

# [193005] Diseño de grip adaptable a un cobot y a un humano haciendo uso de un destornillador

Juan Camilo Afanador Páez <sup>1a,c</sup>, Holmes Marín Higuera <sup>2a,c</sup>, Camila Andrea  
Solórzano García <sup>3a,c</sup>,

Christian Ricardo Zea Forero <sup>b,c</sup>, Magda Viviana Monroy Silva <sup>b,d</sup>

<sup>a</sup> Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup> Profesor, Director del trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup> Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

<sup>d</sup> Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia

---

## Resumen de diseño en Ingeniería

Currently there are tools that are adapted to collaborative robots through grippers, but there has not been yet any evidence of a grip design that fits both the collaborative robot and the ergonomics of the hand by using a screwdriver, furthermore the collaborative robot UR3 of the Pontificia Universidad Javeriana does not fulfill the collaborative functions with a human regarding the task of screwing or unscrewing. To solve this problem, a grip design consisting of two parts is proposed. The first part is based on a cylindrical screwdriver handle with anti-skid surface and the second part has two grooves on the upper side so that the gripper of the cobot can adapt to the grip.

The design of the grip mentioned above, was carried out in four stages. In the first stage the existing models of grip that fit tools were identified, in the second stage an anthropometric dimensioning was performed to a hundred students of the Pontificia Universidad Javeriana, and subsequently a statistical analysis was made. In the third stage the designs of prototype grip were generated and each of them was evaluated to select the grip that solves the problem. Finally, in the fourth stage an animation was carried out where the operation of the prototype of the grip by the collaborative robot and the human could be observed.

On the other hand, there were two engineering tools used to verify the design. The first one, SolidWorks software, was used to perform a maximum torque force test in order to verify the strength of the material of the design, and the second was a coupling test which was made to verify that the contact of the palm of the hand with the grip handle was high. In addition, the performance requirements achieved by the grip prototype design were: shape of the handle, weight of the grip, force that the material must support, surface of the handle, length of the handle, diameter of the handle, use of the same tool by the collaborative robot and the human, non-friction of the wrist with the top of the grip, and design of the top of the grip handle.

Considering, that the proposed design was based on the type of gripper of the collaborative robot UR3 of Pontificia Universidad Javeriana, the design of the prototype grip can only be adapted to the two-fingered grippers of the RobotiQ brand.

Finally, the design meets verifiable standards such as the criteria stipulated in the document of ergonomic and safety criteria for the design and selection of manual tools disclosed by the Ministry of Employment and Social Security of the Spanish government, which are: shape of the handle, length of the handle, weight of the tool, diameter of the handle and surface of the handle.

Key words: Collaborative robot, ergonomics, grip, gripper.



Ilustración 1. Diseño de prototipo de grip. Elaboración propia

---

## 1. Justificación

En la actualidad las empresas están en una constante transformación debido a la alta competitividad que existe, por esto las industrias comenzaron a implementar el uso de robots colaborativos o mejor conocidos como cobots. Goldman Sachs uno de los grupos de banca de inversión y valores más grandes del mundo predijo en el 2016 que *“el mercado de robots colaborativos será de \$3 a \$4 mil millones de dólares para 2020, y aumentará a \$6 mil millones de dólares para 2025”*. [1]

La implementación de un robot colaborativo en una industria tiene un costo promedio aproximado de 15.000 a 30.000 dólares [2], esta inversión es realizada para el cumplimiento de tareas que requieren un sólo modelo de gripper, sin embargo al momento de realizar una actividad que necesite otro modelo, las empresas se ven perjudicadas por la falta de una herramienta colaborativa que se pueda adaptar al cobot, por esto deben realizar otra inversión para adquirir el modelo de gripper que satisfaga el proceso a realizar, a consecuencia de lo anteriormente mencionado el costo real de la inversión es mayor de lo previsto.

Actualmente en la empresa de accesorios de motocicletas SHAD existe un robot colaborativo que cumple la función de atornillar y desatornillar mediante un gripper, éste contiene una pinza que sostiene el tornillo y al colocarlo en la superficie donde se realizará la tarea se activa el accionador de giro, el cual realiza el giro dependiendo la función que se requiera, cuando la tarea a realizar sea atornillar el giro se hace hacia la derecha y cuando la tarea sea desatornillar el giro se hace hacia la izquierda, es decir, el cobot hace la función de atornillar o desatornillar pero sin el uso de un grip, ni de un destornillador. [3]

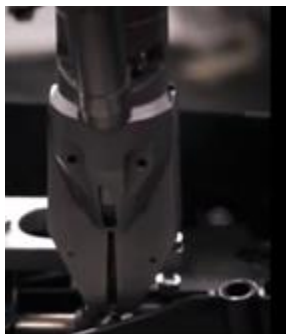


Ilustración 2. Gripper de robot colaborativo [3]

Además, cabe mencionar que la investigadora del Instituto Skolkovo de Ciencia y Tecnología de Moscú (Rusia) Dima Mironov, en su búsqueda de solucionar el problema que tienen los robots para manipular tornillos y destornilladores, desarrolló un estudio en donde evaluó las fuerzas que debe realizar un humano para la tarea de atornillar y desatornillar, con el fin de que un robot colaborativo pueda hacer esta actividad. El resultado de estas pruebas arrojó que son necesarias dos tipos de fuerza para el proceso de atornillar o desatornillar, primero se ejerce una fuerza axial para sujetar el tornillo y luego se ejerce una fuerza de presión para atornillar o desatornillar.[4]

De acuerdo con los resultados anteriormente mencionados, el grupo de investigación de Dima Mironov logró programar un robot colaborativo que realiza el mismo patrón de fuerzas que un humano ejerce para atornillar y desatornillar. El proceso que realiza el cobot consiste en dos pasos, primero el gripper izquierdo de pinza de tres dedos hace uso de un hombrosolo para sostener el tornillo y posteriormente el gripper derecho que tiene en su punta la forma de un destornillador realiza la fuerza de presión que permite atornillar o desatornillar. [5]



Ilustración 3. Gripper izquierdo del cobot [5]



Ilustración 4. Gripper derecho del cobot [4]

Como se puede evidenciar existen robots colaborativos que hacen la función de atornillar y desatornillar mediante distintos grippers, pero no existe un grip que permita la realización de esta actividad por parte del robot colaborativo y de la mano humana haciendo uso de un destornillador.

Por otra parte, la ergonomía de la mano es fundamental para el diseño de las herramientas, debido a que para una buena realización de actividades en donde se requiera una herramienta es necesario un buen agarre por seguridad y comodidad del operario, además es importante tener en cuenta el uso de guantes de protección dependiendo la tarea a realizar, ya que las medidas del mango podrían variar. [6]

De la misma manera, según un estudio realizado en la Universidad Nacional de Chungnam de Seúl-Corea, el diseño del mango de las herramientas influyen en la fuerza que ejercen los dedos, considerando que mediante el uso de un guante inteligente de agarre se midió la fuerza ejercida por cada dedo al tomar mangos con distintos diámetros, se concluyó que el dedo pulgar ejerce más fuerza al agarrar un mango de 75 mm, el dedo medio y el dedo meñique ejercen más fuerza con un diámetro de 50 mm, y el dedo índice no ejerce una magnitud de fuerza relevante frente a los diferentes diámetros.[7]

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el diseño de los mangos de las herramientas para uso humano debe usar como parámetro de medida la ergonomía de la mano humana, debido a que un mal diseño puede afectar la salud de la persona, la fuerza que ejercen los dedos y la comodidad con la que se realizan las actividades.

Adicionalmente, en la actualidad el centro tecnológico de automatización industrial (CTAI) de la Pontificia Universidad Javeriana cuenta con un robot colaborativo UR3, el cual no cumple con las funciones colaborativas realizando la tarea de atornillar o desatornillar a causa de la falta de un grip que se adapte tanto a la mano humana como al cobot utilizando un destornillador.

Dado lo anterior, teniendo como fin hacer que el robot colaborativo UR3 de la Pontificia Universidad Javeriana cumpla las funciones colaborativas con un humano respecto a la tarea de atornillar o desatornillar, la pregunta de investigación que se busca resolver en este trabajo es, ¿Cuál es el diseño de grip que se puede adaptar tanto al robot colaborativo como al humano haciendo uso de un destornillador?

## 2. Antecedentes



Según la RIA (Robotic Industries Association) el concepto de robot industrial está definido como *“un manipulador multifuncional reprogramable capaz de transportar piezas desde una trayectoria definida con el fin de cumplir una tarea específica”*. [8]

El concepto de robot industrial tiene más de 60 años de historia, dado que George Devol pionero de la robótica industrial fue quien elaboró el primer robot llamado Unimate en el año 1954, el cual fue de gran ayuda en la industria automovilística, específicamente en la línea de ensamblaje de motores de General Motors [9], debido a esto se desarrolló la primera cadena productiva automatizada de la historia. A raíz de estos avances, inventores alrededor del mundo desarrollaron nuevas patentes para lograr competir con el modelo de Devol, lo que produjo la incursión de los robots industriales en nuevos campos, como el aeronáutico, militar, espacial entre otros. [9]

Gracias a la invención del robot industrial se pudo dar el avance a lo que se conoce hoy en día como cobots o robots colaborativos. Kuka, la empresa alemana líder mundial en el suministro de robótica define los cobots como *“un tipo de robot diseñado específicamente para la interacción con el ser humano al realizar tareas de precisión”* [10]

Los cobots han sido una herramienta innovadora reciente, teniendo en cuenta que hace apenas dos años la empresa ABB crea el primer robot colaborativo de dos brazos en el mundo llamado YuMI, el cual fue galardonado con premios a nivel mundial por su desarrollo y utilidad en la industria de consumo [11]. Esta creación planteó nuevos desafíos para el desarrollo de tecnologías robóticas.

