

[193038] Diseño de un exoesqueleto para uso industrial de miembros superiores a base de materiales reciclados

Julián Andrés Bonilla Ramos ^{a,c} , Nicolás Díaz Rueda ^{a,c} ,

Luis Andrés Saavedra Robinson ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

In Colombian industry, work is carried out manually in most companies. Some of these tasks can potentially cause musculoskeletal disorders in workers. Due to this problem, the solution proposed focuses on using tools that improve working conditions, among which are exoskeletons that can decrease muscle load in upper limbs when performing tasks that require postures such lifting of the arms above the shoulders, for an extended time within the working day, for automotive mechanics specialized in repair and maintenance. For this reason, an exoskeleton of superior members was designed. A CAD model was made in SolidWorks and subsequently manufactured a functional model in order to test and measure its effectiveness. In economic terms, the cost is significantly lower than the equipments currently in the market, since its sale price would be located at COP 776,000, representing savings close to 95% compared to the most economical equipment analyzed in this study, which belongs to one of the market-leading companies (Comau). The measurement of this muscle load was carried out by running tests on a simulated workstation, and subsequently a comparison of normal conditions (without the use of assistive equipment) with such activity carried out using an exoskeleton of superior members, acquired by the Pontificia Universidad Javeriana and a functional model of the device of own design, resulting in a 49% improvement in the level of fatigue, by the device designed against current conditions, that is, without any assistance. In addition, the proposed design has a decrease of approximately 8% of the fatigue level compared to the Comau exoskeleton, according to the test results. The fatigue level was measured using a questionnaire based on the BORG CR-10 scale.

A production system was also proposed for the designed exoskeleton and its corresponding mass manufacturing, located in the city of Bogotá. Based on this information and the operating costs calculated for the time horizon, a plant distribution with an area of approximately 57 square meters was designed to perform the operation. The production processes carried out will be injection, manufacture and assembly of the parts and the materials will be high density polyethylene (HDPE), stainless steel and textile material. The unit cost of production of each exoskeleton, which will be variable and demand-dependent, will range from COP 395,000 to 666,000. it was proposed to work with low-cost recycled materials, which have a low environmental impact.



Palabras clave: Exoesqueleto, trastornos musculoesqueléticos, ergonomía, mecánicos, automatiz.

1. Justificación y planteamiento del problema

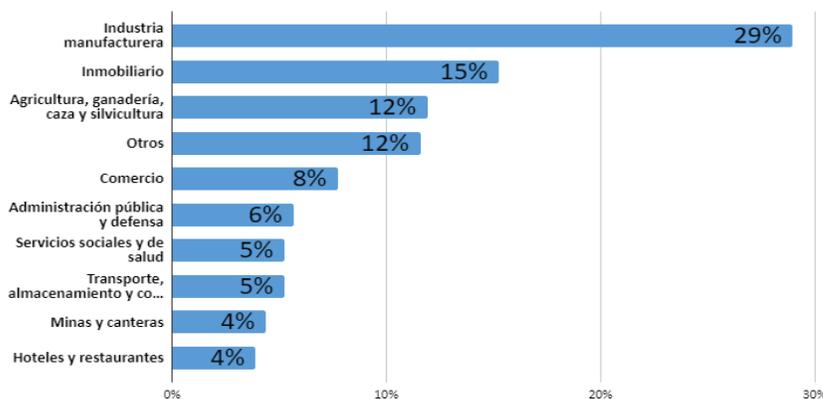
Uno de los objetivos básicos de toda empresa es mejorar su nivel de productividad y con esto el de competitividad. Si se analizan los indicadores registrados en Colombia, de este último aspecto según el International Institute for Management Development (IMD), a partir del 2000, se encontró que el país ha retrocedido 13 posiciones, situándose en el puesto 58 entre 63 países en el 2018 [1]. Urge hacer una radiografía general del porqué de la situación. La Asociación Nacional de Empresarios de Colombia indagó sobre las principales causas que están afectando la productividad de la industria a nivel nacional, hallando que los factores más relevantes que influyen positivamente a los empresarios son, en su orden, falta de actualización, modernización tecnológica e inversión en equipo (30,1%), deficiencia en la mejora de procesos de la línea productiva (19,9%) y menor eficiencia del recurso humano y/o su capacitación (16,4%) [1]. La reducción del impacto negativo que causan estos factores a las empresas se puede dar principalmente por dos alternativas, automatizar las operaciones existentes en la actualidad, o mejorar condiciones laborales operativas.

En Colombia, actualmente según el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, las pequeñas y medianas empresas (PYME's) representan 90% del total de empresas en Colombia, generan 80% de la empleabilidad nacional y aportan 50% del Producto Interno Bruto [2]. Según el informe anteriormente mencionado, los proyectos de inversión productiva del sector industrial se orientan, en un 63,5% hacia la modernización tecnológica y automatización. A pesar de esto, las PYMES no poseen la capacidad económica para automatizar sus procesos, ya que entre sus mayores dificultades al emprender proyectos de inversión están la falta de capital de trabajo (21,1%), baja demanda (18,8%), altos costos e impuestos (12,8%) [1]. Por tanto, la solución a la productividad puede estar enfocada en no consumir en gran medida recursos económicos, dándole viabilidad a la opción de mejorar las condiciones laborales operativas actuales.

Actualmente, en Colombia las operaciones de manufactura se realizan en gran parte de manera manual, lo cual puede provocar un potencial deterioro a la salud y la aparición de trastornos músculo esqueléticos causando un problema social, y reduciendo la rentabilidad y productividad dada la constante rotación del personal y el ausentismo laboral [1]. En términos económicos, las empresas asumieron como costo total por ausentismo en el 2014, el 1,5 % de la nómina de las empresas, valor que ascendió a 1,86 % en el 2015 y, para el 2016, la cifra fue de 1,91 % [3]. Por otra parte, entre el 2012 y 2016 en el país se presentaron 8.355.019 incapacidades, donde solamente las dadas por traumatismos del hombro y brazo suman en total 150.390 días, es decir, a lo largo del año se perdieron alrededor de 412 años laborales por incapacidades de este tipo [3].

Si se suma el total de enfermedades laborales calificadas del departamento de Cundinamarca (1.069) para el 2018 junto con las de Bogotá DC (3.755) en el mismo periodo, representan un total del 46% de las 10.450 reportadas en todo el país. A su vez, los sectores económicos en donde estos datos más se agudizan en Colombia, son respectivamente, la industria manufacturera, el sector inmobiliario y la agricultura en conjunto con la ganadería y la caza, tal como se observa en la figura 1 [4]. Estos sectores representan un alto potencial para la aplicación de diversas técnicas o herramientas que ayuden a disminuir los trastornos musculoesqueléticos (MSD)

Figura 1. Participación de las industrias colombianas en las enfermedades laborales.



Fuente: Adaptado de reporte por clase de riesgo y actividad económica de Fasecolda [4].

La determinación del lugar geográfico del proyecto se realizó revisando el grado de concentración de la industria manufacturera, el cual proporciona información valiosa sobre cómo se distribuye la participación de las empresas en el mercado. La capital de Colombia, Bogotá, reflejó el menor nivel de concentración, lo que se traduce en que existe un gran número de empresas operando, generando así competencia entre ellas, y que a su vez estas se asemejan en tamaño. Por esta razón resulta favorable realizar el proyecto en esta ciudad dada la posible replicabilidad en diferentes empresas que estén enfocadas en la misma actividad económica [5].

Una de las actividades económicas que más enfermedades laborales causa dentro de la industria manufacturera es la relacionada con la industria automotriz. En específico, la fabricación de vehículos automotores con sus respectivos componentes, incluyendo tareas de armado, pintura y/o reparación de automotores, automóviles, camiones, lanchas, motocicletas y artículos similares. Según Fasecolda [4], las enfermedades laborales calificadas con respecto a esta actividad económica representan el 3,4 % del total dentro de la industria manufacturera en el año 2019 y la ubican entre las 10 actividades con mayor cantidad de estos reportes. Por este motivo las tareas analizadas en el presente estudio se asemejan a las realizadas por mecánicos automotrices especializados en la reparación y mantenimiento de automóviles.

Un mecánico automotriz diagnostica, repara, realiza montajes y da mantenimiento a los conjuntos, subconjuntos y componentes de distintos sistemas mecánicos y electromecánicos de automóviles [6]. Entre estos sistemas están los de suspensión, eléctrico, dirección, frenos, motor, sistema de arranque, carga, alumbrado, panel de instrumentos del vehículo, transmisión y alimentación de combustible [7].

Dentro de la industria automotriz, las actividades relacionadas con traumatismos del hombro y brazo se dan principalmente en labores donde se deben tener posturas bípedas durante tiempos prolongados y en las cuales dentro del tiempo de duración de la actividad se produzcan en varias ocasiones movimientos por encima del hombro, además de tener los brazos en posiciones antinaturales.

Varias de las actividades en cuestión se centran en las que los mecánicos automotrices se ubican debajo de los automóviles. Una de ellas es la revisión de la suspensión, usualmente realizada en los establecimientos de alineación y balanceo. Otra acción es la revisión, arreglo y cambio de exhostos. Existen otras actividades donde también se realizan posturas inadecuadas, sin embargo, se realizan durante periodos cortos de tiempo, tienen la opción de realizarlo sin levantar el carro o son labores poco frecuentes en la vida útil de un auto, como lo son el cambio de aceite, cambio y extracción de caja de cambios, clutch, cubre cárter y barra estabilizadora, entre otras.

Se realizaron breves entrevistas a empleados de talleres del sector de la mecánica automotriz, cuya transcripción está disponible en el anexo 1. Con base en las respuestas, se pudo confirmar la información anteriormente recolectada sobre las acciones realizadas por los mecánicos en las que se producen las posturas inadecuadas y por ende un agotamiento muscular. Algunas de las principales tareas que realiza el grupo de mecánicos elegidos para el estudio son: cambiar el tubo de escape, silenciador, soportes del motor, reforzar piezas de chasis, realizar soldadura, platina, pintar tubo de escape, entre otras.

Por medio de una evaluación RULA se analizó la postura donde permanece más tiempo un trabajador al realizar la alineación y balanceo a un auto, como se puede observar en la Figura 2. La puntuación obtenida muestra un nivel de actuación de 5 sobre 7. Esto, denota que se requiere un rediseño en la manera de realizar la tarea dado el nivel de riesgo alto al que se encuentra expuesto el trabajador. En esta, mientras la persona está erguida, se generan movimientos básicos como abducción y flexión del brazo con respecto al tronco y flexión del antebrazo con respecto al brazo. Esta postura, genera el uso principalmente del deltoides, supraespinoso, tríceps y bíceps [8].

