



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos

Expresión Gráfica en la Ingeniería

TRABAJO FIN DE GRADO

**MEJORA DEL BIENESTAR DE LOS TRABAJADORES EN LAS
OPERACIONES DE ENSAMBLAJE MANUAL DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS MEDIANTE SOLUCIONES ERGONÓMICAS Y LA
INTEGRACIÓN DE LA INDUSTRIA 5.0**

Grado en

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Elena Ramírez de Arellano Gómez

Tutor: Francisca José Castillo Rueda

Cotutor

MÁLAGA, Julio de 2025

Resumen

A medida que la industria automovilística pasa de los vehículos de combustión a los eléctricos, ha aumentado la importancia del ensamblaje de mazos de cables en la fabricación. Este proyecto aborda los retos ergonómicos a los que se enfrentan los trabajadores durante el ensamblaje de mazos de cables en la estación de parachoques de una fábrica de vehículos eléctricos. La principal preocupación es el esfuerzo físico necesario para colocar los clips que fijan el mazo de cables al parachoques, lo que conlleva un riesgo de trastornos musculoesqueléticos (TME) entre los trabajadores.

El análisis inicial consistió en desglosar las tareas de montaje y preparar la estación de trabajo con equipos de captura de movimiento y sensores de fuerza. Los participantes realizaron las tareas y se registraron sus movimientos y esfuerzos. Las evaluaciones ergonómicas realizadas con los métodos HARM, HandPak y RULA pusieron de manifiesto la existencia de riesgos significativos, lo que planteó la necesidad de introducir mejoras.

El rediseño de los clips para reducir el esfuerzo físico fue un objetivo clave, con resultados iniciales prometedores. Además, se integraron elementos de la Industria 5.0 mediante el diseño de un clip específico para su uso con robots colaborativos (cobots), con el objetivo de mejorar la productividad y reducir la incomodidad de los trabajadores.

Las herramientas de modelado humano digital (DHM) y la tecnología de captura del movimiento desempeñaron un papel crucial en la evaluación de los nuevos diseños y la simulación de diferentes escenarios. A pesar de las dificultades encontradas, como los problemas con los materiales de impresión 3D, el proyecto demostró con éxito las posibles mejoras ergonómicas y las ventajas de la asistencia robótica.

En conclusión, este proyecto pone de relieve la necesidad de tener en cuenta consideraciones ergonómicas en los procesos de fabricación para prevenir los TME, mejorar el bienestar de los trabajadores y aumentar la productividad. La combinación de clips rediseñados e integración robótica ofrece una vía hacia procesos de montaje más seguros y eficientes en la industria de vehículos eléctricos.

Palabras clave: Ergonomía, Vehículos eléctricos, Proceso de ensamblaje de mazos de cables, Trastornos musculoesqueléticos (TME), Bienestar del trabajador, Colaboración humano-robot, Captura de movimiento, Método HARM, HandPak, Método RULA, Evaluación ergonómica, Sensores de fuerza, Rediseño de clips.

Abstract

As the automotive industry shifts from combustion vehicles to electric vehicles, the importance of wire harness assembly in manufacturing has increased. This project addresses the ergonomic challenges faced by workers during the wire harness assembly at the bumper station of an electric vehicle factory. The primary concern is the physical strain required to apply clips, leading to a risk of musculoskeletal disorders (MSDs) among workers.

The initial analysis involved breaking down the assembly tasks and preparing the workstation with motion capture equipment and force sensors. Participants performed the tasks, and their movements and exertions were recorded. Ergonomic evaluations using HARM, HandPak, and RULA methods highlighted significant risks, prompting the need for improvements.

Redesigning the clips to reduce physical effort was a key focus, with promising initial results. Additionally, elements of Industry 5.0 were integrated by designing a clip specifically for use with collaborative robots (cobots), aiming to enhance productivity and reduce worker discomfort.

Digital Human Modelling (DHM) tools and motion capture technology played a crucial role in evaluating the new designs and simulating different scenarios. Although challenges were encountered, such as issues with 3D printing materials, the project successfully demonstrated potential ergonomic improvements and the benefits of robotic assistance.

In conclusion, this project highlights the need for ergonomic considerations in manufacturing processes to prevent MSDs, improve worker well-being, and increase productivity. The combination of redesigned clips and robotic integration offers a pathway to safer and more efficient assembly processes in the electric vehicle industry.

Keywords: Ergonomics, Electric Vehicles, Wire Harness Assembly process, Musculoskeletal Disorders (MSDs), Worker Well-being, Human-Robot Collaboration, Motion Capture, HARM Method, HandPak, RULA Method, Ergonomic Evaluation, Force Sensors, Clip Redesign.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	2
Abstract	3
Tabla de Contenidos.....	4
Índice de Ilustraciones	6
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Planteamiento del problema	10
1.3 Objetivos	11
1.4 Estrategia	11
1.5 Limitaciones	12
2 Teoría.....	13
2.1 Trastorno musculoesquelético	13
2.2 Ergonomía.....	14
2.3 Métodos de Evaluación Ergonómica	14
2.3.1 RULA	15
2.3.2 HARM.....	15
2.3.3 HANDPAK.....	15
2.4 Diversidad Antropométrica.....	16
2.5 Modelado Digital Humano (DHM)	16
2.6 Sistemas de Captura de Movimiento.....	17
2.7 Industria 5.0.....	18
2.8 Colaboración Humano Robot.....	19
3 Selección de Métodos	20
3.1 Métodos de Evaluación Ergonómica	20
3.2 Enfoque de Diseño	21
4 Análisis Inicial	24
4.1 Observación Estación del Parachoques	25
4.1.1 Clip Plano	25
4.1.2 Clip Circular.....	25
4.2 Captura de movimiento	26
4.3 Software DHM.....	30

4.4	Sensor de Fuerza.....	32
4.5	Medición de la Fuerza Real Aplicada	34
4.6	HARM.....	35
4.7	RULA.....	37
4.8	HandPak.....	38
5	Requisitos de Diseño	41
6	Diseño.....	45
6.1	Lluvia de Ideas.....	45
6.2	Bocetos.....	47
6.3	Generación de Conceptos.....	48
6.3.1	Clip plano	49
6.3.2	Clip Circular.....	50
6.3.3	Clip Colaboración Humano – Robot	51
6.4	Evaluación de Diseños.....	53
6.5	Diseño Asistido Por Ordenador (CAD)	56
6.5.1	Clip plano	56
6.5.2	Clip Circular.....	58
6.5.3	Clip Colaboración Humano – Robot	61
6.6	Prototipos	63
7	Concepto Final.....	64
7.1	Clips Planos	64
7.2	Clips Circulares	64
7.3	Clips Colaboración Humano – Robot	65
7.4	Mejor Solución : Clips Colaboración Humano Robot.....	66
8	Planos	66
9	Presupuesto.....	67
10	Discusión y Conclusión	69
11	Trabajo Futuro.....	71
12	Referencias.....	72
	Anexo 1.....	77
	Anexo 2.....	78
	Resultados de la Evaluación Ergonómica RULA	78
	Anexo 3.....	86
	Clip Plano.....	86