Actualmente existen varios grippers que se pueden ajustar a los robots colaborativos, lo que ha permitido mejorar procesos productivos y por ende aumentar la tasa de productividad en las empresas [12]. Los grippers más utilizados en las industrias son:

Gripper	Función
<p data-bbox="277 1310 470 1335"><b>Pinza de dos dedos</b></p>  <p data-bbox="261 1482 487 1530">Ilustración 5. Pinza de dos dedos [13]</p>	<p data-bbox="531 1373 1383 1434">Gripper sencillo de dos dedos que tiene como función mover piezas de un lado a otro de forma horizontal o vertical según la necesidad de la actividad. [13]</p>
<p data-bbox="277 1568 470 1593"><b>Pinza de tres dedos</b></p>  <p data-bbox="261 1751 487 1799">Ilustración 6. Pinza de tres dedos [14]</p>	<p data-bbox="531 1612 1383 1730">Gripper de tres dedos que tiene como función mover piezas delicadas con fuerza y precisión de un lado a otro de forma horizontal o vertical según la necesidad de la actividad, la utilización de este gripper no es muy común dado que en muchos casos solo se necesita la pinza de dos dedos. [14]</p>





<p style="text-align: center;"><b>Ventosa</b></p>  <p style="text-align: center;">Ilustración 7. Ventosa[15]</p>	<p>Gripper de cuatro ventosas de succión mediante aire comprimido, que transporta piezas de forma horizontal o vertical según la necesidad de la actividad. [15]</p>
<p style="text-align: center;"><b>Pulidora</b></p>  <p style="text-align: center;">Ilustración 8. Pulidora[16]</p>	<p>Gripper compuesto de una pulidora que tiene como función dar acabado de alta calidad a las piezas que lo requieran. [16]</p>
<p style="text-align: center;"><b>Pinza magnética</b></p>  <p style="text-align: center;">Ilustración 9. Pinza magnética[17]</p>	<p>Gripper compuesto de un imán para transportar piezas ferromagnéticas que son de superficie irregular, porosas o susceptibles a daños, cuando los métodos tradicionales de sistemas de vacío o pinzas mecánicas no son soluciones viables. [17]</p>
<p style="text-align: center;"><b>Flexy gripper</b></p>  <p style="text-align: center;">Ilustración 10. Flexy gripper[18]</p>	<p>Gripper que contiene un sistema de dedos flexibles a base de silicona, a los cuales se les inyecta aire para poder manejar objetos ligeros con menor fuerza, su función es manipular materiales frágiles de forma vertical u horizontal. [18]</p>

Tabla 1. Tipos De Grippers. Elaboración Propia

Las industrias han implementado el uso de los grippers mencionados anteriormente en los siguientes procesos:

**Industria agrícola y alimentaria:** La implementación de los robots colaborativos ha sido de vital importancia en las cadenas de producción de esta industria. En la empresa empaquetadora y de descascarado de huevos Cascina Italia, se comenzó a utilizar robots colaborativos para sujetar las cajas de los huevos en el proceso de empaquetado, por medio de un gripper de ventosas. Gracias a esta implementación se redujeron los tiempos de empaquetado de los huevos, los accidentes y el desperdicio de materia prima. [19]

**Industria de materiales mobiliarios y de equipamiento:** Los robots colaborativos han sido de gran ayuda en esta industria, ya que una de las ventajas de incluirlos en los procesos productivos es que hacen las tareas repetitivas que los operarios solían hacer. Lo anteriormente mencionado lo podemos visualizar en la empresa española SHAD, líder en la producción de accesorios para motocicleta en Europa. Por medio de la implementación de un robot colaborativo el cual cuenta con un gripper que tiene la punta de un destornillador, con el objetivo de moverse por las instalaciones para cumplir la tarea de atornillar con exactitud las piezas. [20]

**Industria eléctrica y de tecnología:** Al incluir robots colaborativos dentro de los procesos productivos de esta industria se ha mejorado la precisión y los tiempos de procesamiento de algunas tareas. En la empresa Oticon,

el segundo mayor fabricante de audífonos del mundo, los constantes cambios en los tamaños de los audífonos ocasionó que los robots usados anteriormente se atascaran debido al tamaño de las piezas que manejaban, por esto decidieron implementar un robot colaborativo el cual hace uso de un gripper de ventosas para retirar los audífonos sin tener que hacer una fuerza desmesurada sobre el molde de inyección, esta implementación le dio a la compañía la precisión requerida del proceso. [21]

Industria de metales y mecanizado: La precisión en la ubicación de las piezas es uno de los factores más importantes de este tipo de industrias. La empresa polaca Ronet fabricante de muelles, implementó un robot colaborativo que hace uso de un gripper de tres dedos, el cual sujeta el resorte y lo traslada hasta ponerlo en la siguiente línea de ensamblaje. La implementación del cobot aumentó la precisión y la calidad de este proceso de producción.[22]

Industria automovilística: Al ser una industria que maneja materiales pesados, la cantidad de accidentes en los operarios es muy alta, por esto la automatización de los procesos es un factor fundamental. Lo mencionado anteriormente se puede observar en la empresa fabricante de automóviles Nissan, dado que su fuerza laboral estaba envejeciendo, tomaron la decisión de usar robots colaborativos con grippers de bandeja en sus procesos de ensamblaje, para que fueran éstos los que transportaran piezas pesadas de un lado a otro. De esta forma se disminuyeron los esfuerzos que debían hacer sus trabajadores.[23]

En efecto, la implementación de los robots colaborativos en las industrias ha marcado un avance importante en cada uno de los procesos productivos, debido a la automatización de tareas repetitivas y precisas por medio de la creación de grippers que hacen la función de distintas herramientas sin hacer uso de ellas, ya que se evidencia un aumento en la productividad y adicionalmente se mejoran las condiciones del empleado. Sin embargo, la mejora de condiciones al empleado no sólo se debe a la automatización de procesos, sino también al buen diseño y elección de las herramientas a utilizar para cada una de las tareas a ejecutar, puesto que *“muchos accidentes de trabajo se producen por fatiga de los trabajadores y otros aspectos relacionados a la elección y diseño de la herramienta”*. [24]

A causa de lo mencionado anteriormente, el ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español divulgó un documento de herramientas manuales, el cual proporciona los criterios necesarios para el diseño y selección adecuado de las herramientas a utilizar para cada tipo de tarea a ejecutar, con el fin de evitar los accidentes causados por este aspecto. [24]

Dentro de los criterios proporcionados en el documento divulgado por el ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español, se menciona uno que tiene como regla fundamental, hacer uso de los percentiles 5 y 95 del análisis estadístico de las dimensiones de la mano de la población objetivo para la realización del diseño del mango de las herramientas, dado que el mango se debe acoplar a la mano del usuario [24], por lo tanto, es crucial realizar el dimensionamiento de la mano para la realización de un buen diseño del mango de las herramientas.

Por otra parte, también se deben tener en cuenta aspectos como el género, debido a que la fuerza que ejercen las falanges de la mano son diferentes para hombres y mujeres, la utilización de guantes porque de ser necesarios se debe hacer un aumento de 10 mm en la medida del diámetro del mango, la dominancia de la mano, puesto que las personas con dominancia en la mano derecha realizan los giros en sentido de las agujas del reloj con mayor fuerza que las personas con dominancia en la mano izquierda y finalmente la temperatura y humedad, teniendo en cuenta que a mayor temperatura hay mayor humedad y por ende niveles elevados de sudoración, los cuales afectan la elección del material del mango.[24]

De igual forma existen aspectos no físicos como el tipo de tarea a realizar, el espacio de trabajo, el ambiente de trabajo y el análisis postural y biomecánico, que afectan la fuerza que ejerce la mano, la postura que la muñeca toma y el agarre de la herramienta [24], por ende, la elaboración del diseño de las herramientas debe tener en cuenta estos aspectos para satisfacer la necesidad ergonómica del usuario.

Como se puede evidenciar en lo que mencionamos anteriormente, el diseño de las herramientas es fundamental para el buen desempeño del empleado, no obstante, la existencia de tareas repetitivas produce una afectación en la salud del empleado sin importar el buen diseño de la herramienta, por lo que la implementación de los robots colaborativos en las industrias ha sido de gran importancia. Sin embargo existen herramientas diseñadas para el uso de los humanos y no para el uso de los robots colaborativos, las cuales son conocidas como herramientas manuales, debido a que son, “*útiles simples que requieren para su funcionamiento exclusivamente la fuerza humana, adicionalmente se sostienen con las manos, y no son accionadas por motores eléctricos o de combustión interna*”, [24] como el destornillador.

Un destornillador es una herramienta que se utiliza en las industrias para actividades en donde se requiere apretar o aflojar tornillos [25]. Actualmente, existen varios tipos de destornilladores los cuales pueden clasificarse según el tipo de material del mango (caucho o plástico), el tipo de superficie del mango (lisa o antiderrapante), el tipo de punta del vástago (pala, estrella, entre otros) y el tipo de forma del mango (hexagonal o cilíndrico), como se puede observar en el anexo A1.