Figura 2. Postura durante la tarea.



a) Postura durante la tarea de alineación y balanceo de un auto



Nivel de actuación 3
Se requieren cambios rápidos en el diseño de la tarea y/o del puesto de trabajo.

Puntuación	Nivel	Actuación
1 o 2	1	Riesgo Aceptable
3 o 4	2	Pueden requerirse cambios en la tarea; es conveniente profundizar en el estudio
5 o 6	3	Se requiere el rediseño de la tarea
7	4	Se requieren cambios urgentes en la tarea

b) Resultado RULA [9]

Con el fin de prevenir las enfermedades laborales relacionadas con trastornos musculo esqueléticos, se han utilizado diferentes herramientas, entre las que se encuentran los exoesqueletos. Este tipo de herramienta es utilizado para disminuir la carga muscular en las extremidades y al adoptar posturas inadecuadas [10]. A pesar de que es una herramienta que potencialmente puede ser de gran utilidad para la industria en general, actualmente en el mercado colombiano no se producen de forma comercial y su costo de adquisición es demasiado elevado para la mayoría de las empresas, por lo que se requiere producir ejemplares más accesibles económicamente y que mejoren las condiciones del puesto comparado con las condiciones actuales. Entre los factores que hacen que los exoesqueletos sean costosos están la falta de oferta y el costo de sus componentes, los cuales se obtienen a partir de distintos materiales dependiendo de su diseño y/o función. Estos materiales pueden ser fibra de carbono o metales, aunque una posible alternativa son los materiales reciclados, ya que la mayoría de ellos son rentables en cuanto a su costo de adquisición, transformación y su costo social [11], el cual realiza un aporte a uno de los más grandes problemas de la actualidad al ayudar a evitar la explotación de los recursos naturales, disminuir la contaminación, entre otras ventajas. Otro rubro importante es el de los costos de importación y licencias relacionadas a la utilización de la herramienta.

La empresa Ford fue la primera dentro de la industria automotriz en implementar el uso de exoesqueletos de miembros superiores para la fabricación de sus vehículos. Se desarrolló por iniciativa de su planta de producción en Valencia, España, con el fin de reducir los problemas de salud relacionados con desórdenes musculares, los cuales representan el 61% de los padecimientos derivados del trabajo. Durante la investigación, se realizaron encuestas y pruebas a aproximadamente 200 trabajadores de la planta. Los exoesqueletos fabricados principalmente con titanio y fibra de carbono facilitan a los operarios de la línea de montaje a realizar operaciones de levantamiento, movimiento o carga de cualquier objeto que pese más de tres kilos cuando están de pie en una postura forzada [12]. Por otro lado, Hyundai creó su propio exoesqueleto para aumentar la capacidad de carga y la movilidad, el cual piensa comercializar. Este fue diseñado para sus operarios que atornillan la parte inferior de los vehículos, instalan tubos de freno y conectan los escapes [13]. De forma semejante, Nissan es otra empresa que produjo exoesqueletos compuestos de materiales de aleación ligera para su línea de producción, pero en este caso enfocándose solo en tareas donde los operarios debían tener los brazos por encima de sus cabezas durante tiempos prolongados [14].

En Colombia, en la actualidad sí se producen exoesqueletos, pero dicha producción está enfocada en otras aplicaciones externas al campo laboral. En el país actualmente se trabajan diferentes proyectos académicos y sociales en distintas instituciones, pero estas no se extienden a un modelo industrial replicable. Los exoesqueletos fabricados localmente se enfocan principalmente en la rehabilitación de lesiones [15], disminución de discapacidad [16] y exoesqueletos simples mono articulares o de una sola parte del cuerpo.

Para suplir la necesidad de mejorar la productividad con nuevas tendencias de la industria, la oferta está liderada por empresas dedicadas a la automatización de procesos con grandes sistemas de máquinas o la importación de exoesqueletos con un enfoque más ergonómico e industrial.

¿Es posible diseñar un exoesqueleto a base de materiales reciclados que genere la misma prestancia biomecánica o muscular que los actuales equipos a un costo menor en su adquisición? ¿Con el dispositivo se podrían mejorar las condiciones de seguridad y salud en el trabajo para los mecánicos automotrices? ¿Cuáles son los procesos industriales relacionados con este dispositivo en la manufactura del producto?

2. Antecedentes

Los trastornos musculoesqueléticos o MSD por su sigla en inglés, representan una de las causas más comunes de incapacidades laborales y enfermedades registradas [17]. Esto, debido a que los músculos de los trabajadores están continuamente expuestos a movimientos repetitivos o posturas forzadas durante la jornada laboral, ya sea mientras realizan trabajos que requieren una posición fija (estáticas) o que requieren un mayor nivel de movimiento (dinámicas) por un largo periodo de tiempo, lo cual puede causar daños en los ligamentos, tendones y articulaciones a largo plazo [18]. En estudios previos realizados se ha podido establecer que las partes del cuerpo que se ven afectadas con mayor frecuencia por MSD's son la cabeza, espalda baja, cintura, hombros, cuello, manos, muñecas, piernas y pies [19].

A lo largo del tiempo se han venido desarrollando algunos métodos de evaluación para controlar y evaluar los riesgos de lesiones en el trabajo, estos se dividen básicamente en 3 tipos: encuestas y auto-reportes, de lectura directa y de observación. Las principales diferencias entre estos métodos se pueden observar en la figura 3.

Figura 3. Métodos de evaluación de condiciones laborales



Fuente: Adaptado de “Tipología de los métodos de evaluación” [20].

Un estudio de auto-reporte es usualmente utilizado como herramienta de autodiagnóstico, en este caso enfocados en la seguridad y salud ocupacional (OSH por sus siglas en inglés “Occupational Safety and Health”) [21]. Los estudios de auto-reporte son métodos de recogida de datos en el que la fuente de información es el mensaje verbal del sujeto sobre sí mismo [22].

Uno de los estudios de auto-reporte más conocidos es The Fatigue Severity Scale (FSS), el cual consiste en una escala de 9 ítems que mide la gravedad de la fatiga y su efecto en las actividades y el estilo de vida en pacientes con una variedad de trastornos [23]. Otro método de calificación es la escala de esfuerzo percibido (RPE), medido por la escala de Borg CR-10. Esta es una herramienta para medir el esfuerzo, la disnea y la fatiga de un individuo durante el trabajo físico y, por lo tanto, es muy relevante para las prácticas de seguridad y salud ocupacional. En esta escala, las personas elegidas deben calificar la intensidad del esfuerzo realizado en las actividades en una escala de 0 a 10, donde 0 significa que no experimenta ningún esfuerzo en absoluto y 10, que percibe un esfuerzo máximo [24].

Entre los métodos de observación se destacan nuevos estudios de factores de riesgo psicosocial y físico [25]. Otro procedimiento reconocido es el desarrollado por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud

Ocupacional (NIOSH) de los Estados Unidos [26] Así mismo, entre estas herramientas se encuentran el Rapid Entire Body Assessment (REBA), que sirve para hacer análisis postural, y el RULA que es una modificación de REBA, pero haciendo énfasis en el análisis de los miembros superiores y a trabajos en los que se realizan movimientos repetitivos [27]. Por otro lado, se encuentran el método Occupational Repetitive Action Check List (OCRA) [28], y el Strain index [29].

Por último, entre los métodos de lectura directa existe principalmente uno reconocido, el cual sirve para diagnosticar la disfunción muscular o nerviosa, denominado electromiografía (EMG) [30]. Existen dos tipos de realización de este estudio, los invasivos, donde una aguja se introduce directamente en un músculo, y los superficiales donde los electrodos se ponen sobre la piel. Esta última se usa cada vez más en el deporte, la ergonomía y la rehabilitación [31].

La electromiografía superficial se ha utilizado en la industria para el análisis del puesto de trabajo, siendo un método objetivo del estudio de la relación de este con la actividad muscular mediante la medición directa [20]. La recolección de datos EMG requiere un hardware externo para el acondicionamiento e interpretación de las señales. Este hardware está compuesto principalmente por electrodos, amplificadores y un sistema de registro de los datos [32]. Posterior a la recopilación de estos, se normalizan de acuerdo con el EMG máximo (Actividad eléctrica máxima), que se produce durante la mayor contracción voluntaria del músculo [33].

Si los resultados de los métodos de evaluación anteriormente mencionados indican que existen altos riesgos potenciales físicos o de salud para la persona que desarrolla un cargo, se debe intentar eliminar la fuente del riesgo. Una de las estrategias utilizadas es el rediseño del puesto de trabajo. Este rediseño incluye modificar y redefinir procedimientos de trabajo, condiciones ambientales y del entorno, y capacitar al personal sobre los procedimientos adecuados a seguir. Otra opción es la adquisición de medios mecánicos para el transporte y elevación de cargas (por ejemplo, grúas, gatos hidráulicos o montacargas), así como asistencia postural. Uno de los equipos que puede ser utilizado para esto es el exoesqueleto, el cual reúne características de algunos de los elementos anteriormente mencionados, con el beneficio de ajustarse al cuerpo del individuo y tener un modo de utilización cómodo y accesible.

Varios exoesqueletos han sido utilizados para disminuir la actividad muscular asistiendo el levantamiento de cargas. En 2006, se desarrolló y estudió exhaustivamente un dispositivo personal de asistencia de levantamiento (PLAD por las siglas de Personal Lift Assist Device). El PLAD reduce el momento lumbar durante las tareas de elevación utilizando bandas elásticas [34]. En 2017 se propuso una prenda de asistencia de levantamiento de cargas, la cual es similar al PLAD, con la diferencia de que las bandas elásticas estaban ubicadas directamente contra el cuerpo [35].