Clip Circular	87
Clip Colaboración Humano-Robot.....	87

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Estación de Montaje del Parachoques. Fuente: Elaboración Propia.	10
Ilustración 2: Diagrama de Flujo del Proyecto. Fuente: Elaboración Propia.....	12
Ilustración 3: Selección de Métodos. Fuente: Elaboración Propia.....	20
Ilustración 4: Diagrama de Flujo Análisis Inicial. Fuente: Elaboración Propia.....	24
Ilustración 5: Estación del Parachoques. Fuente: Elaboración Propia.	25
Ilustración 6: Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	25
Ilustración 7: Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	26
Ilustración 8: Correas, Camiseta, Cinta de Cabeza, Sensores y antena del sistema Xsens MVN Awinda.	26
Ilustración 9: Captura y representación del movimiento humano mediante el sistema Xsens MVN Awinda.....	26
Ilustración 10: Manus Xsens Metagloves. Fuente: shop.movella.com y Elaboración Propia.	27
Ilustración 11: El sistema Xsens MVN Awinda sin y con los Metagloves Manus Xsens. Fuente: Elaboración Propia.	28
Ilustración 12: Participante Caso 1 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	28
Ilustración 13: Participante Caso 2 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Ilustración 14: Participante Caso 3 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Ilustración 15: Participante Caso 4 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Ilustración 16: Participantes Casos 2 y 4 comprobando si el clip está correctamente colocado para liberar la fuerza. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Ilustración 17: Maniqués de los participantes en el software IPS IMMA. Fuente: Elaboración Propia.	30
Ilustración 18: Caso 1 colocación de clip plano y circular. Fuente: Elaboración Propia.....	31
Ilustración 19: Caso 2 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.....	31
Ilustración 20: Caso 3 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.....	31
Ilustración 21: Caso 4 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.....	31
Ilustración 22: Sensor de fuerza Loadpad y un participante usándolo. Fuente: Elaboración Propia. ..	32
Ilustración 23: Gráficos de Fuerza Caso 1 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.....	33
Ilustración 24: Gráficos de Fuerza Caso 1 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	33
Ilustración 25: Gráficos de Fuerza Caso 2 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.....	33
Ilustración 26: Gráficos de Fuerza Caso 2 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	33
Ilustración 27: Gráficos de Fuerza Caso 3 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.....	33
Ilustración 28: Gráficos de Fuerza Caso 3 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	33
Ilustración 29: Gráficos de Fuerza Caso 4 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.....	34
Ilustración 30: Gráficos de Fuerza Caso 4 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	34
Ilustración 31: Utensilios usados en la medición. Fuente: Elaboración Propia.....	34
Ilustración 32: Realización de la medición. Fuente: Elaboración Propia.....	35
Ilustración 33: Evaluación HARM Caso 1 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.	36

Ilustración 34: Evaluación HARM Caso 1 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	36
Ilustración 35: Evaluación HARM Caso 2 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.	36
Ilustración 36: Evaluación HARM Caso 2 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Ilustración 37: Evaluación HARM Caso 3 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	37
Ilustración 38: Evaluación HARM Caso 3 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Ilustración 39: Evaluación HARM Caso 4 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	37
Ilustración 40: Evaluación HARM Caso 4 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Ilustración 41: Evaluación RULA Caso 1 Colocando el Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	38
Ilustración 42: Entradas y salidas comunes Software HandPak. Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak.....	39
Ilustración 43: Software de empuje de pulgares HandPak. Fuente: Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak.....	39
Ilustración 44: Evaluación HandPak. Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak	40
Ilustración 45: Bocetos Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.	48
Ilustración 46: Bocetos Clip Colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.	48
Ilustración 47: Concepto 1 y 2 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	49
Ilustración 48: Concepto 3 y 4 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	49
Ilustración 49: Concepto 5 y 6 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.	50
Ilustración 50: : Concepto 1 y 2 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	50
Ilustración 51: Concepto 3 y 4 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	51
Ilustración 52: Concepto 5 y 6 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.	51
Ilustración 53: Concepto 1 y 2 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.....	52
Ilustración 54: Concepto 3 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.	52
Ilustración 55: Concepto 4 y 5 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.....	52
Ilustración 56: Concepto 6 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.	53
Ilustración 57: Concepto 1 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.....	57
Ilustración 58: Concepto 2 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.....	57
Ilustración 59: Concepto 3 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.....	58
Ilustración 60: Concepto 1 exterior e Indicador interior Idea inicial. Fuente: Elaboración propia.....	58
Ilustración 61: Concepto 1 Clip Individual. Fuente: Elaboración propia.	58
Ilustración 62: Concepto 1 Clip Modular. Fuente: Elaboración propia.	59
Ilustración 63: Concepto 1 Medio Cilindro. Fuente: Elaboración propia.....	59
Ilustración 64: Concepto 2 Clip Circular. Fuente: Elaboración propia.....	60
Ilustración 65: oncepto 5 Clip Circular. Fuente: Elaboración propia.....	60
Ilustración 66: Concepto 1 Clip Colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración propia.....	61
Ilustración 67 QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.	61
Ilustración 68: Concepto 4 Clip Colaboración Humano-Robot y QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.	62
Ilustración 69: Concepto 5 Clip Colaboración Humano-Robot y QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.	62
Ilustración 70: Concepto 1 Clip circular, con todo el cilindro de indicador y luego con el medio cilindro. Fuente: Elaboración propia.	63
Ilustración 71: Concepto 2, finalmente elegido como mejor diseño para el clip plano. Fuente: Elaboración propia.	64

Ilustración 72: Concepto 1, finalmente elegido como mejor solución para el clip circular. Fuente: Elaboración propia.	65
Ilustración 73: Concepto 1 y 4, finalmente elegidos como mejores soluciones para la colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración propia.	65

Índice de Tablas

Tabla 1: Medidas de los Participantes en el Análisis Inicial	27
Tabla 2: Requisitos de diseño, clips para el bienestar de los trabajadores.....	41
Tabla 3: Requisitos de diseño, clips para la colaboración humano - robot.....	43
Tabla 4: Matriz Pugh Clip Plano.....	53
Tabla 5: Matriz Pugh Clip Circular	54
Tabla 6: Matriz Pugh Clip colaboración Humano - Robot	55
Tabla 7: Criterios de Estimación	67
Tabla 8: Estimación de Tiempos y Costes.....	67

1 Introducción

Este capítulo presenta los antecedentes, el propósito y problema del que trata esta tesis, especificando los objetivos en los que se enfoca y por último presentando un resumen de los próximos capítulos que se desarrollan a lo largo de la tesis.

1.1 Antecedentes

En el contexto actual de la industria automovilística, la creciente demanda de vehículos eléctricos ha impulsado el desarrollo de nuevos procesos de fabricación (Ding et al., 2017). Los vehículos eléctricos han aportado grandes avances a la industria, contribuyendo a la sostenibilidad del planeta (Ding et al., 2017). Para conseguirlo la industria ha optado por la utilización de mazos de cable los cuales recorren todo el vehículo. Un mazo de cable es un conjunto de cables y conectores que se consolidan en una sola pieza, lo que facilita y simplifica la instalación, ya que en lugar de tener que lidiar con varios cables individuales se utiliza una única unidad que los contiene, permitiendo así una instalación directa (Nguyen & Yoon, 2021). Además, el mazo de cable asegura los cables de manera más efectiva contra problemas como vibraciones, desgaste por fricción y exposición a la humedad (Nguyen & Yoon, 2021). Como se ha mencionado anteriormente, el mazo de cable tiene una instalación mas sencilla y directa que si se tuvieran que conectar varios cables individuales, pero el proceso de ensamblaje del mazo de cable al parachoques de un vehículo eléctrico sigue siendo un proceso complejo y que consume mucho tiempo, ya que tiene un gran número de conexiones eléctricas difíciles de colocar (Navas-Reascos et al., 2022).

Durante el montaje de un vehículo eléctrico, centrándonos específicamente en la estación de montaje del parachoques, existen riesgos de baja productividad y mala ergonomía (Navas-Reascos et al., 2022). Este proceso incluye el ensamblaje de clips y cableado eléctrico, en el que los operarios deben ejercer grandes fuerzas con las manos para enganchar los numerosos clips de un mismo parachoques, ya que estos no tienen un diseño rápido y fácil de poner, hay que hacer demasiado esfuerzo para que el clip se quede en su sitio. Esta tarea es repetida muchas veces a lo largo del día, lo que puede provocar trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (Sugiono et al., 2018). Además, la falta de comodidad que los operarios sufren durante la jornada laboral, teniendo que realizar mucho esfuerzo y por ello posturas corporales insanas, puede afectar a la productividad, con la consiguiente pérdida de beneficios para la empresa. Estas cuestiones pueden ser atribuidas a una mala ergonomía en el ensamblaje de clips y cableado eléctrico en el parachoques.