En conclusión, aunque actualmente existen distintos tipos de destornilladores y de grippers en el mercado, y que dos empresas desarrollaron dos grippers para la ejecución de la actividad de atornillar o desatornillar, no se encontró evidencia de un grip con la forma y uso de un destornillador. Por lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo de grado es hacer un diseño de grip adaptable a un cobot y a un humano haciendo uso de un destornillador, tomando como referencia los criterios ya definidos para el desarrollo de diseño de herramientas, y realizando las adaptaciones necesarias para que el robot colaborativo UR3 de la Pontificia Universidad Javeriana, cumpla las funciones colaborativas con un humano respecto a la tarea de atornillar o desatornillar.

### **3. Objetivos**

*Diseñar un grip que pueda ser adaptado al robot colaborativo y al humano haciendo uso de un destornillador*

- Identificar cuáles son los modelos existentes de grips en los robots colaborativos que se adaptan al uso de herramientas.
- Caracterizar la antropometría de la mano humana, con el fin de determinar cuáles son los agarres funcionales para el diseño del prototipo de grip.
- Generar el prototipo de grip que se adecuará a las especificaciones de la mano humana y del robot colaborativo para poder hacer uso de un destornillador.
- Presentar mediante una animación el diseño de grip propuesto para el uso de un destornillador por parte del robot colaborativo UR3 y el humano.

### **4. Cuerpo del documento**

Dado que el objetivo principal de este trabajo de grado es diseñar un grip que pueda ser adaptado al robot colaborativo UR3 de la Pontificia Universidad Javeriana y al humano para efectuar la tarea de atornillar o desatornillar, se definieron cuatro objetivos específicos para darle cumplimiento a éste, los cuales se desarrollaron mediante distintas metodologías y herramientas de ingeniería. Es por esto que se hará uso de una estructura por capítulos para exponer el desarrollo de cada objetivo.

#### *4.1 Objetivo 1: Identificar cuáles son los modelos existentes de grips en los robots colaborativos que se adaptan al uso de herramientas.*

La metodología implementada en el desarrollo de este objetivo fue una consulta de fuentes de información especializadas en robots colaborativos, como Universal Robots y RobotiQ, para así poder definir los tipos de grips existentes en los robots colaborativos que se adaptan al uso de herramientas.

Teniendo en cuenta que un gripper, es la pinza ubicada en el extremo de un brazo mecanizado, el cual es usado para coger piezas con diferentes volúmenes y geometrías [42], que un grip es la herramienta que se adapta a los grippers de un brazo mecanizado [43] y la información recopilada en la consulta realizada, se pudo definir que

actualmente no hay evidencia de grips que se adapten al uso de herramientas para robots colaborativos, aunque sí existen grippers que han sido adaptados a robots colaborativos con el fin de cumplir la función de las herramientas, como los grippers desarrollados por la empresa española SHAD y el Instituto Skolkovo de Ciencia y Tecnología de Moscú, los cuales tienen como finalidad cumplir con la función de atornillar o desatornillar.

El diseño del gripper implementado en la empresa española SHAD, está basado en una pinza que sostiene el tornillo, y al colocarlo en la superficie donde se realizará la tarea se activa el accionador de giro, el cual realiza el giro dependiendo la función que se requiera, cuando la tarea a realizar sea atornillar el giro se hace hacia la derecha y cuando la tarea sea desatornillar el giro se hace hacia la izquierda. [3]



Ilustración 11. Gripper de robot colaborativo [3]

Por otro lado, el gripper implementado en el Instituto Skolkovo de Ciencia y Tecnología de Moscú, consiste en hacer uso de una pinza para sostener el tornillo, posteriormente mediante una herramienta que tiene en su punta el vástago de un destornillador realiza la fuerza de presión que permite atornillar o desatornillar. [4]



Ilustración 12. Herramienta para cobot [4]

En conclusión, no hay evidencia de grips que se adapten al uso de herramientas, adicionalmente el diseño de los grippers mencionados que cumplen la función de un destornillador, no tienen la forma de un destornillador lo que impide que un humano pueda hacer uso de éstos, por lo tanto, son necesarias dos herramientas distintas para realizar la actividad de atornillar o desatornillar, un destornillador para el humano y el gripper para el cobot.

#### *4.2 Objetivo 2: Caracterizar la antropometría de la mano humana, con el fin de determinar cuáles son los agarres funcionales para el diseño del prototipo de grip.*

Considerando que el objetivo de este trabajo de grado es diseñar un grip que pueda ser adaptado al robot colaborativo UR3 de la Pontificia Universidad Javeriana y al humano para realizar la tarea de atornillar o desatornillar, es necesario realizar la caracterización de la antropometría de la mano humana para el diseño del mango del grip, debido a que ésta es la parte del grip en donde se realizará el agarre de la herramienta por parte del humano.



Para la realización de la caracterización de la antropometría de la mano humana fueron utilizadas dos metodologías, la primera fue una consulta de fuentes de información para especificar los criterios antropométricos que actualmente están estipulados para hacer uso de herramientas manuales y la segunda fue la realización de un dimensionamiento antropométrico a cien estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana.

En cuanto a la especificación de los criterios antropométricos que actualmente están estipulados para el uso de herramientas manuales, el documento divulgado por el ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español informa cuáles son los criterios ergonómicos y de seguridad, que permiten garantizar un buen uso de las herramientas para la prevención de accidentes o enfermedades laborales del usuario. Puesto que se desea diseñar un grip que realice la tarea de un destornillador, a continuación, se detallarán los criterios a tener en cuenta para el uso de este tipo de herramienta manual:

Criterios a tener en cuenta para usar un destornillador		
Criterio	Especificación	Justificación
Movimiento de la mano	<p>Movimiento de la mano</p> <p>Supinación (palma hacia arriba)      Pronación (palma hacia abajo)</p> <p><i>Ilustración 13. Movimientos de la mano. [24]</i></p>	<p>Partiendo de la postura neutra de la mano, ésta puede tomar distintas posiciones dependiendo la tarea a ejecutar.</p> <p>Dado que la tarea es atornillar o desatornillar, los movimientos de supinación y pronación son las indicadas para evitar afectaciones en la mano.[24]</p>
Tipo de agarre	Agarre de fuerza	<p>“En este tipo de agarre el pulgar y el resto de los dedos están colocados de forma opuesta y rodean a la herramienta de forma que consigue la máxima superficie de contacto entre la palma de la mano y el mango de la herramienta”. [24]</p> <p>Para poder ejecutar la tarea es necesario que la palma de la mano consiga el máximo contacto con la superficie del mango del destornillador, para que de esta forma se pueda ejercer la fuerza necesaria tanto para atornillar como para desatornillar y se evite un deslizamiento de la mano que puede llegar a causar daño al usuario.[24]</p>
Posición del cuerpo	De pie	<p>Esta posición garantiza poder aplicar la fuerza requerida para cumplir satisfactoriamente la tarea de atornillar o desatornillar. Adicionalmente, en esta posición se logra un mejor balance corporal con el objeto involucrado en la tarea.[24]</p>
Acoplamiento de la mano con el mango de la herramienta	Alto	<p>Teniendo en cuenta que el acoplamiento hace referencia a la zona de la herramienta que va a estar en contacto con la mano, el nivel de contacto debe ser alto, es decir, la palma de la mano debe estar tocando totalmente el mango del destornillador, para así garantizar un buen agarre de fuerza.[24]</p>
Tipo de fuerza	Fuerza de torsión	<p>En vista que el esfuerzo realizado por la mano es de torsión y la postura que la mano toma es pronación y supinación, la fuerza realizada es de torsión.[24]</p>

Tabla 2. Criterios a tener en cuenta para usar un destornillador. [24]

Por otra parte, el dimensionamiento antropométrico fue realizado a cien estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana (*ver anexo A2*), debido a que son la población objetivo porque el robot colaborativo UR3 se encuentra en las instalaciones de esta universidad, adicionalmente se debe mencionar que se aplicó el protocolo elaborado por la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad Santo Tomás, para la valoración de la fuerza de agarre y de pinza con dinamometría isométrica de la población adulta de Bogotá (*ver anexo B1*).

En lo que respecta al lugar en donde se realizó el dimensionamiento antropométrico, se usaron las salas de estudio del edificio Fernando Barón de las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana, con el fin de tener la misma silla para la aplicación del protocolo y así garantizar que las condiciones métricas fueran las mismas para todos los estudiantes voluntarios. Así mismo, los equipos de medición utilizados para el dimensionamiento, es decir, el dinamómetro de mano, la balanza, el cono antropométrico, la cinta métrica y el calibrador pie de rey, fueron prestados por el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) y el Centro de Estudios Ergonómicos (CEE) de la Pontificia Universidad Javeriana.

Cabe añadir que la selección de las personas para la realización del dimensionamiento antropométrico, fue mediante la elección aleatoria de los estudiantes que estuvieran disponibles en las salas de estudio para comunicarles el objetivo del dimensionamiento, posteriormente a los estudiantes que accedían se les hacía entrega del consentimiento de participación (*ver anexo B1*) y el formato de recolección de información (*ver anexo B2*), aclarando que los datos diligenciados serían de uso exclusivo de este trabajo de grado.