Se han realizado múltiples trabajos que relacionan el uso del exoesqueleto con mediciones de EMG. En el 2015 fue posible desarrollar un exoesqueleto de extremidades superiores para rehabilitación con base en la retroalimentación de EMG y de un sensor Inertial Measurement Unit (IMU). Este estudio consistió en realizar ejercicios de levantamiento de los antebrazos y evaluar la carga realizada mediante el sensor mencionado anteriormente [36]. También se ha usado EMG para identificar el conjunto de músculos que son necesarios para controlar un exoesqueleto de extensión de rodilla [37]. Por otro lado, se han diseñado nuevos exoesqueletos de asistencia para elevación en manipulaciones manuales de materiales y levantamientos repetitivos. Estas herramientas reducen, según estudios con EMG, la actividad media de los músculos de la espalda y las piernas. Estos dispositivos, además, disminuyen considerablemente la actividad muscular en el erector espinal lumbar y torácico, aunque sin cambios significativos en la activación abdominal [10].

Varios sistemas y mecanismos de asistencia se han desarrollado enfocados en los miembros superiores. Una gran parte de estos utilizan sistemas neumáticos o eléctricos para facilitar y aumentar la capacidad de carga del portador. Por otro lado, están los exoesqueletos con carácter rehabilitador, con un enfoque más clínico. Estos consisten en extensiones funcionales que reemplazan alguna parte de los miembros superiores faltantes o con alguna incapacidad para funcionar normalmente, como se puede apreciar en la figura 4A. Por último, se encuentran los mecánicos, estos más que asistir basan su funcionalidad en sostener posturas de los hombros, codos y espalda, estos se encuentran con mayor frecuencia en sistemas de producción en estaciones de ensamblajes o tareas de precisión [33]. También se han desarrollado exoesqueletos compuestos por distintos materiales. Un modelo consultado fue desarrollado por dos enlaces metálicos correspondientes a las extremidades del brazo, una articulación de nylon correspondiente a la articulación del codo, cuatro brazales de

fibra de carbono de tamaño ajustable, un potenciómetro y dos músculos neumáticos, como se puede apreciar en la Figura 4B [38].

Por otro lado, se han desarrollado los llamados exoesqueletos suaves, los cuales son desarrollados con una mezcla de elastano y poliamida, nylon y velcro para aumentar la ergonomía, durabilidad y flexibilidad, como se observa en las figuras 4A y 4D. Este tipo de herramienta usualmente está acompañado de componentes eléctricos como motores [39].

En la actualidad, una de las empresas que produce exoesqueletos industriales es Ekso, quienes en su portafolio posee una unidad de extremidades superiores (referencia EksoVest), el cual puede ser adquirido por un precio cercano a los € 7.000 [40]. Otra empresa que ha desarrollado estos mecanismos de asistencia para miembros superiores es Skelex [41], la cual diseñó un dispositivo que, sin usar fuentes de energía externas o motores, sirve de soporte para tareas repetitivas ligeras. Pesa 2.7 kg y puede ser puesto por el mismo usuario final [42]. Adicionalmente, Levitate fabricó el modelo de exoesqueleto Airframe, el cual se enfoca en reducir la fatiga musculoesquelética. El elemento tecnológico demostró disminuir el esfuerzo realizado por los trabajadores en hasta un 80%, aumentando de esta manera la productividad y disminuyendo los costos de atención médica, discapacidades y el ausentismo laboral en trabajadores con funciones que requieren de la realización de tareas repetitivas con elevación de sus brazos. Esta referencia en particular no necesita de ningún tipo de energía para su funcionamiento [43].

Ottobock [44], Comau [38] y Levitate [43], representan algunas de las marcas más importantes en la producción de exoesqueletos de miembros superiores, tales como el que se puede apreciar en la figura 4B [38]. La empresa Comau diseñó una referencia (Comau RO 054819, ver anexo 2) que colabora con un promedio de 30% de reducción de la carga en los músculos involucrados durante el movimiento de extensión de brazo, así como una postura mejorada y disminución de enfermedades ocupacionales [38]. Además, posee distintos niveles de asistencia, los cuales se disminuyen y se aumentan según la masa y la altura de la persona que lo utilice. Generalmente, el ajuste de la asistencia se realiza con la ayuda de una segunda persona o previo a su postura.

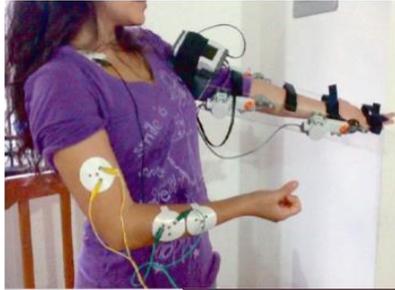
En el caso de la referencia Comau MATE, los principales beneficios ofrecidos son la reducción de la fatiga muscular y cardiaca, mejoras en la postura y el ajuste a los movimientos del operario. Además, cuenta con una funcionalidad que permite ajustarse al tamaño de la espalda con un sistema de regulación [38]. El manual de usuario de este exoesqueleto muestra a detalle todos sus componentes principales, los cuales son clave para establecer el mecanismo básico del diseño propio. El componente principal es la caja generadora de torque, la cual a su vez consta de la cubierta del mecanismo, el ajuste del nivel de asistencia y el mecanismo de bloqueo de movimiento [45].

Los equipos existentes en el mercado fueron analizados para tomarlos como referencia en los criterios de diseño y funcionalidad. El análisis consistió en encontrar los beneficios ofrecidos por cada uno de ellos, su composición básica y otros aspectos significativos. Las marcas analizadas, también mencionadas anteriormente son Comau, Paexo, Levitate, Ekso y Skelex.

El exoesqueleto Levitate Airframe, igual que el Comau, tiene como objetivo principal reducir la fatiga y el estrés muscular. Entre los beneficios otorgados se encuentran la disminución del riesgo de lesiones a causa de la reducción de los niveles de esfuerzo, el incremento en la productividad, mejoras en la calidad y precisión en el trabajo de los operarios, entre otros beneficios. Su funcionamiento básicamente consiste en la transferencia del peso de los brazos desde los hombros, el cuello y la parte superior de la espalda hacia el exterior de las caderas. Otra característica con la que cuenta este dispositivo es la comodidad de movimiento en el momento de uso por parte de los operarios [43]. Las particularidades del exoesqueleto Ottobock Paexo Shoulder incluyen que la empresa productora afirma que es el más liviano de su tipo. Este dispositivo tiene un peso de 1.9 kg, permite libertad de movimiento y proporciona rapidez al momento de su postura ya una persona puede ponérselo en 30 segundos aproximadamente. Como indicaciones de seguridad, recomiendan no exponerlo a luz solar excesiva ni a temperaturas extremas [44].

Figura 4. Lista no exhaustiva de exoesqueletos encontrados

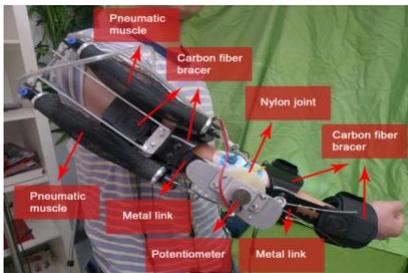
A) Exoesqueleto de rehabilitación motora [46]



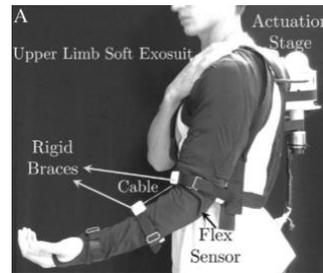
B) MATE (Muscular Aiding Tech Exoskeleton) [38]



C) Exoesqueleto musculo neumático [33]



D) Exoesqueleto asistencia superior [39]



3. Objetivos

Diseñar un exoesqueleto industrial de asistencia a miembros superiores con materiales reciclados, a un bajo costo, y proponer un proceso de producción que se ajuste a su elaboración.

Objetivos específicos

- Definir las variables cuantitativas necesarias para el diseño del exoesqueleto y proponer alternativas de diseño para este.
- Seleccionar la alternativa más apropiada en función del mejoramiento de la prestancia (reducción de la carga), costo y características del material y desarrollarla acorde a los requerimientos de diseño.
- Comparar la efectividad del exoesqueleto diseñado con el Exoesqueleto (Comau RO 054819) adquirido por la Pontificia Universidad Javeriana y validar su funcionalidad en comparación con la realización de la tarea en condiciones normales (sin ninguna herramienta de asistencia).
- Elaborar un sistema de producción replicable para el exoesqueleto diseñado.

4. Cuerpo del documento y componente de Diseño en ingeniería

Criterios de diseño

En cuanto a las restricciones y parámetros a seguir, los cuales son necesarios para la construcción de alternativas de diseño, se deben considerar los siguientes criterios:

- La herramienta debe ser adaptable a los parámetros antropométricos de la población laboral colombiana de acuerdo con los percentiles 5 y 95 de esta población.
- El dispositivo no debe poseer ningún tipo de mecanismo de accionamiento eléctrico, electrónico o neumático, sino por el contrario debe ser totalmente mecánico.

- Debe disminuir la fatiga muscular del usuario de algunas zonas alusivas a los miembros superiores en los que se va a enfocar el exoesqueleto en comparación con las condiciones de trabajo tradicionales, es decir al no utilizar ningún elemento de ayuda.
- Debe ser replicable para un proceso de producción en masa.
- Su estructura principal debe ser a base de materiales reciclados.
- El peso del dispositivo debe ser menor a 2 Kg, este valor es tenido en cuenta el menor peso de los dispositivos comparados, los cuales son el EksoVest, el cual tiene un peso de 4.3 Kg [40], el Comau MATE, que tiene un peso de 4 Kg [45], el Skelex 360 que pesa 2.3 kg y el Ottobock Paexo, que registra un peso levemente menor a 2 kg [44].
- Para facilitar su utilización y cuidado por parte de los usuarios, algunas de sus partes deben ser removibles y lavables en caso de que se requiera para que sus componentes se mantengan aseados.
- El dispositivo debe ser una opción adquirible para empresas, por lo que se plantea que su costo debe ser por lo menos, igual o inferior, al exoesqueleto de referencia más barato (Comau RO 054819, avaluado en USD 4600 más costos de importación).
- La obtención de las materias primas que será empleada para la producción de los exoesqueletos se realizará en su mayoría a partir de proveedores de materiales reciclados procesados y listos para realizar los procesos de manufactura implicados en la fabricación.
- La postura del dispositivo debe ser posible realizarla por el usuario sin ayuda de alguien más.

Ciclo de diseño

Los Stakeholders del dispositivo se componen básicamente de los usuarios finales, los administradores de los talleres automotrices, la empresa productora, los proveedores de materias primas y por último la competencia. En cuanto a esta última se realiza un estudio de benchmarking para conocer cuáles de los principales criterios de diseño cumplen las principales marcas existentes en el mercado y que por tanto debe cumplir el dispositivo diseñado. Para esto se tuvieron en cuenta las marcas de las que se obtuvo mejor información acerca de su mecanismo de funcionamiento, componentes y características, las cuales son Comau, Skelex, Paexo, Eksovest y Levitate. Esta información se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Benchmarking.