Aparte de los problemas de ergonomía y productividad que surgen en relación con el operario, las empresas manufactureras necesitan mejorar su competitividad y su rentabilidad, al menos seguir siendo competitivas, lo que requiere sistemas de producción más flexibles y eficientes que tengan en cuenta el bienestar del trabajador (Gualtieri et al., 2019). Esto significa implementar sistemas que puedan manejar diferentes tamaños de lotes, variaciones y reducir el tiempo de comercialización y también significa garantizar el bienestar de los trabajadores. En este sentido, es crucial evaluar si la automatización es la solución óptima para mejorar el proceso en cuestión, o si otras alternativas como el rediseño de estaciones, cambios en los clips utilizados o la incorporación de herramientas que asistan al operador podrían ser más efectivas. Además, es posible que una combinación de estas soluciones resulte ser la mejor estrategia para optimizar el proceso y alcanzar los objetivos de flexibilidad y eficiencia deseados.

1.2 Planteamiento del problema

El proceso de ensamblaje de vehículos eléctricos, en particular en la estación de ensamblaje de parachoques que puede verse en la *Ilustración 1*, se enfrenta a varios problemas importantes, principalmente relacionados con la productividad y la ergonomía. Los trabajadores tienen que ejercer una fuerza considerable para fijar múltiples clips que sujetan los mazos de cables de un mismo parachoques. El diseño de estos clips no facilita su instalación, lo que hace que la tarea sea físicamente exigente. Esta actividad repetitiva y que requiere mucha fuerza, realizada durante toda la jornada laboral, puede provocar trastornos musculoesqueléticos y malestar entre los trabajadores.

Además, el proceso de ensamblaje de los mazos de cables es complejo y requiere mucho tiempo debido a las numerosas conexiones eléctricas que hay que asegurar. Esta complejidad, unida a los problemas ergonómicos, reduce la productividad global y puede acarrear pérdidas económicas para la empresa. Las empresas manufactureras necesitan mejorar sus sistemas de producción para que sean más flexibles y eficientes, garantizando que sigan siendo competitivas al tiempo que tienen en cuenta el bienestar de los trabajadores.

En esencia, los retos identificados subrayan la necesidad de un enfoque holístico de la optimización de la producción que armonice los avances tecnológicos con los principios del diseño centrado en el ser humano. Abordar estos retos requiere una reevaluación estratégica de los procesos existentes y la aplicación de soluciones innovadoras que no sólo aumenten la productividad y la eficiencia operativa, sino que también den prioridad a la salud y el bienestar de los trabajadores. Este cambio hacia un enfoque más equilibrado e integrador de la fabricación es esencial para impulsar la competitividad en el dinámico panorama industrial actual.

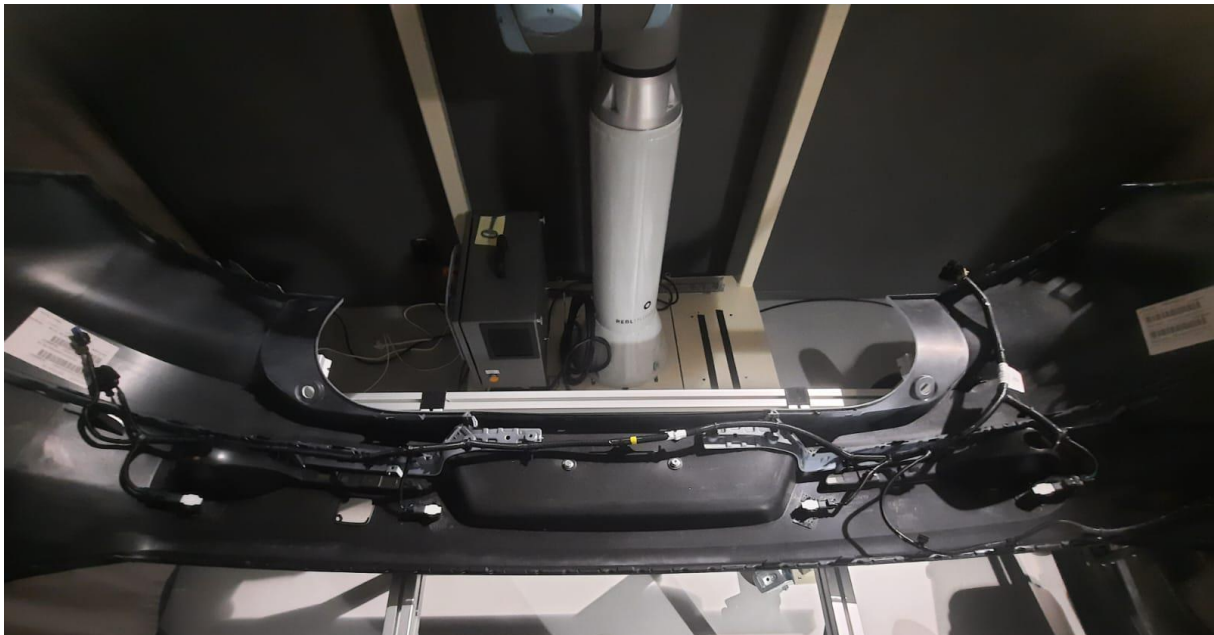


Ilustración 1: Estación de Montaje del Parachoques. Fuente: Elaboración Propia.

1.3 Objetivos

- Evaluar las condiciones ergonómicas iniciales de la estación de montaje del parachoques para determinar el actual riesgo de lesiones, con un particular énfasis en el diseño y su impacto en la seguridad y la salud de los trabajadores.
- Analizar la estación y rediseñar los clips del mazo de cables desde una perspectiva ergonómica y sugerir mejoras.
- Incorporar elementos de la Industria 5.0 para promover la colaboración entre las personas y la tecnología, buscando un equilibrio óptimo entre la automatización y las habilidades humanas con un enfoque en el diseño.

1.4 Estrategia

La estrategia de este proyecto está basada en el método de diseño del “Doble Diamante”. Este método esta representado por dos “diamantes”, cada uno con dos fases (*Design Council, 2024*). La primera fase, “Descubrimiento”, implica comprender a fondo el problema, centrándose en la investigación, la observación y la recopilación de información, con lo que se obtiene una comprensión profunda de las necesidades del usuario, las especificaciones del proyecto y el contexto en el que se sitúa el problema. La segunda fase, «Definición», consiste en analizar y sintetizar la información para identificar las cuestiones clave y definir los objetivos del diseño. La tercera fase, «Desarrollo», consiste en generar una amplia gama de ideas y soluciones para abordar los problemas definidos en la fase anterior. Y, por último, la fase de «Entrega», donde se seleccionan las mejores ideas y se desarrollan hasta convertirlas en soluciones concretas.

La forma de diamante representa la divergencia y la convergencia durante el proceso de diseño (*Design Council, 2024*). Con divergencia se refiere a la exploración de las múltiples opciones y convergencia a la selección de la mejor solución. Por ejemplo, en la fase de descubrimiento, el diamante se ensancha simbolizando la exploración y expansión de ideas, terminando por estrecharse en la fase de definición, lo que indica la convergencia hacia una solución específica.

Para un mejor entendimiento de la estrategia y/o del proceso de diseño, se ha usado un diagrama de flujo donde el método del doble diamante esta representado. Un diagrama de flujo es una representación gráfica de un proceso o algoritmo, que muestra las diferentes etapas o pasos del proceso y la secuencia en la que se producen (Chapin, 2003).

En la *Ilustración 2*, está representado el proceso de diseño, donde la fase inicial “Descubrimiento” esta detallada con las etapas de teoría y selección de métodos, Esta fase implica divergencia, n la que se generan muchas ideas y se exploran varias perspectivas, representadas por el ensanchamiento del diamante, como se ha explicado anteriormente.

El primer diamante se cierra con la fase de "Definición", en la que se realiza un análisis inicial del diseño actual de la estación. Aquí se evalúa el diseño existente y se converge hacia los requisitos de diseño, que definen los aspectos a considerar en el futuro diseño. La siguiente fase, "Desarrollo del diseño", vuelve a ensanchar el diamante. Aquí se incluyen las fases de brainstorming y bocetar, que generan una serie de ideas y opciones para la solución.