Una vez diligenciado el consentimiento de participación y el formato de recolección de información, se pasaba a explicarle a la persona la postura que debía tener durante la toma de medidas de esfuerzo máximo de agarre, esfuerzo máximo de pinza lateral y esfuerzo máximo de pinza palmar, las cuales debía realizar tres veces por cada mano, teniendo un descanso entre cada intento de 5 a 10 segundos. De la misma forma, se le explicaba la posición neutra en la que debía estar la mano para iniciar el dimensionamiento de la mano dominante.

Finalmente, los resultados obtenidos en este objetivo fueron fundamentales para el desarrollo del diseño del mango del grip, porque el dimensionamiento antropométrico realizado permitió caracterizar la antropometría de la mano humana de la muestra de estudiantes, y la especificación de los criterios ergonómicos necesarios para el uso de un destornillador permitió determinar el tipo de agarre correcto para éste.

#### *4.3 Objetivo 3: Generar el prototipo de grip que se adecuará a las especificaciones de la mano humana y del robot colaborativo para poder hacer uso de un destornillador.*

Para la consecución de este objetivo, fueron necesarias cuatro etapas en las que se vieron involucradas distintas metodologías y herramientas de ingeniería. En la primera etapa se realizó una consulta de fuentes de información para especificar los criterios a tener en cuenta en el diseño de herramientas manuales, en la segunda etapa se hizo un análisis estadístico del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes, en la tercera etapa se definieron los criterios de selección a tener en cuenta para evaluar los diseños de los prototipos de grip, finalmente en la cuarta etapa se hizo uso del programa SolidWorks para la generación de los prototipos de grip, y de una matriz de selección para elegir el prototipo de grip que se adecue a las especificaciones de la mano humana y del robot colaborativo para poder ejecutar la tarea de atornillar o desatornillar.

##### *4.3.1. Primera etapa - Especificación de criterios para el diseño de herramientas manuales*

El ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español divulgó un documento de criterios ergonómicos y de seguridad que se deben tener en cuenta para el diseño y selección de herramientas manuales. Teniendo en cuenta que la problemática a solucionar está asociada al uso de un destornillador, se especificaron únicamente los criterios que están relacionados con el diseño de esta herramienta manual, como se detalla a continuación:

Criterios para el diseño ergonómico de un destornillador		
Criterio	Especificación	Justificación
Forma del mango	Cilíndrica	Dado que el mango debe proporcionar el máximo contacto entre la herramienta y la palma de la mano, la forma debe ser cilíndrica, para así poder garantizar un agarre ergonómico.[24]
Longitud del mango	10 cm - 15 cm	Es importante que la longitud del mango se encuentre dentro de este rango, ya que así se garantiza un buen agarre de fuerza.[24]
Peso de la herramienta	Máximo 1.5 kg	“Entre menor peso tenga la herramienta es más favorable” [24] para así poder evitar lesiones en la muñeca. Adicionalmente entre mayor sea el tiempo de uso de la herramienta, menor peso debe tener ésta. [24]
Material del mango de la herramienta	Caucho	El material del mango del destornillador debe ser caucho, dado que es un material con coeficiente de rozamiento elevado, lo que garantiza tener un buen agarre de fuerza y disminución en el posible deslizamiento involuntario de la mano. [24]
Diámetro del mango	3.2 cm - 5.1 cm	El diámetro del mango debe estar dentro de este rango, para así poder obtener un acople adecuado, entre la palma de la mano y el mango del destornillador. [24]
Superficie del mango	Antiderrapante	Las condiciones de temperatura y humedad son un factor importante al momento de especificar el diseño de una herramienta, ya que si la temperatura es alta, el nivel de humedad será alto, por lo que el usuario de la herramienta puede llegar a tener sudoración en la mano, teniendo en cuenta lo mencionado la superficie del mango debe tener características antiderrapantes para garantizar el agarre del destornillador. [24]

Tabla 3. Criterios para el diseño ergonómico de un destornillador. [24]

Por otra parte, adicional a los criterios anteriormente mencionados, se debe tener en cuenta que existe una regla habitual de diseño de las herramientas manuales, la cual dice que es necesario considerar los percentiles 5 y 95 de la población estudiada para hacer el dimensionamiento de la herramienta. [24]

#### 4.3.2. Segunda etapa - Análisis estadístico de dimensionamiento antropométrico

Luego de realizar el dimensionamiento antropométrico a la muestra de estudiantes, se ingresaron los datos obtenidos de cada una de las variables del formato de recolección de datos a la herramienta de ingeniería SPSS, con el objetivo de calcular la media, la desviación estándar y los percentiles 5 y 95 (ver anexo B3).

Teniendo en cuenta las variables del formato de recolección de datos y los criterios de diseño ergonómicos de un destornillador (ver tabla No. 3), se determinó que las variables que se deben tener en cuenta para el dimensionamiento del mango son el diámetro de agarre, el ancho máximo de la mano y el esfuerzo máximo de agarre, debido a que estas variables son las que permitirán dimensionar el diámetro del mango del grip, la longitud del mango del grip y la fuerza que debe soportar el mango del grip, respectivamente.

Adicionalmente, al analizar los resultados obtenidos en la variable esfuerzo máximo de agarre (ver anexo B4), se pudo observar que los aspectos diferenciales entre el dato de mayor valor y el dato de menor valor tanto para el género femenino como el masculino, fueron los hábitos respecto a la ingesta de alcohol y al nivel de entrenamiento físico, debido a que la persona que obtuvo el dato de mayor valor en ambos géneros, es diestra, físicamente entrenada y no ingiere alcohol, mientras que la persona que obtuvo el dato de menor valor en ambos géneros, es diestra, ingiere alcohol dos veces a la semana y no está físicamente entrenada. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se infiere que los hábitos de ingesta de alcohol y el entrenamiento físico son los aspectos que tienen más relevancia para que una persona ejerza una fuerza mayor o menor de agarre.

Finalmente, es importante resaltar que el 91% de la muestra a la que se le realizó el dimensionamiento antropométrico es diestra (*ver anexo B3*), debido a que las personas diestras ejercen mayor fuerza en las tareas donde la mano realiza giros en sentido del huso horario. [24]

#### 4.3.3. Tercera etapa - Definición de los criterios de selección para evaluar los diseños del prototipo de grip

Para poder empezar a diseñar el prototipo del grip, fue necesario estipular los criterios que debía cumplir éste y la herramienta de ingeniería a utilizar para evaluar cada uno de los diseños propuestos.

En primer lugar, para la definición de los criterios a evaluar en los diseños del prototipo de grip, se tomaron como referencia los criterios estipulados para el diseño ergonómico de un destornillador (*ver tabla No. 3*) y se hicieron las adaptaciones necesarias aplicando la regla habitual de diseño, es decir, se tomaron los percentiles 5 o 95 de los resultados de las variables diámetro de agarre, ancho máximo de la mano y esfuerzo máximo de agarre obtenidos en el análisis estadístico del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes, como se muestra a continuación:

Criterios de selección		
No.	Criterio	Definición
1	Forma del mango del grip	En vista que para poder realizar la tarea de atornillar o desatornillar se debe tener un agarre de fuerza, y que se debe tener un acoplamiento alto de la palma de la mano con el mango de la herramienta, la forma que debe tener el mango del grip es cilíndrica para poder garantizar el máximo contacto de la palma de la mano con la herramienta, ( <i>ver tabla No. 3</i> ).
2	Peso del grip	De acuerdo al documento divulgado por el ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español, sobre los criterios ergonómicos y de seguridad, las herramientas manuales no deben tener un peso mayor a 1.5 kg, con la finalidad de evitar lesiones al momento de ser utilizadas por un usuario, ( <i>ver tabla No. 3</i> ).
3	Superficie del mango del grip	Considerando que la fuerza ejercida por una persona al realizar la tarea de atornillar o desatornillar es de torsión y que adicionalmente el agarre para este tipo de tarea es de fuerza, la superficie del mango debe ser antiderrapante para evitar deslizamientos de la mano del usuario, ( <i>ver tabla No. 3</i> ).
4	Longitud del mango del grip	Para determinar el rango de medidas de la longitud del mango del grip que se ajusta a la muestra de estudiantes, se tuvo en cuenta el percentil 95 de la variable ancho máximo de la mano del análisis estadístico del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes. Teniendo en cuenta que el rango en el que debe estar la longitud del mango de un destornillador actualmente está entre los 10 cm y 15 cm ( <i>ver tabla No. 3</i> ) y que el percentil 95 del ancho máximo de la mano dio 11,13 cm ( <i>ver anexo B4</i> ), la longitud del mango del grip debe estar entre el rango de los 11,13 cm y 15 cm.
5	Fuerza que debe soportar el material del mango del grip	Actualmente el material utilizado en la elaboración de mangos de destornilladores es el caucho ( <i>ver tabla No. 3</i> ), sin embargo para el fin de este trabajo de grado el material del mango del grip será el polímero PLA, ya que anteriormente se había propuesto imprimir el prototipo en una impresora 3D haciendo uso de este polímero. Adicionalmente, considerando que se requiere saber la fuerza que el material debe soportar, se utilizó el percentil 95 de la variable esfuerzo máximo de agarre del análisis estadístico del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes. De acuerdo a lo mencionado y al resultado obtenido en el percentil 95 de la variable esfuerzo máximo de agarre ( <i>ver anexo B4</i> ), el valor que el material del mango del grip debe soportar es mínimo 42,63 KgF. Así mismo, es importante mencionar que para saber si los prototipos de grip soportan la fuerza mencionada, se hará un análisis de elementos finitos en el programa SolidWorks.