Criterios	Marcas de exoesqueletos				
	Comau	Skelex	Paexo	Eksovest	Levitate
Peso menor a 2 kg	X	X	✓	X	X
Funcionamiento mecánico (sin electricidad)	✓	✓	✓	✓	✓
Disminuye la fatiga muscular en los miembros superiores	✓	✓	✓	✓	✓
Es posible su postura autónomamente	✓	✓	✓	✓	✓
Costo igual o menor a 4600 USD	✓	X	X	X	X
Tiene la posibilidad de desactivar el sistema	✓	X	X	✓	✓
Uso de materiales reciclados	X	X	X	X	X
Adaptable a los parámetros antropométricos colombianos (población laboral, ambos géneros, 20 a 59 años)	X	X	X	X	X

El dispositivo a diseñar se denominó Greexo, haciendo así referencia a un exoesqueleto amigable con el medio ambiente. Sus componentes principales y el funcionamiento estructural se definen teniendo en cuenta entrevistas a trabajadores del sector automotriz, dispositivos básicos de transformación de fuerzas mecánicas y el estado del arte de los exoesqueletos. Los resultados son seis diseños conceptuales con diferentes métodos de accionamiento de fuerzas disponibles en la figura 5, los cuales son descritos con base en analogías de objetos con funcionalidad similar.

En primer lugar, un diseño semejante al de apertura de un paraguas convencional, con un soporte a cada lado de la espalda a través del cual se desliza el resorte que realiza la fuerza, posteriormente transmitida a los brazos

(Ver figura 5a). En el segundo diseño conceptual, el resorte se ubica en la parte superior del hombro y está directamente conectado al componente de apoyo al brazo (Ver figura 5b). La tercera opción está basada en gran medida en la marca Ottobock (Paexo), en el cual un resorte realiza una fuerza de compresión, esta misma se transmite en un movimiento de rotación del componente que apoya el movimiento del brazo (Ver figura 5c). La cuarta alternativa presenta un diseño similar al de un ‘cierrapuertas’, con un par de resortes ajustados para hacer rotar a un eje, el cual está ubicado en el eje de giro del brazo (Ver figura 5d). Cabe mencionar que existen diferentes sistemas de movimiento utilizados por los ‘cierrapuertas’, y otra posibilidad es con la utilización de un soporte que apoye el levantamiento de los brazos (Ver figura 5e). El último mecanismo tenido en cuenta está basado en el funcionamiento de una lámpara, donde, al igual que la segunda alternativa, también incluye resortes directamente en el apoyo de los brazos, pero cambia ligeramente la estructura (Ver figura 5f). Además, se presentan distintas opciones para las partes del exoesqueleto que tienen funciones de ajuste al cuerpo y de soporte de la estructura de este.

Figura 5. Diseños conceptuales de Greexo.

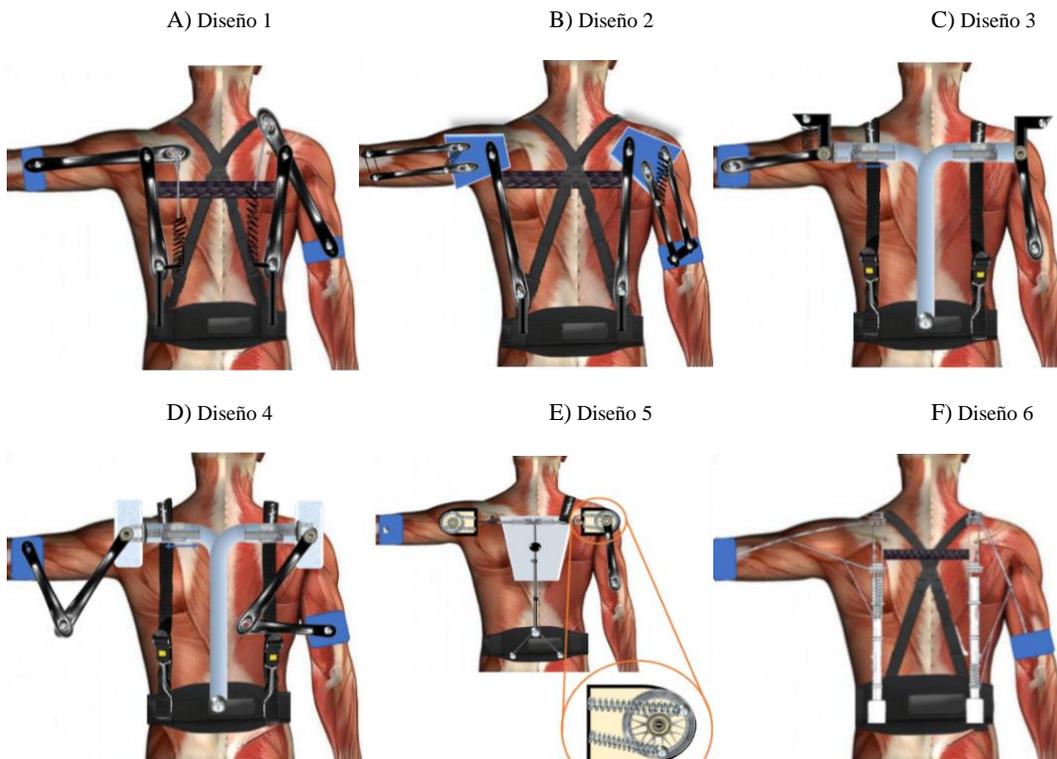


Tabla 2. Matriz de ponderación.

Factor	Ponderación	Diseños					
		1	2	3	4	5	6
Libertad de movimiento	30%	5	4	1	3	5	2
Simplicidad del mecanismo	15%	4	5	5	2	4	4
Cantidad aproximada de material a usar	30%	4	3	5	2	4	3
Capacidad de variación del nivel de asistencia	25%	5	5	5	4	2	1
TOTAL	100%	4.55	4.1	3.8	2.8	3.8	2.35

Para la elección del diseño final se lleva a cabo una ponderación de factores. Se realiza una puntuación de 1-5, siendo 1 que este factor no es favorable para el diseño propuesto y 5 que este criterio influye positivamente en el mismo. Esta información se pondera y consolida en la tabla 2. Estos factores se toman en cuenta dadas las falencias de la competencia dado el benchmarking previamente realizado, las opiniones de un experto en

ergonomía y criterios propios que ayudaran a cumplir los objetivos planteados. En la figura 6 se muestra el diseño CAD elegido y su respectivo explosionado. Además, los planos de cada una de las piezas y sus respectivas masas se encuentran en el anexo 3.

Figura 6. Diseño propuesto para el exoesqueleto Greexo y su explosionado.

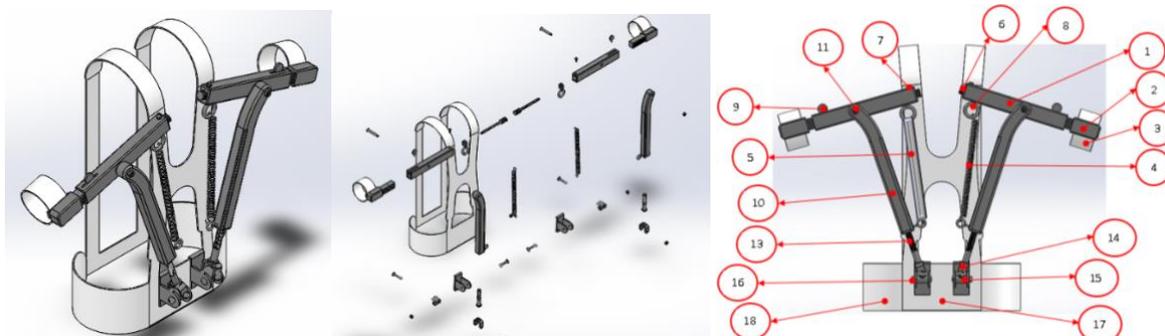


Tabla 3. Piezas exoesqueleto diseñado.

ID pieza	Descripción	Cantidad	Material	Método de obtención
1	Soporte del brazo	2	HDPE	Inyección
2	Sujetador del brazo	2	HDPE	Inyección
3	Correa ajustable brazo	2	Velcro-Tela tempestad	Confección
4	Resorte	2	Acero inoxidable	Compra a proveedor
5	Tapa de seguridad del resorte	2	PE	Compra a proveedor
6	Tornillo sin fin del nivel de asistencia	2	HDPE	Inyección
7	Tornillo asegurador del nivel de asistencia	2	Acero inoxidable	Compra a proveedor
8	Aro sujetador de resorte	2	HDPE	Inyección
9	Llave de seguro para el ajuste del largo del soporte del brazo	2	HDPE	Inyección
10	Columna principal	2	HDPE	Inyección
11	Tornillo de unión (columna principal-Soporte brazo)	2	HDPE	Inyección
12	Tuerca de unión	6	Acero inoxidable	Compra a proveedor
13	Tornillo de ajuste de la altura	2	HDPE	Inyección
14	Horquilla Cardán	2	HDPE	Inyección
15	Cruceta cardán	2	HDPE	Inyección
16	Pasador cardán	4	HDPE	Inyección
17	Soporte cintura	2	HDPE	Inyección
18	Cinturón e indumentaria de sostenimiento	1	Material textil	Confección

La lista completa de los componentes del dispositivo, con su respectivo material, método de obtención y cantidades necesarias se observan en la tabla 3.

Análisis mecánico

Unos de los componentes fundamentales para el correcto funcionamiento de Greexo son los soportes del brazo, encargados de accionar el movimiento de este. Estos soportes se dividen en dos partes con el fin de modificar su tamaño y ajustarlo a personas de diferentes tallas. Por otro lado, las columnas principales sostienen

los soportes de los brazos y transmiten la carga hacia la zona baja del exoesqueleto donde está el cinturón, comunicado a su vez con toda la indumentaria de sostenimiento. El funcionamiento del exoesqueleto se basa en la ejecución de un torque ejercido por un resorte de tensión, en el cual se transforma el movimiento lineal (compresión y tensión del resorte) en rotacional con el fin de emular el movimiento de giro del brazo con respecto al hombro. Dicho resorte está sujeto a un extremo del soporte del brazo, mientras que el brazo se sujeta al otro extremo de la misma pieza, la cual tiene un punto de apoyo y eje de rotación entre los dos extremos. De esta manera la fuerza de tensión del resorte se traduce en una que tiende a subir el brazo, reduciendo el esfuerzo necesario por el operario del exoesqueleto para levantar la extremidad.