Por último, el proceso de diseño se cierra con la fase de "Entrega", que incluye las etapas de generación de conceptos, evaluación del diseño y selección del diseño. Aquí se llega a una solución final y concreta tras evaluar y seleccionar entre las distintas opciones generadas durante el proceso.

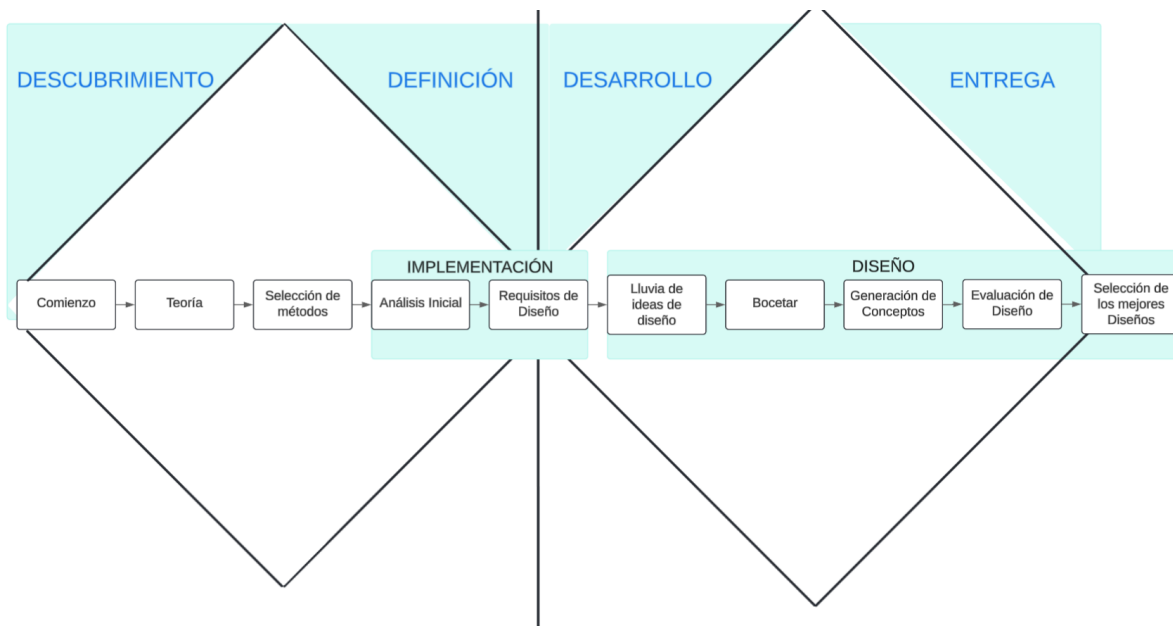


Ilustración 2: Diagrama de Flujo del Proyecto. Fuente: Elaboración Propia.

1.5 Limitaciones

Este proyecto se ha centrado exclusivamente en el rediseño de los clips utilizados en la estación que fijan el mazo de cables al parachoques. Se ha establecido que no se ha intervenido en el rediseño ni de la estación en sí ni del propio parachoques. Se ha definido que los tipos de clips, en este caso dos tipos, el clip plano y el clip circular, no se pueden mezclar a la hora de rediseñar porque esto implicaría el rediseño del propio parachoques. De este modo, se aclara el alcance del proyecto y qué aspectos se han incluido.

Una limitación clave de este proyecto es que se centra solamente en la ergonomía física, omitiendo la evaluación de la ergonomía cognitiva. Este enfoque es justificado por la necesidad de mejorar las condiciones físicas de los trabajadores durante el proceso de colocación de los clips en el parachoques, sin tener en cuenta aspectos relacionados con la carga mental, la percepción y la toma de decisiones. Las mejoras propuestas se centran en optimizar la postura, el movimiento y la fuerza física para promover la salud y la seguridad de los trabajadores.

2 Teoría

Esta sección proporciona un marco teórico, explorando conceptos como los trastornos musculoesqueléticos, la ergonomía, la diversidad antropométrica, la Industria 5.0 (*Industry 5.0 - European Commission, 2022*) y la colaboración humano-robot, y también herramientas como los métodos de evaluación ergonómica, el modelado humano digital (DHM) y los sistemas de captura del movimiento. Estos conceptos y herramientas apoyan el proceso de investigación, proporcionando estabilidad y orientación en la selección de métodos y soluciones adecuados.

2.1 Trastorno musculoesquelético

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) son enfermedades que afectan al sistema musculoesquelético, incluidos los músculos, los nervios, los tendones, el esqueleto, las articulaciones y el sistema vascular (EU-OSHA, 2022). Los TME se manifiestan en forma de dolor crónico o agudo, que provoca limitaciones funcionales y discapacidad potencialmente permanente, lo que puede tener un impacto significativo en la productividad y la calidad de vida.

El proceso de ensamblaje de mazos de cables, una etapa crítica en varias industrias, plantea riesgos significativos para la salud de los trabajadores, en particular trastornos musculoesqueléticos (Sugiono et al., 2018). Estos trastornos, que suelen desarrollarse gradualmente con el tiempo, se atribuyen a diversos factores, como largas jornadas laborales, cargas de trabajo excesivas, tareas repetitivas, malas posturas y una nutrición e hidratación inadecuadas. Para hacer frente a estos riesgos, a menudo se utilizan enfoques ergonómicos para mejorar la seguridad de los trabajadores durante las operaciones de montaje, en particular cuando se colocan clips en piezas de automóviles.

Las partes del cuerpo más vulnerables para los trabajadores de las cadenas de montaje son los hombros, el cuello, las manos y los gemelos, ya que soportan el peso de las tareas repetitivas y el esfuerzo prolongado (Sugiono et al., 2018). El dolor y las molestias, que pueden alcanzar niveles graves, están causados principalmente por la flexión frecuente del cuello y la espalda, y la tensión prolongada en los gemelos por estar de pie durante mucho tiempo.

La Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo realizó un estudio entre 2005 y 2015 que destacaba la importancia de los movimientos repetitivos de manos y brazos como factor de riesgo principal (EU-OSHA, 2022). También existen otros estudios, como el presentado por el Departamento de Medicina del Trabajo y Medio Ambiente, que sugieren establecer niveles de acción aceptables, por encima de los cuales se producirían trastornos musculoesqueléticos (Arvidsson et al., 2021). Estos niveles de acción son en términos de carga física de trabajo, con énfasis en posturas correctas de trabajo, velocidades de movimiento y cargas musculares, monitoreadas por equipos portátiles. Muchos estudios como el presentado por (Sugiono et al., 2018) investigan e intentan reducir los trastornos musculoesqueléticos en el proceso de ensamblaje de mazos de cables utilizando métodos de evaluación ergonómica, demostrando así que las consideraciones ergonómicas son la solución para mejorar los trastornos musculoesqueléticos en el lugar de trabajo (Sugiono et al., 2018).

En conclusión, abordar los TME en el ensamblaje de mazos de cables y otros trabajos físicamente exigentes requiere un enfoque global que integre prácticas ergonómicas y la gestión de la carga de

trabajo físico para salvaguardar la salud de los trabajadores y mejorar el bienestar general en el trabajo.

2.2 Ergonomía

La Asociación Internacional de Ergonomía y Factores Humanos (IEA) definió en 2000 que «la ergonomía es la disciplina científica que se ocupa de comprender las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema, y la profesión que aplica teorías, principios, datos y métodos al diseño para optimizar el bienestar humano y el rendimiento general del sistema» (International Ergonomics Association, 2024). La IEA dice también que la ergonomía se divide en tres dominios diferentes: ergonomía física, ergonomía cognitiva y ergonomía organizativa (International Ergonomics Association, 2024). Este proyecto se ha centrado en la ergonomía física. Según la IEA, «la ergonomía física se ocupa de las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas del ser humano en relación con la actividad física. (Entre los temas relevantes se incluyen las posturas de trabajo, la manipulación de materiales, los movimientos repetitivos, los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo, la disposición del lugar de trabajo, la salud física y la seguridad)».