6	Diámetro del mango del grip	Con el fin de determinar el diámetro del mango del grip que se ajusta a la muestra de estudiantes, se utilizó el percentil 5 de la variable diámetro de agarre del análisis estadístico del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes. Dado que actualmente el rango del diámetro del mango de un destornillador está entre 3,2 cm y 5,1 cm (ver tabla No. 3) y que el percentil 5 de la variable diámetro de agarre dio 4,29 cm (ver anexo B4), el rango del diámetro del prototipo de grip debe estar entre 3,2 cm y 4,29 cm.
7	El humano y el robot colaborativo UR3 hacen uso de la misma herramienta	El prototipo de grip debe permitir que el robot colaborativo y el humano realicen la tarea de atornillar o desatornillar con la misma herramienta, es decir, realizar la actividad sin necesidad de hacer uso de herramientas distintas al grip.
8	No debe existir rozamiento entre la mano y la muñeca del usuario con la parte superior del grip en donde se adapta el gripper del cobot al realizar actividades	Puesto que el diseño del grip requiere una pieza en el área superior del mango para la adaptación del gripper del cobot, es necesario garantizar que cuando el humano hace uso del grip no haya rozamiento entre la mano y la parte superior de éste, para así evitar accidentes, molestias, o inconvenientes.
9	El diseño de la parte superior del mango del grip es redondeado	Teniendo en cuenta que el diseño del grip requiere una pieza en el área superior del mango para la adaptación del gripper y que la mano humana también tendrá contacto con esta parte del grip, es necesario garantizar que esta pieza no deje surcos o marcas en la palma de la mano, debido a que en el documento divulgado por el ministerio de empleo y seguridad social del gobierno español, sobre los criterios ergonómicos y de seguridad, se especifica que los diseños de herramientas manuales, deben ser redondeados, sin cantos agudos, ni rebabas, para que no existan marcas en la palma de la mano de los usuarios. [24]

Tabla 4. Criterios de selección. Elaboración propia

Cabe mencionar que el material seleccionado para la impresión en 3D fue PLA, como se mencionó anteriormente en el criterio 5 “Fuerza que debe soportar el mango del grip”, debido a que al hacer una comparación de precios y propiedades de los tres materiales disponibles en la Pontificia Universidad Javeriana (Ver anexo A6), el PLA era el material más económico, adicionalmente es biodegradable y el coeficiente de rozamiento es mayor que el coeficiente de rozamiento del ABS y la resina.

En segundo lugar, se decidió utilizar una matriz de selección como herramienta de ingeniería para evaluar cada uno de los diseños propuestos, la cual consiste en evaluar cada diseño mediante el promedio de la suma de las calificaciones de desempeño relativo que se le otorga a cada criterio [55]. Por lo general, la escala de calificación de desempeño relativo para matrices ergonómicas está fijada de 1 a 5, de la siguiente forma:

Escala de calificación	Desempeño relativo
1	Mucho peor que la referencia
2	Peor que la referencia
3	Igual que la referencia
4	Mejor que la referencia
5	Mucho mejor que la referencia

Tabla 5. Matriz de calificación. [55]

Finalmente, luego de evaluar cada diseño se selecciona el que mejor calificación promedio obtenga.

#### 4.3.4. Cuarta etapa - Diseño y evaluación de prototipos de grip

El desarrollo de esta etapa fue progresivo debido a que tanto los diseños como las calificaciones de los prototipos de grip fueron realizados a partir de un diseño de referencia. Para el primer diseño se tomaron como referencia los dos modelos de grippers existentes que realizan la tarea de un destornillador (*ver ilustración 11 y 12*), para el segundo diseño se tuvo como referencia el diseño de un destornillador regular (*ver anexo B6*), para el tercer diseño la referencia fue el diseño dos debido a que el diseño uno no cumplía con el objetivo de adaptabilidad del grip al robot colaborativo de este trabajo de grado, ya que el diseño uno no tiene ninguna cavidad en donde se pueda adaptar el gripper del cobot, finalmente para los diseños cuatro y cinco la referencia fue el diseño de prototipo elaborado inmediatamente anterior a cada uno, es decir, para el diseño cuatro el diseño referente fue el diseño tres y para el diseño cinco el diseño de referencia fue el diseño cuatro.

Teniendo en cuenta los diseños referentes para cada prototipo de grip mencionados anteriormente, y las características y especificaciones de cada diseño, se le otorgó una calificación a cada criterio especificado en la matriz de selección para poder determinar el diseño con mayor calificación promedio. Es importante mencionar que en el anexo A3, se pueden evidenciar las imágenes, características, especificaciones, pasos de uso para el humano y pasos de uso para el robot colaborativo de cada uno de éstos, y en el anexo A4, se podrá observar para cada diseño, la calificación otorgada a los criterios con su respectiva justificación.

Luego de calificar cada uno de los diseños, los resultados obtenidos en la matriz de selección fueron los siguientes:

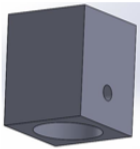
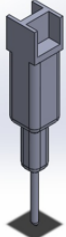
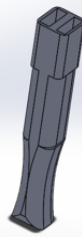


		MATRIZ DE SELECCIÓN				
No.	Criterio	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5
						
		Calificaciones	Calificaciones	Calificaciones	Calificaciones	Calificaciones
1	Forma del mango debe ser cilíndrica	4	2	4	5	3
2	El peso del grip no debe superar los 1,5 kg	4	2	4	2	4
3	El diseño del mango del grip cuenta con una superficie antiderrapante que evita que la mano se deslice.	4	3	2	1	5
4	El rango de la longitud del mango debe estar entre 11,13 cm y 15 cm	4	1	4	3	3
5	La fuerza que debe soportar el material del mango es de mínimo 42,63 KgF	4	3	3	3	3
6	El diámetro del mango del grip debe estar entre el rango de 3,2 cm y 4,29 cm	4	1	3	4	3
7	El humano y el robot colaborativo UR3 hacen uso de la misma herramienta.	4	4	3	4	5
8	No debe existir rozamiento entre la mano y la muñeca del usuario con la parte superior del grip en donde se adapta el gripper del cobot al realizar actividades	2	3	3	2	5
9	El diseño de la parte superior del mango del grip es redondeado	2	2	4	3	5
<b>Total</b>		32	21	30	27	36
<b>Promedio</b>		3.56	2.33	3.33	3.00	4.00

Tabla 6. Matriz de selección. Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla No. 6, el diseño que obtuvo mejor calificación promedio fue el diseño 5, adicionalmente detallando las especificaciones de éste, se puede evidenciar que la totalidad de los criterios estipulados en la matriz de selección son cumplidos, por lo tanto fue el diseño de prototipo de grip seleccionado.

#### 4.4 Objetivo 4: Presentar mediante una animación el diseño de grip propuesto para el uso de un destornillador por parte del robot colaborativo UR3 y el humano.

Con el fin de presentar el funcionamiento del diseño seleccionado anteriormente, se realizó una animación en donde se utilizaron las herramientas de ingeniería 3D MAX, SolidWorks y Premiere. En la animación se puede

observar al humano realizar la tarea de atornillar y al robot colaborativo realizar la tarea de desatornillar, haciendo uso del grip, (*ver anexo C1*).

Los pasos para la realización de la animación fueron los siguientes:

1. Realizar el diseño del gripper del robot colaborativo UR3 (*ver anexo B17*) y el herramintero (*ver anexo B18*) en SolidWorks.
2. Descargar el diseño del robot UR3 de Universal Robots. [57]
3. Insertar las relaciones de posición necesarias al robot colaborativo y al gripper en SolidWorks para poder ejecutar la tarea de atornillar o desatornillar.
4. Ensamblar el gripper al robot colaborativo UR3 en SolidWorks.
5. Importar el robot colaborativo UR3, el herramintero y el grip a la herramienta de ingeniería 3D MAX.
6. Definir el escenario de la ambientación de la animación.
7. Importar los elementos necesarios para realizar la ambientación del escenario escogido.
8. Realizar las escenas en 3D MAX de los movimientos requeridos a través de renders, teniendo en cuenta que un render es un segundo de animación que corresponde a treinta fotogramas.
9. Importar los renders según la secuencia de movimientos al programa de edición Premiere.
10. Ajustar los detalles de video según los requerimientos deseados.
11. Realizar la renderización de la animación para generar un formato de video.

## **5. Resultados**

*5.1 Objetivo 1: Identificar cuáles son los modelos existentes de grips en los robots colaborativos que se adaptan al uso de herramientas.*

La consulta realizada en las fuentes de información, dio como resultado que no hay evidencia de grips que se adapten al uso de herramientas para robots colaborativos, adicionalmente se encontró que la empresa española SHAD y el Instituto Skolkovo de Ciencia y Tecnología de Moscú desarrollaron dos grippers que se adaptan a robots colaborativos para realizar la función de un destornillador, sin embargo estos grippers no pueden ser usados por humanos, lo que significa que es necesario un destornillador para que el humano pueda realizar la actividad de atornillar o desatornillar.

*5.2 Objetivo 2: Caracterizar la antropometría de la mano humana, con el fin de determinar cuáles son los agarres funcionales para el diseño del prototipo de grip.*

Debido a que en este objetivo se realizó una consulta de fuentes de información para especificar los criterios antropométricos que actualmente están estipulados para hacer uso de herramientas manuales y un dimensionamiento antropométrico a cien estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana, se obtuvieron dos resultados.