El resorte a elegir debe soportar cargas de tracción, por lo que se usará uno helicoidal de extensión. Además, debe soportar 3 torques. El primero está asociado con el peso del brazo (2,8 kg), el segundo con el peso de la parte del dispositivo que va unida a la misma parte humana (0,345 kg) y el tercero al peso de una herramienta (0,5 kg). En total debe soportar una fuerza de 57,34 Newtons por lo que se elige uno que cumpla con esta cualidad y que además se adecúe a la longitud inicial (16,5 cm) y a la elongación (25,5 cm) deseada. Estos cálculos y especificaciones se encuentran en el anexo 4.

Para la definición de los materiales a utilizar, se proponen unos criterios según la disponibilidad en el mercado de estos elementos reciclados y ciertas características físicas como los esfuerzos que deben resistir. Dado que se desea que el dispositivo sea adaptable, se utilizan los datos de los percentiles 5 y 95 de los parámetros antropométricos de la población laboral colombiana de ambos géneros [47].

En la estructura principal del dispositivo se usa el material polietileno de alta densidad (HDPE), el cual es reciclable, tiene una densidad de 0.944 - 0.965 g/cm³, más baja que otros materiales analizados como el aluminio, el PET y el PVC. El HDPE es normalmente utilizado en tambores químicos, juguetes, artículos de picnic, aislamiento de cables, material de envoltura de alimentos, entre otros [48]. Además, posee una baja degradación después de ser reprocesado en cinco ciclos, por lo que no genera mayor problema usar este material de segunda mano [49]. Por otro lado, el polietileno de alta densidad puede ser procesado tanto por inyección como por extrusión. Estos métodos de moldeado permiten el uso de pellets, que es la forma más común en el mercado de este material reciclado. El cinturón e indumentaria de sostenimiento, incluyendo la correa ajustable al brazo, son las únicas partes realizadas de manera manual.

Se realizó un análisis para conocer la resistencia requerida por el eslabón más débil del sistema y de la misma manera se calculó el factor de seguridad dadas las condiciones del proyecto el cual se encuentra en el anexo 5.

Con el fin de comparar la fatiga muscular al realizar actividades sin ninguna herramienta de asistencia, con el dispositivo diseñado y con el adquirido por la Pontificia Universidad Javeriana (Comau RO 054819) se genera una estación simulada que consta de 3 actividades, que se deben realizar en los 3 escenarios. Estas se muestran a continuación:

Tabla 4. Actividades por realizar.

ID	Nombre actividad	Herramienta	Descripción	Actividad emulada	Tiempo
A1	Clavar puntillas	Martillo	Se golpean puntillas con el fin de clavarlas en una tabla ubicada por encima de la altura de los hombros (Entre el acromio y el suelo).	Ajuste y enderezamiento manual de latas.	1 min
A2	Ajustar y desajustar tuercas	Llave inglesa	Se deben ajustar y desajustar cuantas tuercas sea capaz en el tiempo delimitado en una tabla ubicada por encima de la altura de los hombros.	Uso de llave inglesa y llave de impacto.	1 min
A3	Aplicar silicona	Pistola de silicona	Se debe aplicar silicona siguiendo un camino demarcado previamente en una tabla ubicada por encima de la altura de los hombros.	Soldadura.	1 min

Para evaluar la efectividad del exoesqueleto, inicialmente se plantea realizar una medición de la actividad eléctrica de estos músculos mediante un electromiógrafo ubicado en la Pontificia Universidad Javeriana. Sin embargo, dadas las condiciones sanitarias a causa del COVID-19, las políticas internas de la Universidad y las recomendaciones de diversos investigadores, se decide modificar este tipo de prueba de medición directa por la Escala de Borg CR-10 [50]. Teniendo en cuenta que la población del estudio son las empresas en Bogotá dedicadas a comercio, mantenimiento y reparación de vehículos (2577 empresas) [51], el tamaño de muestra estadístico sería de 335 personas para un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%. Sin embargo, dado que no son encuestas, sino auto reportes generados del uso de un equipo y pruebas reales, se recomienda el uso del 10% de esta muestra, aunque debido a las condiciones de bioseguridad mencionadas anteriormente y el distanciamiento social, se realizan pruebas al 5%, dando un total de 18 personas, las cuales son 8 mujeres y 10 hombres entre los 20 y 56 años y entre 1.55 y 1.75 metros de altura.

Se sigue un protocolo, disponible en el anexo 6, que explica paso a paso cómo se realiza la prueba. Esta tiene un consentimiento informado que debe firmar el participante del experimento. Para más información, consultar anexo 7. En el formulario que se usa para evaluar la fatiga por parte de los individuos de estudio se usa la nomenclatura “PROTO” para referirse al modelo funcional de Greexo. El formulario se puede ver a continuación:

Tabla 5. Instrucciones formato escala de Borg CR-10

Instrucciones formato Escala de Borg CR-10										
La escala de Borg es usada para ayudarnos a entender la intensidad de la severidad de las actividades que va a										
Por favor revise la escala para conocer los niveles que usted puede elegir.										
Al inicio de la escala "0" o "Resposo total" significa ningún esfuerzo en absoluto.										
Al final de La escala "10" o "Muy, muy duro" significa el más severo esfuerzo que usted ha experimentado o podría imaginarse experimentar.										
Cuando le pidamos que califique la intensidad de sus actividades por favor marque una X en el número que mejor describa el esfuerzo que tuvo que experimentar en el momento en que realizó cada actividad.										
A continuación puede observar la escala y las respectivas actividades:										
		Clavar puntillas			Ajustar y desajustar tuercas			Aplicar silicona		
		SIN EXO	COMAU	PROTO	SIN EXO	COMAU	PROTO	SIN EXO	COMAU	PROTO
0	Reposo total									
1	Esfuerzo muy suave									
2	Suave									
3	Moderado									
4	Un poco duro									
5	Duro									
6										
7										
8	Muy duro									
9										
10	Muy, muy duro									

Fuente: Adaptado del formato escala de Borg CR-10 [52]

Después de realizar la tarea a un ritmo normal, las personas que hacen parte del experimento deben responder a las preguntas indicadas en la tabla 5. Luego de tener todas las respuestas, se procesa la información por medio de indicadores, los cuales se dividen por tareas dado que el exoesqueleto puede generar mayor asistencia en cierto tipo de actividades y menor en otras. Cada indicador se analiza con las 4 actividades a realizar, completando así un total de 12. Las tres categorías de indicadores se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Indicadores.

Nombre indicador	ID	Objetivo	Fórmula	Unidad de medición	Resultado esperado
Eficacia de Greexo en cada actividad.	IN1	Saber cuál es la disminución de la carga muscular de Greexo en comparación al trabajo convencional sin ninguna asistencia según la actividad.	Puntuación fatiga sin exoesqueleto/ Puntuación fatiga con Greexo	Razón	>1
Eficacia exoesqueleto de referencia (Comau) para cada actividad.	IN2	Saber cuál es la disminución real de la carga muscular con el exoesqueleto de referencia en comparación al trabajo convencional sin ninguna asistencia.	Puntuación fatiga sin exoesqueleto/ Puntuación fatiga con exoesqueleto de referencia.	Razón	>1.3
Comparación eficacia exoesqueleto de referencia (Comau) con Greexo	IN3	Comparar la disminución de la carga de Greexo versus el de referencia.	Puntuación fatiga Greexo/ Puntuación fatiga con exoesqueleto de referencia.	Razón	<1

Producción

Según un censo desarrollado por el DANE a las empresas de servicios, del 2012 al 2017 en promedio un 28% de las empresas dedicadas a comercio, mantenimiento y reparación de vehículos realizaron adquisición de maquinaria y equipo en el área de Desarrollo e Innovación Tecnológica [53]. Se detecta una tendencia decreciente en este tipo de inversión utilizada para proyectar estas cifras hasta el año 2025, de esta manera en el año 2021 se espera que una cuarta parte de las compañías estén invirtiendo en este rubro. Se define como mercado objetivo inicial el 40% de estas empresas ya que, dado que es un dispositivo novedoso, que no está posicionado en el mercado, no tiene la misma acogida de otros equipos por los que han pagado las empresas previamente. Además, se espera que la participación en el mercado incremente gradualmente en los años venideros planteando un escenario hipotético de un crecimiento de un 5% anual. Los autores del proyecto plantean producir durante el tiempo de posicionamiento de Greexo en el mercado, es decir aproximadamente el primer año, las unidades necesarias para suplir la demanda solamente en la capital colombiana (38% de la demanda total del país) [51]. Adicionalmente se espera que cerca de un 9% de las empresas del sector estén dispuestas a adquirir el producto y, asumiendo que cada una compre un exoesqueleto, la demanda potencial sería de 258 unidades solamente en la ciudad de Bogotá. Sin embargo, a partir del segundo año se va a atender la totalidad de clientes a nivel nacional, por lo tanto, la capacidad instalada estará desde el comienzo planeada para suplir la máxima cantidad de unidades proyectadas dentro del horizonte de 5 años. De esta manera la demanda y sus respectivos componentes se muestran la tabla 5:

Tabla 7. Cálculo de la demanda potencial.