La ergonomía desempeña un papel fundamental en la optimización de los sistemas de producción, garantizando que todos sus componentes funcionen juntos de la forma más fluida y eficiente posible (Berlin & Adams, 2017). Cuando las personas forman parte del sistema de producción, aportan flexibilidad, innovación y capacidad para resolver problemas, pero también corren el riesgo de desarrollar trastornos musculoesqueléticos (TME) relacionados con el trabajo como consecuencia del esfuerzo físico. El objetivo de la ergonomía de la producción es, por tanto, diseñar un lugar de trabajo que elimine el riesgo de TME. Además, la ergonomía es crucial en el desarrollo de productos, ya que garantiza que éstos se diseñen teniendo en cuenta la comodidad, seguridad y eficiencia del usuario. Este enfoque no sólo aumenta la satisfacción del usuario y reduce la probabilidad de lesiones, sino que también contribuye al éxito general y a la competitividad del producto en el mercado.

En resumen, la integración de los principios ergonómicos tanto en los sistemas de producción como en los procesos de desarrollo de productos ayuda a reducir el riesgo de TME entre los operarios. Un enfoque proactivo de la ergonomía se caracteriza por la incorporación de conocimientos ergonómicos en las primeras fases de planificación, con un fuerte enfoque en la salud de los trabajadores (Berlin & Adams, 2017). Por el contrario, muchas empresas adoptan un enfoque reactivo de la ergonomía, tratando de resolver los problemas mediante el tratamiento de los síntomas en lugar de la causa del problema, que luego se convierte en un riesgo para otros trabajadores.

2.3 Métodos de Evaluación Ergonómica

Para medir y evaluar el dolor y la incomodidad que pueden experimentar los operarios, los ergónomos suelen llevar a cabo una serie de métodos de evaluación ergonómica (David, 2005). Estos métodos de evaluación ergonómica pueden clasificarse en tres tipos: autoinformes, métodos observacionales y métodos de medición directa.

Los métodos observacionales se utilizan ampliamente en la evaluación de riesgos laborales porque son accesibles, fáciles de usar, flexibles y no interfieren en las actividades de los trabajadores (Kee, 2021). Aunque nunca se sabe con certeza cuál de estos métodos es el más adecuado, hay algunos que son los

más utilizados y conocidos, como el Sistema de Análisis de la Postura de Trabajo Ovako (OWAS) (Karhu et al., 1977), la Evaluación Rápida de las Extremidades Superiores (RULA) (McAtamney & Nigel Corlett, 1993), y la Evaluación Rápida de Todo el Cuerpo (REBA) (Hignett & McAtamney, 2000). Estos tres métodos han sido ampliamente estudiados y aplicados en diversos sectores industriales debido a su capacidad para identificar los factores de riesgo ergonómicos asociados a los trastornos musculoesqueléticos (TME). También existen otros métodos menos comunes que pueden ser útiles y provechosos, por ejemplo, Sugiono et al. (2018) explican en su artículo cómo reducir los trastornos musculoesqueléticos utilizando métodos ergonómicos, nombrando todos los métodos más conocidos que existen, pero centrándose finalmente en el método WARE (Sugiono et al., 2018). Este método es especialmente adecuado para el tipo de trabajo que se realiza en las empresas de ensamblaje de mazos de cables, que implica estar de pie, transportar cargas, ensamblar, realizar trabajos repetitivos y agacharse. Los resultados de la investigación recomendaron un rediseño de los puestos de trabajo.

En el campo de la ergonomía ocupacional, la evaluación de los riesgos ergonómicos asociados a las tareas manuales es de suma importancia para garantizar la salud y la seguridad de los trabajadores. Dos métodos muy utilizados en este ámbito son el método de evaluación de riesgos mano-brazo (HARM) (Douwes & de Kraker, 2012) y el método HandPak (Johnson & Nussbaum, 2003).

2.3.1 RULA

El método RULA se utiliza para evaluar la carga ergonómica asociada a movimientos repetitivos y posturas forzadas de la parte superior del cuerpo (McAtamney & Nigel Corlett, 1993). Se centra en la evaluación de la postura del cuello, el tronco y las extremidades superiores durante tareas específicas. El RULA se basa en la observación directa de los trabajadores y en la asignación de puntuaciones basadas en la posición de las articulaciones y en el esfuerzo necesario para mantener dichas posiciones. Estas puntuaciones se utilizan para calcular una puntuación total, que se traduce en un nivel de riesgo ergonómico. Los niveles de riesgo identificados por RULA van de bajo a alto, lo que permite a los evaluadores priorizar las acciones de mejora ergonómica.

2.3.2 HARM

HARM se utiliza para evaluar el riesgo ergonómico asociado a las tareas manuales que implican movimientos repetitivos de manos y brazos (Douwes & de Kraker, 2012). HARM se basa en la observación directa de los trabajadores y la evaluación de factores como la frecuencia y la duración de los movimientos, así como la fuerza aplicada y la postura de las manos y los brazos. Se utilizan tablas de puntuación específicas para asignar niveles de riesgo basados en estos factores. Estos niveles de riesgo ayudan a identificar las áreas problemáticas y a orientar las intervenciones ergonómicas para reducir el riesgo de lesiones musculoesqueléticas.

2.3.3 HANDPAK

El método HandPak (Johnson & Nussbaum, 2003) es un paquete de software diseñado para determinar las fuerzas y los pares aceptables recomendados para una amplia variedad de tareas manuales que requieren un uso intensivo de las manos y que son habituales en el lugar de trabajo. Estas directrices son valiosas para los interesados en una evaluación basada en pruebas de los diseños de las tareas y la determinación del riesgo de lesiones asociado a tareas con diferentes agarres, posturas, frecuencias, duraciones y requisitos de esfuerzo. HandPak integra un amplio corpus de investigaciones científicas

publicadas en la literatura y permite a los usuarios introducir datos específicos de la tarea para calcular los niveles de riesgo asociados a diferentes escenarios de trabajo manual. Esto facilita la identificación de áreas problemáticas y la aplicación de medidas preventivas para proteger la salud y la seguridad de los trabajadores.

Tras investigar un poco más sobre estos métodos concretos, en este proyecto se utiliza el método HARM y el Handpak para evaluar la ergonomía en las manos del operario y, entre OWAS, RULA y REBA a lo largo del proyecto, se decidió cuál era el más adecuado o incluso si utilizar más de uno para asegurarse de que se ha evaluado de la mejor manera posible.

2.4 Diversidad Antropométrica

La antropometría, derivada del griego «Anthropos» que significa humano y «metros» que significa medida, es la ciencia que estudia las medidas del cuerpo humano (Oxford English Dictionary, 2024). A lo largo de los siglos, esta disciplina ha despertado un gran interés debido a las singulares variaciones en el tamaño y las proporciones del cuerpo humano entre individuos, poblaciones, géneros y nacionalidades. Es esencial tener en cuenta estas diferencias a la hora de diseñar entornos y equipos de trabajo, especialmente en un contexto internacional (Berlin & Adams, 2017).

La noción de persona «media» no es relevante para el diseño de lugares de trabajo y equipos, ya que las diferencias biológicas entre individuos hacen imposible satisfacer las necesidades de una persona estándar (Berlin & Adams, 2017). Por lo tanto, es esencial diseñar para una amplia gama de tamaños y formas corporales para dar cabida a la diversidad de usuarios. Esto implica seleccionar tamaños adecuados para diferentes aspectos del diseño, teniendo en cuenta las variaciones antropométricas, para maximizar la utilidad y el valor para la mayoría de la población.

Los estudios demuestran que la práctica del sector suele basarse en enfoques aproximados a la hora de considerar la diversidad antropométrica (Brolin et al., 2012). Esto puede dar lugar a diseños que no satisfagan adecuadamente las necesidades de la población destinataria. Es importante reconocer esta variabilidad y utilizar métodos adecuados para incorporarla al diseño. Dos enfoques comunes son el método del caso límite y el método del caso distribuido, que permiten considerar la diversidad antropométrica de forma más eficaz en el diseño de productos y lugares de trabajo. Por lo tanto, en este proyecto se ha tenido en cuenta la diversidad antropométrica de hombres y mujeres a la hora de evaluar el dolor y la incomodidad que puede experimentar un operario al realizar el proceso de ensamblaje del mazo de cables en el parachoques de un vehículo eléctrico.