El primer resultado obtenido, fue que el agarre funcional para el diseño del prototipo de grip debía ser un agarre de fuerza, dado que para poder ejercer la fuerza necesaria para realizar la tarea de atornillar o desatornillar, se debe tener el máximo contacto entre la palma de la mano y el mango del destornillador.

El segundo resultado obtenido fue que las variables del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes a tener en cuenta en el dimensionamiento del mango del grip debían ser el diámetro de agarre, el ancho máximo de la mano y el esfuerzo máximo de agarre, ya que estas variables permitirán dimensionar el diámetro del mango del grip, la longitud del mango del grip y la fuerza que debe soportar el mango del grip, respectivamente.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la Universidad de Guadalajara hizo un dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años [58], se decidió comparar el percentil 95 de la variable ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes, con el percentil 95 de la variable ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizado por la Universidad de Guadalajara (*ver anexo A5*), con el fin de ver si el dimensionamiento de la longitud del mango del grip realizado a partir del dimensionamiento antropométrico de la muestra de estudiantes se ajustaría al dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizado por la Universidad de Guadalajara. Es importante mencionar que sólo se hizo la comparación de la variable ancho máximo de la mano, porque las variables diámetro de agarre y esfuerzo máximo de agarre no fueron mencionadas en el dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizado por la Universidad de Guadalajara.

El resultado obtenido de la comparación del percentil 95 del ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes y el percentil 95 del ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizado por la Universidad de Guadalajara (*ver anexo A5*), fue que el percentil 95 de la variable ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico realizado a la muestra de estudiantes fue mayor que el percentil 95 de la variable ancho máximo de la mano del dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizado por la Universidad de Guadalajara, lo que podría significar que en lo referente al dimensionamiento de la longitud del mango del prototipo de grip realizado a partir del dimensionamiento antropométrico de la muestra de estudiantes, el dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años se ajustaría al dimensionamiento de la longitud del mango del grip.

*5.3 Objetivo 3: Generar el prototipo de grip que se adecuará a las especificaciones de la mano humana y del robot colaborativo para poder hacer uso de un destornillador.*

Luego de evaluar cada uno de los diseños propuestos en la matriz de selección, se obtuvo como resultado que el diseño seleccionado fuera el diseño 5, porque fue el diseño que mejor calificación promedio alcanzó, además al revisar las especificaciones de éste se pudo evidenciar que todos los criterios establecidos se cumplen, a continuación, se puede apreciar el diseño seleccionado:



*Ilustración 14. Diseño 5. Elaboración propia.*

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el acoplamiento de la mano con el mango de las herramientas manuales debe ser alto (*ver tabla No. 3*), para determinar esto se realiza una prueba de acoplamiento que consiste en pintar el mango de la herramienta manual con pintura negra, posteriormente se agarra la herramienta manual y se efectúa la tarea que requiera, finalmente se coloca la mano sobre una hoja blanca y se retira lentamente, si la huella no presenta espacios en blanco pronunciados se concluye que el acoplamiento es alto. [24]



Con la finalidad de conocer el nivel de acoplamiento que tendría el diseño seleccionado, se decidió realizar la prueba de acoplamiento explicada anteriormente (*ver anexo C2*) al destornillador utilizado como referencia para el diseño y evaluación del prototipo 2 (*ver anexo B6*), debido a que las especificaciones del mango son similares a las especificaciones del mango del prototipo de grip 5 (*ver anexo A7*), dando como resultado un acoplamiento alto (*ver ilustración 15*), ya que no se presentan espacios en blanco pronunciados.



Ilustración 15. Prueba de acoplamiento. Elaboración propia.

Adicionalmente, se realizó una prueba de fuerza máxima de torque al prototipo de grip seleccionado (*ver anexo B19*), el cual tiene como material estipulado el ácido poliláctico (PLA) en la herramienta de ingeniería SolidWorks. La prueba consiste en aplicar la fuerza máxima de torque al mango del prototipo de grip seleccionado respecto al eje, para determinar que la fuerza sea soportada, sin que en el diseño se generen rupturas o deformaciones, esta fuerza se calcula multiplicando la distancia existente entre el codo y la punta del vástago del grip con el valor mínimo de fuerza que el material debe soportar, estipulado en la matriz de selección (*ver tabla No. 6*). El resultado obtenido en esta prueba es que el diseño con el material PLA resiste la fuerza de torque ejercida, como se muestra en la ilustración 16, porque la totalidad del diseño está en color azul, es decir, no se evidencia una tensión que pueda generar rupturas o deformaciones.

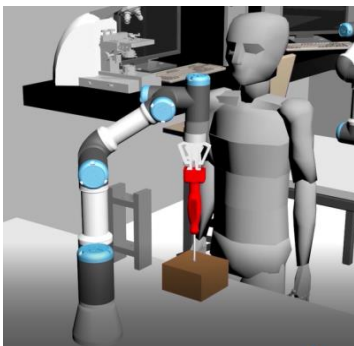


Ilustración 16. Prueba de fuerza de torque. Elaboración propia.

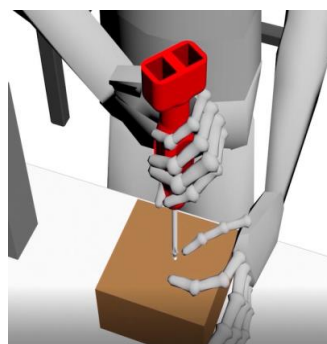
#### 5.4 Objetivo 4: Presentar mediante una animación el diseño de grip propuesto para el uso de un destornillador por parte del robot colaborativo UR3 y el humano.

La animación realizada en las herramientas de ingeniería 3D MAX, SolidWorks y Premiere dio como resultado la imagen de una buena adaptación del diseño tanto para el robot colaborativo (*ver ilustración 17*) como para

el humano (*ver ilustración 18*), al realizar la tarea de desatornillar y atornillar haciendo uso del prototipo de grip seleccionado.



*Ilustración 17. Animación cobot. Elaboración propia*



*Ilustración 18. Animación humana. Elaboración propia*

Así mismo, se decidió realizar en porcelanicon una semejanza de lo que sería la parte superior del diseño del prototipo de grip 5, la cual se adaptó al destornillador utilizado como referencia para el diseño y evaluación del prototipo 2 (*ver anexo B6*), debido a que las especificaciones del mango de este destornillador son similares a las especificaciones del mango del diseño 5, con la finalidad de simular la funcionalidad del prototipo de grip al realizar la tarea de atornillar y desatornillar. En el anexo C3, se puede observar la simulación mencionada y en las ilustraciones 19, 20 y 21 se evidencia el resultado de la semejanza del prototipo, el agarre frontal y el agarre posterior del mismo.



*Ilustración 19. Semejanza del grip. Elaboración propia.*



*Ilustración 20. Agarre vista frontal. Elaboración propia.*



*Ilustración 21. Agarre vista posterior. Elaboración propia.*

Como resultado del video de la simulación se obtuvo que hay rozamiento entre la muñeca y la parte superior del grip, debido a que no se pudo dejar el espacio de los 3 cm sobre el mango que se encuentra en las especificaciones del diseño 5, sin embargo, al agarrar el destornillador 3 cm por debajo de la parte superior y realizar la tarea de atornillar y desatornillar no hay rozamiento.

### *5.5 Medición del impacto*

El diseño del prototipo de grip elaborado podría tener un impacto financiero, social, operacional y ambiental de la siguiente manera:

#### *5.5.1 Impacto Financiero*

Debido a que el diseño del prototipo de grip elaborado, se adapta para que el humano y el robot colaborativo

realicen la tarea de atornillar o desatornillar haciendo uso de la misma herramienta, las empresas ya no tendrían que invertir en una herramienta para el humano y en otra para el robot colaborativo, lo que podría generar una disminución en los costos de las compañías y a que mientras la inversión del cobot UR3 con el gripper que hace la función de un destornillador tiene un costo de \$135'612.000, la inversión del cobot UR3 con el prototipo de grip 5 tendría un costo de \$124'328.520 como se puede apreciar en el anexo A8.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la tarea repetitiva de atornillar y desatornillar podría producir síndrome del túnel del carpiano, una de las cinco enfermedades laborales más comunes[59], y que según el Ministerio de Salud y Protección Social del gobierno colombiano “*El ingreso base de liquidación (IBL) de la prestación económica cuando se diagnostica una enfermedad laboral, corresponde al promedio del último año, o fracción de año, del ingreso base de cotización (IBC) anterior a la fecha en que se calificó en primera oportunidad el origen de la enfermedad laboral*”[60], se realizó el supuesto donde el ingreso base de liquidación fuera el salario mínimo, dando como resultado que la empresa perdería mensualmente 1'275.767. Ver anexo A8.

### *5.5.2 Impacto Social*

Teniendo en cuenta la comparación realizada entre el dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana entre los 20 y 29 años realizada por la Universidad de Guadalajara y el dimensionamiento realizado a la muestra de estudiantes, se podría decir que el dimensionamiento de la longitud del mango del prototipo de grip se ajustaría al dimensionamiento antropométrico de la población laboral colombiana que estén entre los 20 y 29 años, esto podría causar un impacto social ya que si las variables de diámetro de agarre y esfuerzo máximo de agarre fueran medidas y se ajustaran al igual que la variable ancho máximo de agarre, la población laboral colombiana que estén entre los 20 y 29 años podría hacer uso del prototipo del grip para realizar la tarea de atornillar o desatornillar.