	Año 1 (2021)	Año 2 (2022)	Año 3 (2023)	Año 4 (2024)	Año 5 (2025)
Porción de mercado	40%	45%	50%	55%	60%
Porcentaje de empresas que invierten en maquinaria y equipo	25%	24%	23%	22%	21%
Número de empresas	2577	6778	6778	6778	6778
Demanda anual	258	732	779	820	854
Demanda mensual	22	62	65	69	72

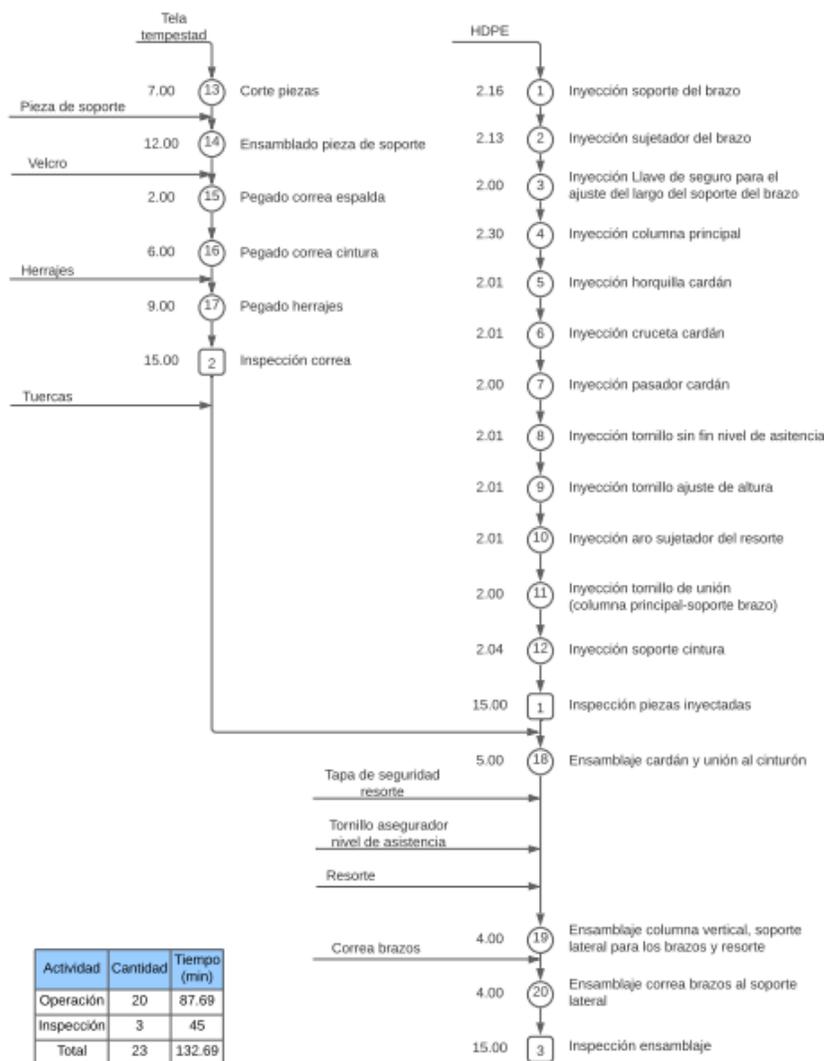
Como se menciona anteriormente, Bogotá es un punto estratégico para la ubicación de la planta de producción, no solo por el gran mercado que abarca, sino por su posición geográfica central en el país y tener distintas opciones de movilidad para otras ciudades principales. Con esto se puede brindar un mejor servicio al cliente y tener una relación más personalizada con ellos, brindándoles la posibilidad de poder realizar pruebas reales con el exoesqueleto antes de tomar la decisión de adquirirlo, para así aumentar el reconocimiento del producto en el mercado. Dada la facilidad de acceso (tanto de personal como de materia prima), permisos de uso de suelos y regulaciones locales, la mejor opción para ubicar una fábrica dentro de la ciudad es en la Zona

Industrial, ubicada en la localidad de Puente Aranda, aproximadamente entre calles 6 y 13 y carreras 34 y 39, donde según las ofertas del mercado el costo promedio del arriendo es de 18.000 COP/m² [54].

Las piezas compuestas de HDPE serán fabricadas en una máquina inyectora, la cual procesa las piezas a una tasa de 36 g/s y se debe importar desde China a través de su fabricante Dongguan Kunlun Industrial Technology y cuesta aproximadamente COP 19.950.000 más costos de envío [55]. De la misma manera, un posible proveedor para la materia prima de esta máquina sería Hebei Yiqutian Import And Export, la cual es una empresa China que vende el producto desde 1 tonelada a un precio de aproximadamente COP 4.220.200 más costos de envío [56]. Estos precios están sujetos a variaciones en las tasas de cambio. *Por otro lado, se deben adquirir 11 moldes para la máquina inyectora los cuales tienen un costo total aproximado de 265'500.000.* El otro equipo principal a comprar es una máquina de coser (plana) para realizar confección.

Para presentar la entrada de materiales, las operaciones y las inspecciones necesarias para la manufactura del exoesqueleto propuesto se realizó un diagrama de flujo de operaciones disponibles en la figura 7. Como resultado se obtuvo un total de 20 operaciones con un tiempo estándar aproximado de 87 min, que sumando las 3 verificaciones del proceso suma un tiempo total de 132 min (ver anexo 8). Dado que es un tiempo con el cual se alcanza a realizar la cantidad necesaria para cubrir la demanda con una jornada normal de 8 horas, se decide solamente contratar un operario y que este mismo realice todas las operaciones de manera lineal en tres estaciones de trabajo. La primera para la inyección, la segunda para confección y la tercera para el ensamblaje.

Figura 7. Diagrama de flujo de operaciones



Se realizó el diseño de la planta (Layout) basándose en la metodología CORELAP, logrando ubicar cada una de las partes de la planta requeridas para la fabricación del exoesqueleto. En la figura 8 se puede observar la tabla de relaciones entre las estaciones que conforman la línea de producción. De la misma manera, en la figura 9 se encuentra el diseño de planta y la superficie de cada sección de la fábrica, la cual suma un total de aproximadamente 57 metros cuadrados. Sin embargo, se aclara que este es el diseño ideal de lo que se busca en un arriendo de un lugar ya construido.

Figura 8. Tabla de relaciones.

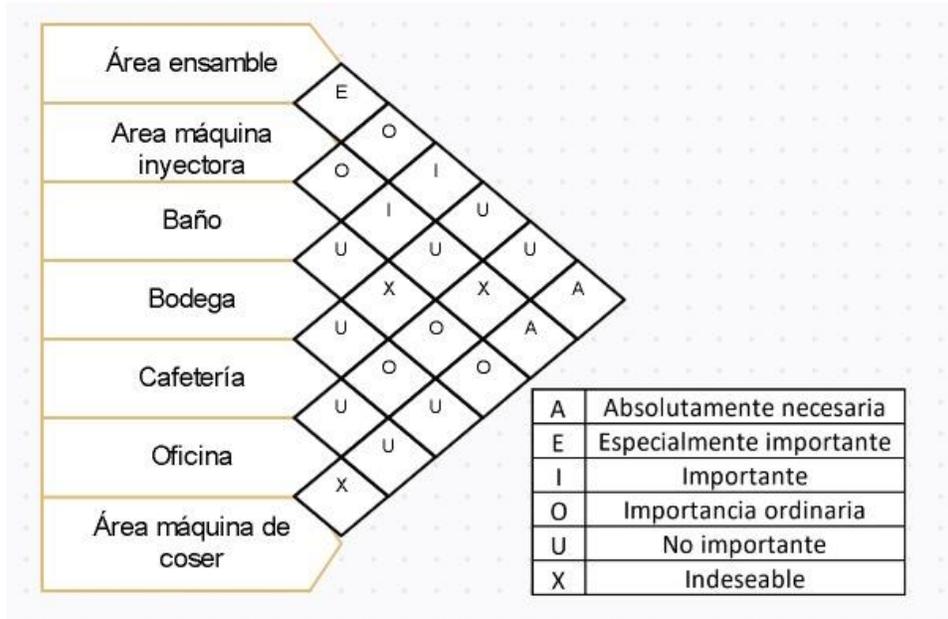


Figura 9. Plano planta deseada.

Habitación	Área del suelo
Oficina	8.38 m ²
Cafetería	4.12 m ²
Baño	2.46 m ²
Pasillo	6.5 m ²
Inyección	8.47 m ²
Ensamblaje	8.64 m ²
Bodega	11.36 m ²
Vestier	1.63 m ²
Confección	5.68 m ²

Se contratará una persona encargada exclusivamente a visitar clientes para mostrarles los beneficios del dispositivo que, según el análisis de costos disponible en el anexo 9, tendrá un costo de producción de aproximadamente 666.000 COP y un precio de venta de 776.000 COP para el primer año. Para el segundo año el precio de venta solamente se actualizaría con la inflación, pero el costo se reduciría a 396.000 COP dado el mayor uso de las máquinas y equipos adquiridos inicialmente. El retorno de la inversión de estos se haría en 16

meses y se esperaría una utilidad mensual en promedio de aproximadamente 23'700.000 COP en los 5 primeros años del proyecto.

5. Resultados

La comparación de los exoesqueletos se realiza con un modelo funcional de Greexo, el cual no fue producido en su totalidad con los materiales originales, sino que se imprimieron en 3D las piezas del card n en ABS y tanto la Columna principal como el soporte del brazo se realizaron en madera, por lo que para este se omite el criterio de que la estructura general fuera de un material reciclado. De la misma manera, las únicas partes adaptables son las asociadas al cinturón y a la indumentaria de sostenimiento, las cuales son fieles al diseño final del dispositivo. El modelo funcional tuvo un costo de 119.000 COP sumando materiales y mano de obra, las facturas se encuentran en el anexo 10. El dispositivo tuvo un peso de aproximadamente 1.1 kg. Se puede observar a continuación:

Figura 10. Fotos del modelo funcional diseñado con postura.



Los consentimientos informados firmados se encuentran en el anexo 11. Además, los resultados de las pruebas se pueden observar en el anexo 12, su posterior tratamiento en el anexo 13. En la figura 11 se observa a una persona realizando las actividades. Además, algunos videos de las pruebas se encuentran en el anexo 14.

Figura 11. Fotos de las actividades realizadas en las pruebas.



De la misma manera, los resultados consolidados de las pruebas se pueden ver en la figura 12.

Figura 12. Gráfica valor promedio de fatiga escala Borg por actividad.

