). Aleaciones del aluminio: ¿cuáles son las más importantes y para qué se usan? <https://ferrosplanes.com/aleaciones-del-aluminio-cuales-son-usos/>
- Medline Plus. (2021). Problemas de las articulaciones. <https://medlineplus.gov/spanish/jointdisorders.html>
- Pmedic. (2022). La mano humana: Explorando su anatomía, fisiología y relevancia en la fisioterapia. <https://pmedic.es/la-mano-humana-explorando-su-anatomia-fisiologia-y-relevancia-en-la-fisioterapia/>
- Sánchez, J. E. (2020). Un análisis del sector automotriz y su modelo de gestión en el suministro de las autopartes. <https://imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt288.pdf>
- Téllez, L. A. (2020). Consejo Colombiano de Seguridad. Exoesqueletos, los avances tecnológicos puestos a disposición de la salud y la prevención de enfermedades: <https://ccs.org.co/portfolio/exoesqueletos-los-avances-tecnologicos-puestos-a-disposicion-de-la-salud-y-la-prevencion-de-enfermedades/>

Anexos

Figura 1

Prototipo del exoesqueleto de mano derecha con estructura completa.



Figura 2

Modelo del motor del exoesqueleto con placa de titanio



Figura 3

Estructura del dedo índice de la mano derecha.

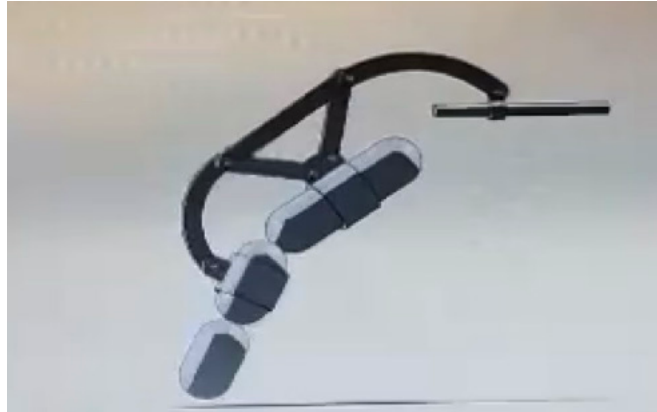


Figura 4

Estructura del exoesqueleto de mano derecha.



Figura 5

Presentación del prototipo de miembro superior (mano) en Espo-Ingenierías en la Universidad del Valle de Puebla.