### *5.5.3 Impacto Operacional*

Dado que el diseño del prototipo de grip elaborado, busca un trabajo colaborativo entre el humano y el cobot para realizar la tarea de atornillar o desatornillar, podría existir un impacto operacional por la disminución de este tipo de tareas repetitivas que son realizadas por los operarios, y así evitar las lesiones ocasionadas por la fatiga.

### *5.5.4 Impacto Ambiental*

En caso de que se decidiera imprimir el prototipo del grip, el material propuesto para la impresión en 3D es PLA, esto puede generar un impacto ambiental, porque este material es biodegradable y por ende no se aumentarían los niveles de contaminación del medio ambiente.

## **6. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.**

### *6.1 Conclusiones*

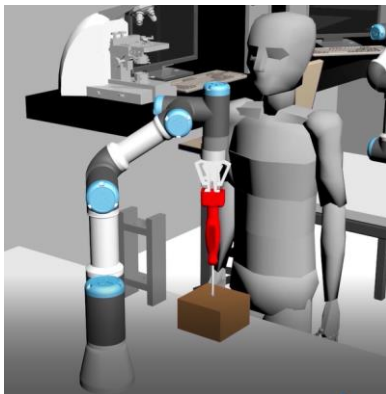
- Teniendo en cuenta que un gripper, es la pinza ubicada en el extremo de un brazo mecanizado, el cual es usado para coger piezas con diferentes volúmenes y geometrías[42], que un grip es la herramienta que se adapta a los grippers de un brazo mecanizado[43], y a partir de los resultados obtenidos en la consulta de fuentes de información para determinar los tipos de grips que se ajustan a herramientas, se concluyó que no hay evidencia de grips que se ajusten a herramientas para el uso de un humano y de un robot colaborativo, también se pudo concluir que actualmente existen dos grippers que realizan la función de un destornillador.

- Con los resultados obtenidos en la consulta de fuentes de información para especificar los criterios que actualmente están estipulados para que el humano haga uso de herramientas manuales, se concluyó que el único agarre funcional para el diseño del prototipo de grip es el agarre de fuerza.
- Los resultados de la matriz de selección permitieron determinar que el diseño de prototipo de grip 5 es el que se puede adaptar tanto al robot colaborativo como al humano para realizar la tarea de atornillar o desatornillar.

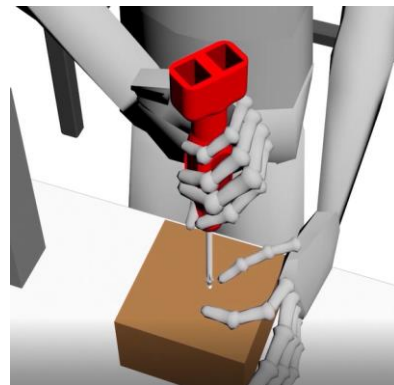


*Ilustración 22. Prototipo de grip 5. Elaboración propia*

- Por medio de la prueba de acoplamiento realizada a la semejanza del prototipo de grip seleccionado, se determinó que el prototipo de grip podría tener un nivel de contacto alto, es decir, la palma de la mano tocaría totalmente el mango del prototipo de grip.
- El resultado de la simulación de fuerza máxima de torque realizada al diseño del prototipo de grip seleccionado, permitió concluir que no hay una tensión que pueda generar rupturas o deformaciones en el material PLA del diseño.
- Se puede concluir respecto a la animación realizada, que el diseño de prototipo de grip seleccionado permitiría cumplir las funciones colaborativas del cobot UR3 de la Pontificia Universidad Javeriana con el humano realizando la tarea de atornillar y desatornillar.



*Ilustración 23. Animación cobot. Elaboración propia*



*Ilustración 24. Animación humana. Elaboración propia*

- A partir de la simulación de funcionalidad realizada a la semejanza del prototipo del grip seleccionado, se concluyó que no existiría rozamiento entre la muñeca del humano y la parte superior del grip al realizar la tarea de atornillar o desatornillar.

## 6.2 Recomendaciones

- Al realizar la tarea de atornillar o desatornillar, el humano debe ejecutarla de pie para que pueda ejercer la fuerza requerida. [24]
- Para garantizar la adaptación del grip al cobot, es necesario colocar el grip en el herramientero en la posición adecuada.
- Se recomienda dar una capacitación a la persona que vaya a utilizar el grip o el robot colaborativo, para evitar un uso incorrecto de los elementos.
- Se aconseja hacer la tarea de atornillar o desatornillar en un espacio amplio con buena iluminación y un ambiente no tan húmedo. [24]

## 6.3 Limitación

- El no contar con los pesos de los grippers tomados como referencia para el diseño y evaluación del diseño uno, dificultó la evaluación del criterio 2 “*el peso del grip no debe superar los 1.5 kg*”, para este diseño en la matriz de selección.

## 7. Glosario

**Grip:** Agarra dera, es la herramienta que se adapta a los grippers de un brazo mecanizado. [43]

**Gripper:** Pinza ubicada en el extremo de un brazo mecanizado, el cual es usado para coger piezas con diferentes volúmenes y geometrías. [42]

## 8. Tabla de anexos

Nombre del anexo	Contenido del anexo	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto (https://goo.gl/)
A1	Cuadro destornilladores existentes	Propio	Excel	<a href="#">Vínculo corto anexos A</a>
A2	Base de datos de dimensionamiento antropométrico	Propio	Excel	
A3	Especificaciones de diseños de prototipo de grip	Propio	Excel	
A4	Matriz de selección	Propio	Excel	
A5	Comparación de percentiles entre población objetivo y de estudio	Propio	Excel	
A6	Comparación de diseño de grip y destornillador regular	Propio	Excel	
B1	Consentimiento y protocolo	Universidad Javeriana	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B1</a>
B2	Formato de recolección de información	Universidad Javeriana	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B2</a>
B3	Análisis SPSS completo	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B3</a>
B4	Análisis SPSS de tres variables	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B4</a>
B5	Plano diseño 1	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B5</a>
B6	Plano e imagen del destornillador regular	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B6</a>
B7	Análisis SPSS de destornilladores existentes	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B7</a>
B8	Peso y prueba de fuerza del diseño 1	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B8</a>
B9	Plano diseño 2	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B9</a>

B10	Peso y prueba de fuerza diseño 2	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B10</a>
B11	Plano diseño 3	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B11</a>
B12	Peso y prueba de fuerza diseño 3	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B12</a>
B13	Plano diseño 4	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B13</a>
B14	Peso y prueba de fuerza del diseño 4	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B14</a>
B15	Plano diseño 5	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B15</a>
B16	Peso y prueba de fuerza del diseño 5	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B16</a>
B17	Plano del diseño del gripper 2f-85 de RobotiQ	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B17</a>
B18	Plano del herramentero	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B18</a>
B19	Prueba de fuerza máxima de torque del diseño 5	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B19</a>
B20	Prueba de fuerza del destornillador regular	Propio	PDF	<a href="#">Vínculo corto anexo B20</a>
C1	Video de animación utilizando el grip	Propio	MP4	<a href="#">Vínculo corto anexo C1</a>
C2	Video de prueba de acoplamiento	Propio	MP4	<a href="#">Vínculo corto anexo C2</a>
C3	Video del uso de la semejanza del grip	Propio	MOV	<a href="#">Vínculo corto anexo C3</a>

## 9. Referencias

- [1] J. S. Brown and J. Hagel, "The next frontier of innovation," *McKinsey Q.*, no. 3, pp. 82–91, 2005.
- [2] R. Brown, "The true cost of desalination," *Planning*, vol. 79, no. 9, p. 46, 2013.
- [3] "UNIVERSAL ROBOTS." [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/casos-prácticos/shad/>.
- [4] D. Mironov, M. Altamirano, H. Zabihifar, A. Liviniuk, V. Liviniuk, and D. Tsetserukou, "Haptics of Screwing and Unscrewing for Its Application in Smart Factories for Disassembly," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 10894 LNCS, pp. 428–439, 2018.
- [5] M. Díaz, "Un robot aprende a atornillar y desatornillar igual que los humanos," *Mit Technology Review*, 2018. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/9991/un-robot-aprende-atornillar-y-desatornillar-igual-que-los-humanos>.
- [6] G. Harih and B. Dolšak, "Tool-handle design based on a digital human hand model," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 43, no. 4, pp. 288–295, 2013.
- [7] J. H. Lee, Y. S. Lee, S. H. Park, M. C. Park, B. K. Yoo, and S. M. In, "A study on the human grip force distribution on the cylindrical handle by intelligent force glove(I-force glove)," *Int. Conf. Control. Autom. Syst. ICCAS 2008*, pp. 966–969, 2008.
- [8] "Collaborative Robots Market Research," *Robotic Industries Association*. [Online]. Available: <https://www.robotics.org/Collaborative-Robots>.
- [9] S. Vinssa, "Robots industriales: historia, clasificación y funcionalidad," *Vinssa Industrial Solutions*, 2018. [Online]. Available: <https://blog.vinssa.com/robots-industriales-historia-clasificacion-y-funcionalidad>.
- [10] KUKA, "KUKA." [Online]. Available: <https://www.kuka.com/es-es>.
- [11] ABB, "ABB crea el primer robot colaborativo en el mundo," *Expok*. [Online]. Available: <https://www.expoknews.com/abb-crea-el-primer-robot-colaborativo-en-el-mundo/>.