2.5 Modelado Digital Humano (DHM)

La implantación de herramientas de modelado humano ha permitido realizar evaluaciones ergonómicas en entornos virtuales, reduciendo la necesidad de realizar pruebas físicas (Hanson et al., 2006). Estas herramientas, conocidas como DHM, se utilizan ampliamente en la industria del automóvil tanto para el desarrollo de productos como para los procesos de producción (Lämkkull et al. Zdrodowski et al., 2020). Los desarrolladores, evaluadores y usuarios de estas herramientas afirman que pueden reducir considerablemente el tiempo y los costes de desarrollo. También permiten realizar pruebas rápidas para verificar los diseños iniciales y acelerar la fase de diseño (Hanson et al., 2006). Así, estas herramientas pueden simular una gran variedad de movimientos humanos, desde acciones sencillas como caminar hasta movimientos más complejos como correr o sentarse, lo que permite a los

diseñadores evaluar el comportamiento de un producto en el mundo real y realizar los ajustes necesarios. Además, estas herramientas realizan análisis ergonómicos detallados para evaluar la comodidad y seguridad del diseño en relación con la anatomía humana, lo que resulta crucial en el diseño de productos industriales, muebles, automóviles y equipamiento deportivo, mejorando la experiencia del usuario y previniendo lesiones. Al facilitar unas pruebas rápidas y precisas, estas herramientas ayudan a los diseñadores a detectar y corregir los problemas de diseño en una fase temprana del proceso de desarrollo del producto, lo que reduce las costosas modificaciones en fases posteriores y acelera el plazo de comercialización.

El software DHM incluye un modelo humano digital, también conocido como maniquí, que es una representación digital editable de un ser humano (Brolin et al., 2012). La antropometría, el estudio de las medidas humanas, desempeña un papel fundamental en estos programas informáticos de DHM, ya que garantiza el nivel de ajuste esperado en las simulaciones y los análisis ergonómicos. En estas herramientas, los modelos humanos pueden crearse rápidamente definiendo características básicas como la altura y el peso, o mediante una recopilación más detallada de medidas específicas. En la práctica, muchos fabricantes de automóviles suecos utilizan sólo unos pocos modelos humanos como representaciones virtuales a la hora de diseñar puestos de trabajo o evaluar tareas manuales. Normalmente se considera suficiente utilizar dos modelos extremos, uno de mujer baja y otro de hombre alto, para las evaluaciones ergonómicas mediante el software DHM, porque estos dos modelos extremos representan los límites opuestos de las características antropométricas que pueden encontrarse en la población general. Al incluir un modelo femenino bajo y un modelo masculino alto, se cubre una amplia gama de tamaños y proporciones corporales que pueden ser relevantes para el diseño ergonómico de productos o para evaluar el confort y la eficiencia de los puestos de trabajo.

Hay muchos programas informáticos DHM disponibles para la simulación humana y la evaluación ergonómica, como Siemens Jack (Raschke & Cort, 2019), Santos (Abdel-Malek et al., 2019) e IPS IMMA (Högberg et al., 2016). El objetivo general del desarrollo de estas herramientas es contribuir a la competitividad industrial mejorando el desarrollo de productos y los procesos de producción (Högberg et al., 2016). En este proyecto IPS IMMA se utilizó como herramienta principal de DHM para realizar las evaluaciones ergonómicas, como RULA, y se emplearon diferentes tipos de maniqués, dos masculinos y dos femeninos, para tener en cuenta la diversidad antropométrica en las evaluaciones. RULA también puede realizarse manualmente con observadores. Sin embargo, la subjetividad de los observadores puede afectar a los resultados de las evaluaciones ergonómicas, y la digitalización del proceso ayuda a obtener resultados más objetivos. De ahí que la inclusión de esta herramienta en el proyecto fuera esencial para garantizar unas evaluaciones ergonómicas precisas y fiables.

2.6 Sistemas de Captura de Movimiento

La captura de movimiento (MoCap), es el proceso de seguimiento y grabación digital del movimiento de un objeto o ser vivo en el espacio (Menolotto et al., 2020). Se han desarrollado diversas tecnologías y métodos para realizar MoCap. Por ejemplo, los sistemas que utilizan cámaras de infrarrojos pueden calcular la ubicación de objetos triangulando señales de cuerpos rígidos que reflejan luz infrarroja (Menolotto et al., 2020). Otros sistemas, como los basados en cámaras sensibles a la profundidad, proyectan luz sobre un objeto y calculan su distancia midiendo el tiempo que tarda la luz en reflejarse (Menolotto et al., 2020). También hay sistemas que utilizan sensores inerciales, campos electromagnéticos y potenciómetros para seguir el movimiento de estructuras articuladas (Menolotto

et al., 2020). Las tecnologías MoCap se emplean en una amplia gama de aplicaciones, en entornos sanitarios y clínicos, aplicaciones deportivas y aplicaciones industriales en los sectores de la robótica, la automoción y la construcción. Existen tres tipos principales de sistemas de captura de movimiento (Condell & Moore, 2008):

- Óptico: Este tipo de sistema utiliza cámaras para registrar el movimiento de marcadores reflectantes colocados en el cuerpo del sujeto.
- Inerciales: Estos sistemas utilizan sensores para medir la aceleración, la rotación y la orientación del cuerpo.
- Magnéticos: Estos sistemas utilizan sensores que detectan la posición y el movimiento del cuerpo en un campo magnético.

En este proyecto se ha utilizado el sistema inercial. Los sistemas inerciales son especialmente adecuados para captar el movimiento en espacios donde los obstáculos u otras interferencias podrían afectar a la eficacia de los sistemas ópticos y magnéticos, como la presencia de luz intensa o la necesidad de movimiento en exteriores. Además, los sistemas inerciales suelen ser más portátiles y menos costosos que los sistemas ópticos y magnéticos, lo que los hace más adecuados para aplicaciones que requieren flexibilidad y movilidad. En el contexto de este proyecto, se ha utilizado la captura de movimiento para grabar a distintas personas realizando el proceso de ensamblaje de mazos de cables. Estas grabaciones se han integrado en un DHM. Al incorporar la grabación al software DHM, como IPS IMMMA (Högberg et al., 2016), se ha utilizado una serie de métodos de evaluación ergonómica para determinar el nivel de dolor e incomodidad que puede experimentar el operario, así como para identificar la posibilidad de desarrollar trastornos musculoesqueléticos en el futuro.

2.7 Industria 5.0

El papel de los mazos de cables es cada vez más importante desde que la Industria 3.0 familiarizó a las industrias con el concepto de automatización (Nahavandi, 2019). A esto le siguió la Cuarta Revolución Industrial, conocida como Industria 4.0 (*Industry 5.0 - European Commission, 2022*), que emplea el Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube para establecer una interfaz en tiempo real entre entornos virtuales y físicos, conocidos como sistemas ciberfísicos. Aunque la Industria 4.0 aún no ha alcanzado su pleno desarrollo, diversos pioneros de la industria y líderes tecnológicos contemplan la Quinta Revolución Industrial como una fabricación autónoma que integra la inteligencia humana en el proceso (Nahavandi, 2019).

Tanto la evolución hacia la Industria 4.0 como la perspectiva emergente de la Industria 5.0 (*Industry 5.0 - European Commission, 2022*) están aún en proceso de desarrollo, ya que la consideración fundamental del elemento humano sigue estando infravalorada (Rauch et al., 2020). La llegada de la cuarta revolución industrial marcó la integración de los sistemas de fabricación en entornos humanos, cibernéticos y físicos, abriendo así una nueva era de colaboración entre los seres humanos y la tecnología. Sin embargo, este cambio generó aprensión entre los trabajadores, que temían ser desplazados por las máquinas o ver sus funciones sustituidas por la automatización (Rauch et al., 2020). De ahí que surja la necesidad de una solución tecnológica más sólida que promueva la preservación del medio ambiente y fomente la sostenibilidad, considerándose la Industria 5.0 como una posible fuente de estas soluciones innovadoras (Ghobakhloo et al., 2023).