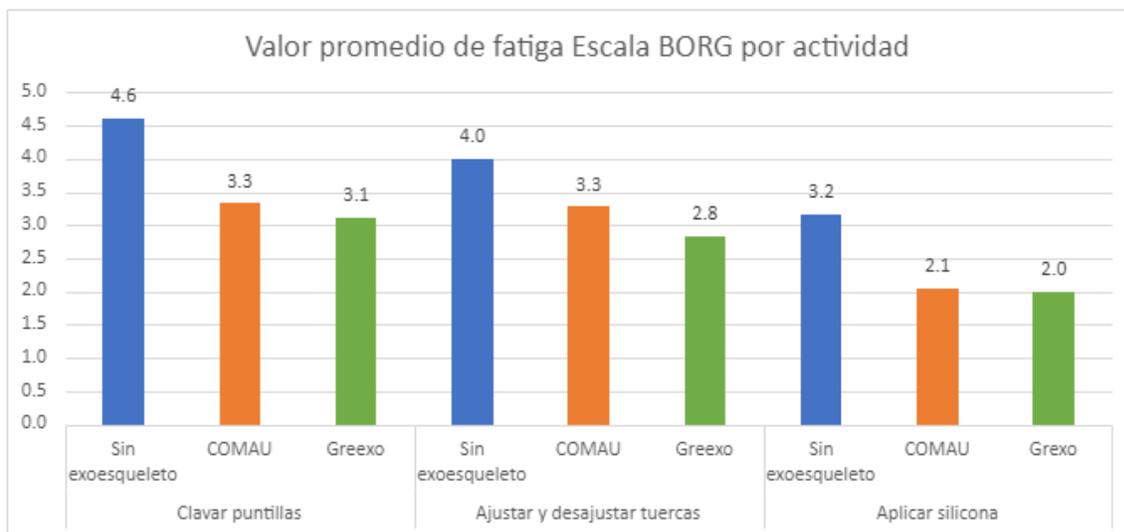


Tabla 8. Resultados pruebas exoesqueletos.

	Clavar puntillas			Ajustar y desajustar tuercas			Aplicar silicona		
	IN 1	IN 2	IN 3	IN 1	IN 2	IN 3	IN 1	IN 2	IN 3
%	1.48	1.38	0.93	1.41	1.22	0.86	1.58	1.54	0.97
¿Cumple?	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Tabla 9. Promedio indicadores.

Promedio de indicadores		
IN1	IN2	IN3
1.49	1.38	0.92

La interpretación de los indicadores es que el dispositivo diseñado es funcional y asiste a las personas en las actividades realizadas. Además, el tipo de actividad en la que se genera mayor asistencia por Greexo es la de clavar puntillas, que en promedio fue en la que mayor esfuerzo se tuvo que realizar, tanto por el peso de la herramienta usada como por la fuerza que se debía aplicar. Sin embargo, hay que recordar que las pruebas se realizaron con un **modelo funcional** y no con producto final, por lo que se esperarían leves mejoras en los resultados si se realizaran las pruebas de nuevo con el exoesqueleto que saldría a la venta al público. Al finalizar las pruebas, varias personas manifestaron de manera informal que el exoesqueleto Comau les generaba ciertas molestias en el brazo al asegurar el soporte y en la columna baja, ya que el dispositivo es muy pesado.

Dado que en promedio IN2 fue mayor de 1.3 significa que el Comau sí cumple con las prestaciones que describe en su ficha técnica, donde asegura un 30% de mejora versus realizar las actividades sin ningún tipo de asistencia. Sin embargo, en la actividad de ajustar y desajustar tuercas el promedio de la mejoría fue de tan solo 22%. Por otro lado, la mejora del dispositivo diseñado asciende a aproximadamente 49%, lo que hace que el resultado del estudio sea positivo. Sin embargo, se debe aclarar que estos resultados pueden variar de la

verdadera prestación, ya que al usarse un método de auto reporte pueden existir sesgos de los participantes, por lo que, como se mencionó anteriormente, lo ideal es realizar las pruebas con EMG.

Cumplimiento del estándar

Greexo cumple con todos los criterios inicialmente planteados, ya que pesa tan solo 1879 gr, es decir un 6% menos del límite propuesto y siendo el de menor peso de los cinco exoesqueletos de referencia en el mercado. Cabe aclarar que el diseño final es más pesado que el **modelo funcional** ya que la estructura principal se hizo de madera para este último y no de HDPE. Además, el precio de venta del aparato diseñado también es el menor, al valer aproximadamente menos del 5% del Comau, que es el de más barato de los referenciados. De la misma manera cumple con sus características únicas del mercado de usar principalmente materiales reciclados y de adaptarse a los parámetros antropométricos de la población laboral colombiana. Por último, se resalta que se cumplió con los criterios de que disminuyera la fatiga muscular en los miembros superiores, que la postura del dispositivo pudiera ser de manera autónoma y que el funcionamiento del equipo fuera totalmente mecánico, es decir, sin uso de electricidad. En la tabla 10 se compara Greexo con las demás marcas mencionadas anteriormente:

Tabla 10. Comparación exoesqueletos

Criterios	Marcas de exoesqueletos					
	Greexo	Comau	Skelex	Paexo	Eksovest	Levitate
Peso menor a 2 kg	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Funcionamiento mecánico (sin electricidad)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Disminuye la fatiga muscular en los miembros superiores	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Es posible su postura autónomamente	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Costo igual o menor a 4600 USD	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Tiene la posibilidad de desactivar el sistema	✓	✓	✗	✗	✓	✓
Uso de materiales reciclados	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Adaptable a los parámetros antropométricos colombianos (población laboral, ambos géneros, 20 a 59 años)	✓	✗	✗	✗	✗	✗

En la tabla 11 se compara también cuantitativamente los 2 principales aspectos de Greexo y el Comau:

Tabla 11. Comparación exoesqueletos

Dispositivo	Costo aproximado (COP)	Masa (kg)
Greexo	776.000	1.88
Comau	17'500.000	4

Conforme a los estándares internacionales, y para poder reducir los riesgos asociados con los peligros que un dispositivo de este tipo pueda generar, se decide realizar un proceso de rediseño donde se añade un protector plástico al resorte para evitar que ropa o piel puedan quedar atrapadas entre las espirales del resorte. De la misma manera se genera una guía de uso para Greexo, disponible en el anexo 15 en la que se encuentra la descripción del dispositivo, las posibles aplicaciones, las recomendaciones de uso, la información sobre la garantía del producto, su adecuado mantenimiento general, las partes del aparato y sus instrucciones de postura. Esta guía irá impresa dentro de la caja, donde irá el dispositivo debidamente protegido por un plástico burbuja de embalaje.

6. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.

Dada la emergencia sanitaria provocada por el COVID-19, el distanciamiento social y las recomendaciones recibidas desde el centro de Ergonomía de la Pontificia Universidad Javeriana con respecto al préstamo de equipos, se tuvo que modificar las pruebas para comparar la efectividad del exoesqueleto diseñado, que inicialmente se iban a hacer con EMG y se tuvo que cambiar por auto reportes y reducir la muestra a la mitad.

Para la realización del **modelo funcional** solamente se pudo obtener la financiación de la Pontificia Universidad Javeriana de aproximadamente 200 gramos de material ABS, por lo que se tuvo que realizar algunas partes en madera y de una manera más simplificada que lo que se deseaba inicialmente para así obtener un dispositivo más económico.

Dados los resultados positivos de las pruebas realizadas se puede decir que Greexo es funcional, sin embargo, se esperaría realizar las pruebas con EMG antes de iniciar a comercializar el producto, para así poder tener un porcentaje específico esperado de mejoría según criterios más objetivos.

Los dispositivos actuales son más costosos por varios motivos, entre ellos por la producción en países con un alto costo de mano de obra, devaluación del peso colombiano frente a otras monedas como dólar o euro, la poca competencia a nivel industrial y por mejores acabados estéticos, los cuales se pueden sacrificar para poder obtener un exoesqueleto de calidad que a su vez pueda ser producido a un costo relativamente bajo.

Referencias

- [1] ANDI, “Colombia: Balance 2018 y Perspectivas 2019,” Asociación Nacional de Empresarios en Colombia, Bogotá, 2018.
- [2] J. D. Castilla, “Gobierno presentará ley para proteger a las Pyme, como sucedió en Chile,” La República, 05 Enero 2019. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/empresas/gobierno-presentara-propuesta-para-revolucionar-el-sector-de-las-pyme-2811313>. [Accessed 15 Octubre 2019].
- [3] B. M. Master and D. A. Vieira, “Primer informe de seguimiento sobre salud y estabilidad en el empleo 2016,” ANDI, Bogotá, 2018.
- [4] Fasecolda, “Riesgos laborales por actividad económica,” Bogotá, 2018.
- [5] J. Enrique and S. Castro, “Concentración de la industria manufacturera en Colombia, 2001-2010: una aproximación a Concentration of Manufacturing Industry in Colombia, 2001-2010: An Approach from the Herfindahl-Hirschman Index,” no. 40, pp. 115-138, 2010.
- [6] Instituto Nacional de Educación tecnológica, “Perfil Profesional Sector Mecánica Automotriz,” Febrero 2015. [Online]. Available: http://catalogo.inet.edu.ar/files/perfiles/mecanica_automotriz/Perfil%20Auxiliar%20Mec%C3%A1nico%20de%20Automotores.pdf. [Accessed 9 Agosto 2020].
- [7] SENATI, “Especialidades Mecánico Automotriz,” 2017. [Online]. Available: <https://www.senati.edu.pe/especialidades/mecanica-automotriz/mecanico-automotriz>. [Accessed 11 Agosto 2020].
- [8] H. Lopez, J. Sanz and F. Alvarez, “ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE ESPALDA Y BRAZOS PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PORTÁTILES,” *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, vol. II, no. 61, pp. 4701-4708, 2008.
- [9] Universidad Politécnica de Valencia, “Método RULA,” *Ergonautas*, 2015. [Online]. Available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php>. [Accessed 18 Julio 2020].