- [12] “Aumenta el interés de las empresas por invertir en robótica colaborativa,” *Factoría del futuro*, 2019. [Online]. Available: <https://www.factoriadelfuturo.com/aumenta-el-interes-de-las-empresas-por-invertir-en-robotica-colaborativa/>.
- [13] “PINZA DE DOS DEDOS,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/gripkit-e-series/>.
- [14] “PINZA DE TRES DEDOS,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/gripkit-p-series/>.
- [15] “VENTOSA,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/emi-gripper-kit-3d-v/>.
- [16] “PULIDORA,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/active-orbital-kit/>.
- [17] “PINZA MAGNÉTICA,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/mhm-magnetic-gripper-kit/>.
- [18] “FLEXY GRIPPER,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/end-effectors/soft-robotics-mgrip-p2-urplus-kit/>.
- [19] “INDUSTRIA ALIMENTARIA Y AGRÍCOLA,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/industrias/alimentación-y-agrícola/>.
- [20] “INDUSTRIA DEL MOBILIARIO Y EL EQUIPAMIENTO,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/industrias/mobiliario-y-equipamiento/>.
- [21] “INDUSTRIA DE LA ELECTRÓNICA Y LA TECNOLOGÍA,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/industrias/electrónica-y-tecnología/>.
- [22] “INDUSTRIA DEL METAL Y EL MECANIZADO,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/industrias/metal-y-mecanizado/>.
- [23] “INDUSTRIA AEROSPAZIAL Y LA AUTOMOCIÓN,” *UNIVERSAL ROBOTS*. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/industrias/automoción-y-subcontratistas/>.
- [24] G. Amaral *et al.*, *Herramientas Manuales*, vol. 369, no. 1. 2013.
- [25] “DESTORNILLADOR.pdf,” *RAE*. [Online]. Available: <https://dle.rae.es/destornillador>.
- [26] “DESTORNILLADOR CAUCHO.pdf,” *Dreamstime*. [Online]. Available: <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-destornillador-rojo-de-la-cruceta-con-las-manijas-de-goma-image67613057>.
- [27] “DESTORNILLADOR PLASTICO.pdf,” *Grainger*. [Online]. Available: <https://www.grainger.com.mx/producto/URREA-Destornillador%2C-Mango-Plástico%2C-Punta-Plana%2C-Tamaño-de-la-Punta-1-4%22%2C-Longitud-Total-7%22%2C-Barra-Cuadrado%2C-Longitud-de-la-Barra-3%22/p/28R011>.
- [28] “DESTORNILLADOR LISO.pdf,” *Gedore*. [Online]. Available: <http://www.gedore.es/Destornillador-plano-con-hexagono-y-mango-de-madera>.
- [29] “DESTORNILLADOR ANTIDERRAPANTE.pdf,” *Promart*. [Online]. Available: <https://www.promart.pe/destornillador-6-en-1-31203/p>.

- [30] “TIPOS DESTORNILLADOR.pdf,” *De Maquinas y Herramientas*. [Online]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-manuales/destornillador>.
- [31] “DESTORNILLADOR EJE HEXAGONAL.pdf,” *DHgate*. [Online]. Available: <https://es.dhgate.com/product/nonslip-handle-hex-shaft-2-7mm-tip-screwdriver/484737667.html>.
- [32] “DESTORNILLADOR PLANO HEXAGONAL.pdf,” *Easy*. [Online]. Available: [https://www.easy.com.co/p/destornillador-3~8%22-x-8%22-plano-69\\_123-imantado/](https://www.easy.com.co/p/destornillador-3~8%22-x-8%22-plano-69_123-imantado/).
- [33] “DESTORNILLADOR PALA HEXAGONAL.pdf,” *HomeCenter*. [Online]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/91833/Destornillador-Pala-38-mm-3-Profesional-Ref-69-102/91833>.
- [34] “DESTORNILLADOR CILINDRICO.pdf,” *Sloky*. [Online]. Available: [https://www.sloky.com.tw/es/product/Mango-Slim-Fit/slim\\_fit\\_handle.html](https://www.sloky.com.tw/es/product/Mango-Slim-Fit/slim_fit_handle.html).
- [35] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 2.pdf,” *EgMaster*. [Online]. Available: <https://www.egamaster.com/>.
- [36] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 3.pdf,” *Wurth*. [Online]. Available: <https://www.wurth.es/herramientas/destornilladores>.
- [37] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 4.pdf,” *Tarifer*. [Online]. Available: <https://tarifer.com/destornilladores/7305-destornillador-mango-ent-boca-torx-t10x100-bahco-901t-7314153023704.html>.
- [38] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 5.pdf,” *Alamy*. [Online]. Available: <https://www.alamy.es/imagenes/herramientas-de-mango-de-madera.html>.
- [39] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 6.pdf,” *Stanley*. [Online]. Available: <https://www.stanleyworks.es/products/detail/Productos/HERRAMIENTAS+MANUALES+/Destornilladores+/Juegos+de+destornilladores+/Juego+de+4+destornilladores+Pozidriv+FATMAX@+con+punta+de+diamante>.
- [40] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 7.pdf,” *Stanley*. [Online]. Available: <https://www.stanleyworks.es/products/detail/Productos/HERRAMIENTAS+MANUALES+/Destornilladores+/Juegos+de+destornilladores+/Juego+6+piezas>.
- [41] “DESTORNILLADOR CILINDRICO 8.pdf,” *HomeCenter*. [Online]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/175811/Destornillador-estrella-ph-2-x-4-pulgadas-QFP0210/175811>.
- [42] “GRIPPER,” *Revista de robots*. [Online]. Available: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/gripper-y-pinzas-para-robots-industriales/>.
- [43] “DEFINICIÓN GRIP,” *RAE*. [Online]. Available: <https://dle.rae.es/agarradera?m=form>.
- [44] “COSTOS PLA.pdf,” *UNIVERSIDAD JAVERIANA*. [Online]. Available: [file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta\\_PLA.pdf](file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta_PLA.pdf).
- [45] “COSTOS ABS.pdf,” *UNIVERSIDAD JAVERIANA*. [Online]. Available: [file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta\\_ABS.pdf](file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta_ABS.pdf).
- [46] “COSTOS RESINA.pdf,” *UNIVERSIDAD JAVERIANA*. [Online]. Available: [file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta\\_Resina.pdf](file:///C:/Users/marin/Downloads/Oferta_Resina.pdf).



- [47] “MATERIAL PLA.pdf,” *HXX*. [Online]. Available: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/#:~:text=Propiedades físicas y mecánicas del,tiene una densidad más baja.>
- [48] “MATERIAL ABS.pdf,” *HXX*. [Online]. Available: <http://hxx.es/2015/03/23/materiales-de-impresion-3d-ii-a-abs-acrilonitrilo-butadieno-estireno/#:~:text=Las grandes propiedades que tiene,y resistencia a la fusión.>
- [49] “MATERIAL RESINA.pdf,” *HXX*. [Online]. Available: <http://hxx.es/2015/04/06/materiales-de-impresion-3d-iii-resinas-fotopolimericas/>.
- [50] “COEFICIENTE PLA.pdf,” *MEXPOLIMEROS*. [Online]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/pla.html>.
- [51] “COEFICIENTE ABS.pdf,” *PROSPECTOR*. [Online]. Available: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>.
- [52] “COEFICIENTE RESINA.pdf,” *INKANTO*. [Online]. Available: [https://es.inkanto.com/sites/default/files/axr7-ficha\\_producto-cinta-resina-cabeza-l-plano-inkanto-espanol-web\\_0.pdf](https://es.inkanto.com/sites/default/files/axr7-ficha_producto-cinta-resina-cabeza-l-plano-inkanto-espanol-web_0.pdf).
- [53] “CARACTERISTICAS PLA Y ABS.pdf,” *IMPRESORAS 3D*. [Online]. Available: <https://www.impresoras3d.com/abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas/>.
- [54] “CARACTERISTICAS RESINA.pdf,” *3D NATIVES*. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>.
- [55] K. Ulrich and S. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 5th ed. 2013.
- [56] L. Basis, *Instruction Manul RobotiQ*, 1st ed. 2019.
- [57] “ROBOT UR3 DE UNIVERSAL ROBOTS.pdf,” *TRACEPARTS*. [Online]. Available: <https://www.traceparts.com/es/product/universal-robots-as-robot-ur3?Product=10-06032017-106400>.
- [58] R. Avila-chaurand, L. Prado, and E. González, *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*, no. May 2015. 2007.
- [59] “ENFERMEDADES LABORALES.pdf,” *ACTUALICESE*.
- [60] “MINISTERIO DE SALUD.pdf,” *MINISTERIO DE SALUD*. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VP/DOA/RL/Aseguramiento en riesgos laborales.pdf>.
- [61] “COSTO ROBOT UR3.pdf,” *ALIBABA*. [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/universal-ur3-ur3e-industrial-robots-60787484502.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.463536f6E0C2QV>.
- [62] “COSTO GRIPPER.pdf,” *ALIBABA*. [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/robot-arm-gripper-2f-85-and-2f-140-payload-5kg-adaptive-gripper-for-collaborative-robots-and-all-applications-62476392006.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1e417805CC42Pj>.
- [63] “IMPRESORA 3D UNIVERSIDAD JAVERIANA.pdf,” *FUSED FORM*. [Online]. Available: <https://fusedformcorp.com/impresoras-3d/impresora-3d-doble-extrusor-ffstd/>.