El concepto de Industria 5.0, concebido por la Comisión Europea con el objetivo de promover una industria sostenible, centrada en el ser humano y con capacidad de recuperación (*Industry 5.0 - European Commission, 2022*), propone una combinación más estrecha de humanos y máquinas. Esto se lograría mediante la rápida implementación de avances en sensores, dispositivos vestibles, actuadores y tecnologías de la comunicación, reintegrando a los trabajadores humanos en los procesos de fabricación. Es importante reintegrar a los humanos en los procesos de fabricación no sólo porque utiliza las habilidades únicas de los humanos, sino también porque promueve una cultura laboral más satisfactoria, ética y adaptable. La Quinta Revolución Industrial aprovecha las habilidades humanas, como la flexibilidad, la creatividad y la toma de decisiones, con los puntos fuertes de las máquinas inteligentes, como la precisión, la repetibilidad y la carga útil, para aumentar la eficiencia de los procesos (Gualtieri et al., 2019). En este sentido, la Industria 5.0 está surgiendo como una sinergia entre humanos y máquinas autónomas, donde el trabajo autónomo está totalmente integrado y alineado con las intenciones y necesidades humanas.

2.8 Colaboración Humano Robot

La colaboración humano-robot (CRH) es una disciplina de la robótica centrada en permitir que robots y humanos trabajen juntos para completar tareas colaborativas (El Zaatari et al., 2019). En la era de la fabricación de la Industria 4.0, caracterizada por la personalización masiva y la necesidad de mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la calidad, la CRH emerge como una solución prometedora. Los robots colaborativos, o cobots, están diseñados para interactuar de forma segura y eficiente con los humanos en entornos de trabajo compartidos. La introducción de cobots ha despertado un gran interés en la industria, ya que ofrecen la posibilidad de combinar las ventajas de la automatización con la flexibilidad y adaptabilidad de los trabajadores humanos (Navas-Reascos et al., 2022). Los cobots pueden realizar una gran variedad de tareas industriales, desde el ensamblaje hasta la inspección, trabajando mano a mano con los empleados para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso.

En el contexto del proyecto de ensamblaje de mazos de cables, la colaboración humano-robot presenta nuevas oportunidades de optimización (Heisler et al., 2021). Los cobots pueden ayudar a superar las limitaciones de la automatización total trabajando con materiales flexibles y ejecutando tareas complejas que requieren precisión y repetibilidad. Además, al compartir el espacio de trabajo con los operarios humanos, los cobots pueden reducir la fatiga, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia operativa. La utilización de cobots también puede ayudar a mitigar los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo al reducir el esfuerzo físico y las tareas repetitivas que pueden provocar lesiones o molestias a los trabajadores (Salunkhe et al., 2023). Esto se logra mediante la distribución de tareas entre humanos y cobots, aprovechando las capacidades y fortalezas de cada uno para optimizar el proceso de trabajo. La HRC representa una oportunidad apasionante para mejorar los procesos de fabricación y crear entornos de trabajo más seguros, saludables y eficientes.

La colaboración entre humanos y robots (HRC) ofrece valiosas oportunidades para agilizar los procesos de fabricación en diversos sectores, incluido el proyecto de ensamblaje de mazos de cables. En este proyecto, la CRH se aprovechará mediante el rediseño de clips, introduciendo un clip específico adaptado a la interacción con robots. Esta configuración colaborativa facilita la cooperación entre operadores humanos y robots, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la calidad y la seguridad generales en el proceso de ensamblaje.

3 Selección de Métodos

En esta sección se ha analizado la selección de los métodos de evaluación ergonómica y los métodos de diseño elegidos para el proyecto. Profundicemos en los fundamentos de la selección y en las particularidades de cada método elegido, que se puede visualizar en la *Ilustración 3*.

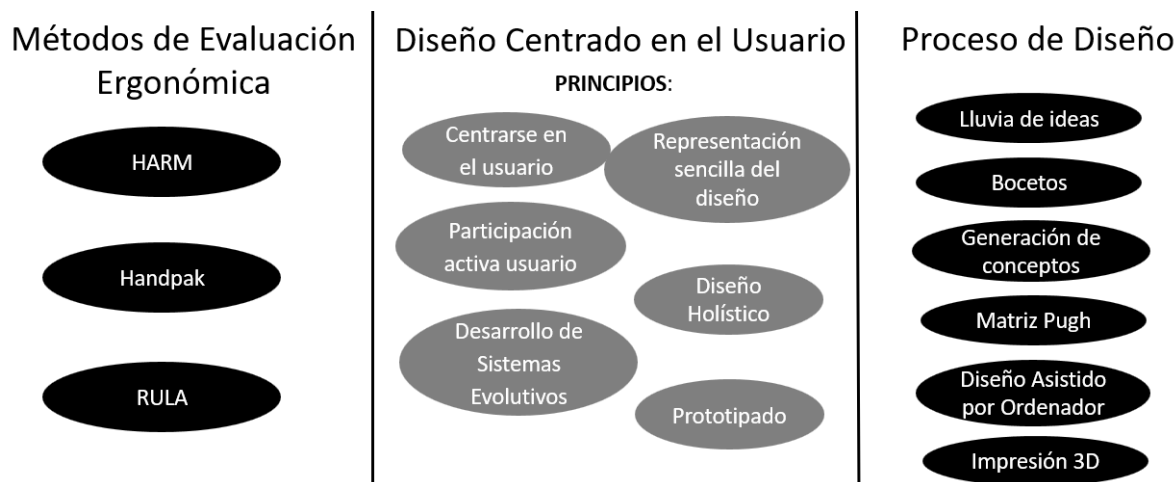


Ilustración 3: Selección de Métodos. Fuente: Elaboración Propia.

3.1 Métodos de Evaluación Ergonómica

En este proyecto, tras debatir varios métodos de evaluación ergonómica que pueden utilizarse para el análisis inicial de la situación actual a la que se enfrentan los trabajadores de la fábrica durante el proceso de ensamblaje de mazos de cables, se ha llegado a la conclusión de que los mejores métodos seleccionados para el proyecto son HARM (Douwes & de Kraker, 2012), HandPak (Johnson & Nussbaum, 2003) y RULA (McAtamney & Nigel Corlett, 1993).

El método HARM es especialmente útil para evaluar el riesgo de desarrollar dolor de brazo, cuello u hombro al realizar tareas mano-brazo. Dado que las tareas en el puesto de trabajo implican principalmente movimientos de la mano y el brazo, HARM ofrece una herramienta específica para identificar y cuantificar los riesgos asociados a estas actividades. Además, HARM proporciona una estructura clara y detallada para recopilar datos y evaluar riesgos, lo que facilita la identificación de áreas problemáticas y la aplicación de medidas preventivas.

Por otro lado, HandPak es un paquete de software diseñado para determinar las fuerzas aceptables y los pares de torsión recomendados para una amplia variedad de tareas de manipulación manual (Johnson & Nussbaum, 2003). Dado que el proyecto consiste en rediseñar clips que implican manipulación manual, HandPak ofrece una herramienta precisa y basada en pruebas para evaluar las fuerzas aplicadas durante estas actividades. Esto es crucial para garantizar que los nuevos diseños de clips minimizan la carga física y reducen el riesgo de lesiones para los trabajadores.

Por último, el método RULA (McAtamney & Nigel Corlett, 1993) es especialmente pertinente para evaluar las posturas del cuello, el tronco y las extremidades superiores, junto con la función muscular y las cargas externas experimentadas por el cuerpo. Dado que el proyecto implica la manipulación de clips en el puesto de trabajo, RULA proporciona una herramienta eficaz para identificar y evaluar las

posturas que pueden contribuir a la fatiga muscular y a los trastornos musculoesqueléticos. Además, RULA es una herramienta de evaluación rápida y práctica que puede aplicarse fácilmente en entornos de trabajo para identificar áreas de mejora ergonómica.