- [10] M. M. Alemi, J. Geissinger, A. A. Simon, S. E. Chang and A. T. Asbeck, "A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, no. 47, pp. 25-34, 2019.
- [11] H. Cui and G. Sošić, "Recycling common materials: Effectiveness, optimal decisions, and coordination mechanisms," *European Journal of Operational Research*, vol. 274, no. 3, pp. 1055-1068, 2019.
- [12] Ford Motor Company, "Ford y los primeros trajes 'Iron Man' en una línea de montaje," Ford, 2020. [Online]. Available: <https://www.ford.mx/blog/innovacion/exoesqueletos-iron-man/>. [Accessed 11 Marzo 2020].
- [13] D. Hyun, "HMG desarrolla un chaleco exoesqueleto portátil," Hyundai Motor Group, 19 Septiembre 2019. [Online]. Available: <https://www.hyundai.news/es/marca/hmg-desarrolla-un-chaleco-exoesqueleto-portatil/>. [Accessed 12 Marzo 2020].
- [14] Nissan, "Nissan concluye pruebas con exoesqueletos para su próxima incorporación en líneas de producción," Nissan, 20 Noviembre 2019. [Online]. Available: <https://mexico.nissannews.com/es-MX/releases/release-6376ec37a1b56f1d78027f204b038bb0-nissan-concluye-pruebas-con-exoesqueletos-para-su-proxima-incorporacion-en-lineas-de-produccion>. [Accessed 12 Marzo 2020].
- [15] Todo es Ciencia, "TFLEX: Robótica suave, Rehabilitación firme," Colciencias, 22 Agosto 2018. [Online]. Available: <http://todoesciencia.minciencias.gov.co/Tflex>. [Accessed 04 Octubre 2019].
- [16] J. Mena, "Yumbo, Pionero en el Uso de Exoesqueletos en la Industria," Alcaldía de Yumbo, 22 Mayo 2018. [Online]. Available: <http://www.yumbo.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Yumbo,-pionero-en-el-uso-de-exoesqueletos-en-la-industria.aspx>. [Accessed 12 Octubre 2019].
- [17] N. Karimi, A. Moghimbeigi, M. Motamedzade and G. Roshanaei, "Evaluation of Related Risk Factors in Number of Musculoskeletal Disorders Among Carpet Weavers in Iran," *Safety and Health at Work*, vol. VII, no. 4, pp. 322-325, 2016.
- [18] Q. Sholihah, A. S. Hanafi, A. A. Bachri and R. Fauzia, "Ergonomics Awareness as Efforts to Increase Knowledge and Prevention of Musculoskeletal Disorders on Fishermen," *Aquatic Procedia*, vol. VII, pp. 87-194, 2016.
- [19] A. Santos, H. M. Ramos, G. Ramasamy and C. Fernandes, "Prevalence of musculoskeletal pain in a sample of migrant workers in the manufacturing industry in Malaysia," *Public Health*, vol. VIII, no. 128, pp. 759-761, 2014.
- [20] T. R. Caffrey and R. Clasby, "Surface Electromyography-Assisted Ergonomic Analysis in a Newspaper Printing Plant: A Case Study," *Biofeedback*, vol. 38, no. 4, pp. 155-157, 2010.
- [21] M. Roy, J. Cadieux, L. Fortier and L. Leclerc, "Validation d'un outil d'autodiagnostic et d'un modèle de progression de la mesure en santé et en sécurité du travail," *IRSST*, p. 36, 2008.
- [22] A. Ramírez and N. Castaño, "RIESGOS LABORALES, APTITUD FÍSICA Y AUTOREPORTE DE LAS CONDICIONES DE SALUD DE LOS CONDUCTORES DE TRANSPERLA DEL OTÚN S.A DEL MUNICIPIO DE DOSQUEBRADAS 2016," 2016. [Online]. Available: <http://repositorio.unilibrepereira.edu.co:8080/pereira/bitstream/handle/123456789/826/RIESGOS%20LABORALES.pdf?sequence=1#:~:text=Autoreporte%20de%20condiciones%20de%20trabajo,en%20su%20lugar%20de%20trabajo..> [Accessed 4 Diciembre 2020].
- [23] E. Rosti, P. Hamalainen, A. Wiksten, T. Hakkarainen and J. Ruutiainen, "Validity and Reliability of the Fatigue Severity Scale in Finnish multiple sclerosis patients," *Brain and Behavior*, vol. VII, pp. 743-752, 2017.
- [24] N. Williams, "The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale," *Occupational Medicine*, vol. 67, no. 5, p. 404-405, 2017.

- [25] A. Tomaschek, S. S. Lanfer, M. Melzer, U. Debitz and G. Buruck, "Measuring work-related psychosocial and physical risk factors using workplace observations: a validation study of the "Healthy Workplace Screening"," *Safety Science*, no. 101, pp. 197-208, 2018.
- [26] T. Waters, V. Putz-Anderson and A. Garg, "Applications manual for the revised Niosh lifting equation," *National Institute for Occupational Safety and Health*, 1994.
- [27] S. Nogareda Cuixart, "NTP 601: Evaluación de las condiciones de trabajo: carga postural. Método REBA (Rapid Entire Body Assessment)," Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, 2001.
- [28] D. Colombini, "An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs," *Ergonomics*, vol. IX, no. 41, pp. 1261-1289, 1998.
- [29] M. F. Villar, "Tareas Repetitivas Ii: Evaluación Del Riesgo Para La Extremidad Superior," *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, pp. 1-46, 2011.
- [30] Instituto del sueño, "Electromiografía (EMG)," Instituto del sueño, 2017. [Online]. Available: <https://www.iis.es/electromiograma-electromiografia-que-es-electroneurografia/>. [Accessed 16 Octubre 2019].
- [31] F. Javier and J. García, "En rehabilitación," 2017.
- [32] Universidad Pedagógica, "ARQUITECTURA DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE BIOPARÁMETROS INTEGRANDO SEÑALES INERCIALES," vol. 14, no. 27, pp. 93-102, 2018.
- [33] G. Å. Hansson, I. Balogh, K. Ohlsson, L. Granqvist, C. Nordander, I. Arvidsson, I. Åkesson, J. Unge, R. Rittner, U. Strömberg and S. Skerfving, "Physical workload in various types of work: Part II. Neck, shoulder and upper arm," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 40, no. 3, pp. 267-281, 2010.
- [34] M. Abdoli-E, M. J. Agnew and J. M. Stevenson, "An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks," *Clinical Biomechanics*, vol. 21, no. 5, pp. 456-465, 2006.
- [35] L. A. Nolasco, A. K. Silverman and D. H. Gates, "Biomechanically-Assistive Garment Offloads Low Back During Leaning and Lifting," *41st Annual Meeting of the American Society of Biomechanics*, pp. 2-3, 2017.
- [36] Y. Ganesan, S. Gobee and V. Durairajah, "Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor," *Procedia Computer Science*, vol. 76, pp. 53-59, 2015.
- [37] I. S. Dhindsa, R. Agarwal and H. S. Ryait, "Principal component analysis-based muscle identification for my," *Journal of Applied Statistics*, vol. 44, no. 10, pp. 1707-1720, 2017.
- [38] Comau, "Muscular Aiding Tech Exoskeleton," 2019. [Online]. Available: <https://www.comau.com/en/our-competences/robotics/exoskeleton>. [Accessed 18 Octubre 2019].
- [39] B. K. Dinh, M. Xiloyannis, L. Cappello, C. W. Antuvan, S. C. Yen and L. Masia, "Adaptive backlash compensation in upper limb soft wearable exoskeletons," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 92, pp. 173-186, 2017.
- [40] Ekso Bionics, "Ekso Vest," Ekso Bionics, 2019. [Online]. Available: <https://eksobionics.com/eksoworks/eksovest/>. [Accessed 27 Septiembre 2019].
- [41] Skelex, "The Ultimate Exoskeleton for Overhead Work," Skelex, 2019. [Online]. Available: <https://www.skelex.com/>. [Accessed 27 Septiembre 2019].
- [42] Skelex, "Skelex 360 manual," 29 Marzo 2019. [Online]. Available: <https://www.skelex.com/wp-content/uploads/2019/08/Skelex-360-User-manual-V1.1-29-03-2019.pdf>. [Accessed 28 Noviembre 2019].

- [43] Levitate Technologies, “Airframe– Fatigue Has a New Enemy,” Levitate Technologies, 2017. [Online]. Available: <https://www.levitatetech.com/airframe/>. [Accessed 27 Noviembre 2019].
- [44] Ottobock, “Paexo Showlder. El exoesqueleto más ligero de su clase,” Ottobock, 2019. [Online]. Available: <https://paexo.com/paexo-shoulder/?lang=es>. [Accessed 28 Noviembre 2019].
- [45] COMAU S.p.A., “Manual de usuario Exoskeleton MATE,” 1 Diciembre 2018. [Online]. Available: https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation_Products/MATE_UserManual_EN.pdf. [Accessed 1 Mayo 2020].
- [46] A. Gil, “Diseño y construcción de un exoesqueleto de brazo con dos grados de libertad controlado con señales mioeléctricas para rehabilitación motora,” *Multiciencias*, vol. 15, no. 1, pp. 96-105, 2015.
- [47] R. Chaurand, L. Prado, Gonzalez and Elvia, “Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile,” Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, 2007.
- [48] British Plastics Federation, “Polyethylene (High Density) HDPE,” 2020. [Online]. Available: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/hdpe.aspx>. [Accessed 4 Septiembre 2020].
- [49] J. Cárdenas, A. Rojas and B. Gálviz, “SciELO,” Diciembre 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242019000200111#:~:text=Se%20concluye%20que%20existe%20una,grupos%20vinilo%20y%20grupo%20COC. [Accessed 12 Noviembre 2020].
- [50] N. Williams, “The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale,” *Occupational Medicine*, vol. LXVII, no. 5, pp. 404-405, 2017.
- [51] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, “Geovisor Directorio de Empresas 2019,” 2019. [Online]. Available: <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/economia/directorio-estadistico-de-empresas/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=5>. [Accessed 19 Septiembre 2020].
- [52] A. Hareendran, N. Leidy, B. Monz, R. Winette, K. Becker and D. Mahler, “Proposing a standardized method for evaluating patient report of the intensity of dyspnea during exercise testing in COPD,” *International Journal of Chronic Obstructive pulmonary disease*, vol. VII, no. 10, pp. 345-355, 2012.
- [53] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, “COLOMBIA - Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica de Servicios – EDIT- S - 2016 - 2017,” 2019. [Online]. Available: http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/584/get_microdata. [Accessed 19 Septiembre 2020].
- [54] Metro Cuadrado, “Bodegas en Arriendo Zona Industrial Bogotá,” 2020. [Online]. Available: <https://www.metrocuadrado.com/bodegas/arriendo/bogota/zona-industrial/>. [Accessed 1 Octubre 2020].
- [55] Alibaba, “Molde de inyección de plástico,” 2020. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/plastic-injection-mould-shaping-mode-plastic-injection-molding-machine-62016222166.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.10.71b517bcyi2SRP. [Accessed 1 Octubre 2020].
- [56] Alibaba, “Reciclado y HDPE virgen gránulos/resina/Pellet,” 2020. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/recycled-virgin-hdpe-granules-resin-pellet-film-grade-for-shopping-bags-62137684935.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.63615bc1rmGF7w. [Accessed 1 Octubre 2020].
- [57] L. Vanegas, Diseño de elementos de máquinas, Pereira: Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.