Para este proyecto específico de rediseño de clips en la estación de ensamblaje de mazos de cables, el método RULA parece más adecuado que los métodos OWAS (Karhu et al., 1977) o REBA (Hignett & McAtamney, 2000) porque RULA se centra en evaluar las posturas del cuello, el tronco y las extremidades superiores, que son las áreas más relevantes para este proyecto dadas sus tareas de manipulación manual de clips. Por otro lado, OWAS y REBA tienen un enfoque más amplio que abarca todo el cuerpo, lo que puede no ser tan relevante para esta tarea específica. Además, RULA ha sido diseñado para ser utilizado por personal sin formación ergonómica, lo que lo hace más accesible y práctico para su aplicación en la rutina diaria del proyecto. Por el contrario, OWAS y REBA pueden requerir un mayor nivel de formación y experiencia para su aplicación efectiva. Como su nombre indica, RULA proporciona una evaluación rápida de las posturas, por lo que es ideal para entornos de trabajo en los que se necesita una evaluación ágil y eficaz. Esto es importante en un proyecto en el que el objetivo es identificar y abordar rápidamente los problemas ergonómicos asociados a las posturas de trabajo.

En resumen, los métodos HARM, HandPak y RULA se seleccionaron para este proyecto debido a su capacidad para evaluar aspectos específicos relacionados con la ergonomía, las fuerzas aplicadas y las posturas corporales durante las actividades de trabajo manual en la estación de ensamblaje de mazos de cables del parachoques. Estas herramientas proporcionan una base sólida para identificar y abordar los riesgos ergonómicos y mejorar las condiciones de trabajo de los operarios.

3.2 Enfoque de Diseño

Este proyecto se ha centrado en un enfoque centrado en el usuario, teniendo en cuenta la diversidad antropométrica. Según Gulliksen et al., 2003, una metodología centrada en el usuario, para garantizar que se aplica desde el principio del proyecto, debe seguir los siguientes principios, que él aplica a una empresa, pero que se han adaptado al caso del proyecto (Gulliksen et al., 2003).

Para este rediseño, el enfoque centrado en el usuario se integró con el método del Doble Diamante para garantizar que la atención siguiera centrándose en el bienestar y la comodidad del trabajador, y no en el coste u otros factores. El método del Doble Diamante se empleó para esbozar el proceso del proyecto. En una primera fase se recopiló información general y se evaluó el proceso de montaje existente, lo que generó una amplia gama de ideas. A continuación, se refinaron estas ideas para establecer los requisitos específicos del rediseño del clip. Por último, se desarrollaron numerosas ideas de rediseño y se redujeron a unas pocas soluciones concretas, siempre priorizando las necesidades del usuario y los principios ergonómicos.

Antes de definir los principios, es importante mencionar que el diseño centrado en el usuario (DCU) es una metodología que se centra en la usabilidad a lo largo del proceso de desarrollo y durante toda la vida útil del sistema (Gulliksen et al., 2003). La usabilidad se define como el grado en que un producto puede ser utilizado por usuarios concretos para alcanzar objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción.

Los principios son (Gulliksen et al., 2003):

1. Centrarse en el usuario: Los objetivos, tareas y necesidades de los usuarios deben guiar el desarrollo. Crear y mantener un enfoque centrado en las necesidades del usuario en lugar de un enfoque técnico.
2. Participación activa del usuario: En este proyecto, al no poder estar en contacto con los trabajadores, la evaluación se ha realizado con diferentes personas de distinta diversidad antropométrica, tanto al inicio del proyecto, durante el análisis de datos, como incluso al final de este, cuando se han evaluado las diferentes soluciones probándolas con diferentes prototipos, pero no han sido operarios.
3. Desarrollo de sistemas evolutivos: Realizar una evaluación de los diseños, un análisis adecuado de las necesidades de los usuarios y del contexto de uso. Evaluación documentada con sugerencias concretas de modificaciones y rediseño en función de los resultados de la evaluación.
4. Representaciones sencillas del diseño: El diseño debe presentarse de forma que sea fácil de entender para los usuarios y otras partes interesadas. En este caso, se recurrió a los compañeros como usuarios. Deberían entender fácilmente todos los diseños.
5. Creación de prototipos
6. Diseño holístico: Todos los aspectos deben desarrollarse en paralelo.

También se han utilizado otros métodos para ver si las posibles soluciones son factibles en este proceso o no. Como se puede ver en la teoría, la mayoría de las soluciones dadas al problema reflejado en este proyecto es una colaboración humano-robot. Por lo tanto, el robot colaborativo también se ha tenido en cuenta a la hora de rediseñar los clips, realizando un rediseño específico para el caso en el que el humano coloca el clip y el robot lo presiona.

En el ámbito del desarrollo de productos, la selección de los métodos de diseño adecuados desempeña un papel fundamental para garantizar la eficacia y la eficiencia en la generación de soluciones innovadoras. Esta sección profundiza en los métodos de diseño empleados en el proyecto, desde la generación de ideas hasta la materialización del concepto. Cada método, desde la lluvia de ideas hasta la impresión 3D, aporta un enfoque único y complementario para abordar los retos del diseño.

- **Lluvia de ideas:** Es un proceso colaborativo en el que se invita a un grupo de personas a generar ideas libremente y sin restricciones. Durante una sesión de Lluvia de Ideas se fomenta la creatividad y todos los miembros del equipo participan activamente en la generación de ideas. Las ideas se comparten abiertamente y se registran sin evaluación inicial. Este método es útil para explorar un amplio abanico de posibilidades y estimular la innovación.
- **Bocetos:** Consiste en crear dibujos rápidos y esquemáticos para representar visualmente ideas y conceptos de diseño. Los bocetos suelen ser sencillos y se utilizan como herramienta para captar ideas rápidamente y explorar distintos enfoques. Los bocetos son una forma eficaz de comunicar visualmente conceptos de diseño y facilitar la colaboración entre los miembros del equipo.

- **Generación de conceptos:** Tras generar una serie de ideas mediante la lluvia de ideas y los bocetos, el siguiente paso es desarrollar conceptos más detallados. En este proceso, se exploran y refinan las ideas más prometedoras para crear soluciones de diseño más completas. Pueden crearse prototipos o maquetas de baja fidelidad para evaluar la viabilidad y eficacia de los conceptos propuestos.
- **Selección de conceptos Pugh:** Es una técnica estructurada para comparar y evaluar diferentes conceptos de diseño basándose en criterios predefinidos. Se establecen criterios de evaluación, como el coste, la facilidad de fabricación, el rendimiento y la estética, y se asigna a cada concepto un valor relativo a esos criterios. La matriz Pugh ayuda a tomar decisiones fundamentadas sobre qué concepto de diseño conviene seguir desarrollando.
- **Diseño asistido por ordenador (CAD):** Es un proceso que utiliza software especializado para crear modelos digitales tridimensionales de productos o componentes. Los diseñadores utilizan herramientas CAD para diseñar, analizar y visualizar productos antes de su fabricación física. El CAD permite realizar modificaciones de diseño rápidas y precisas y facilita la colaboración entre equipos de diseño distribuidos geográficamente.
- **Impresión 3D:** La impresión 3D es una tecnología que permite fabricar objetos tridimensionales a partir de modelos digitales. Durante el proceso de impresión, el material se deposita capa por capa para construir el objeto deseado. La impresión 3D se utiliza para crear prototipos rápidos, modelos y piezas funcionales con una amplia variedad de materiales, como plásticos, metales y cerámica. Esta tecnología ofrece flexibilidad de diseño y reduce los tiempos de desarrollo al permitir la creación rápida de prototipos y la fabricación de piezas a medida.

4 Análisis Inicial

En esta sección, se realizó un análisis inicial de la estación de parachoques existente para derivar las especificaciones de los requisitos de diseño. Este análisis sirvió de base para iniciar el proceso de rediseño de los clips. En la *Ilustración 4* se presenta un diagrama de flujo con los pasos de este análisis inicial.

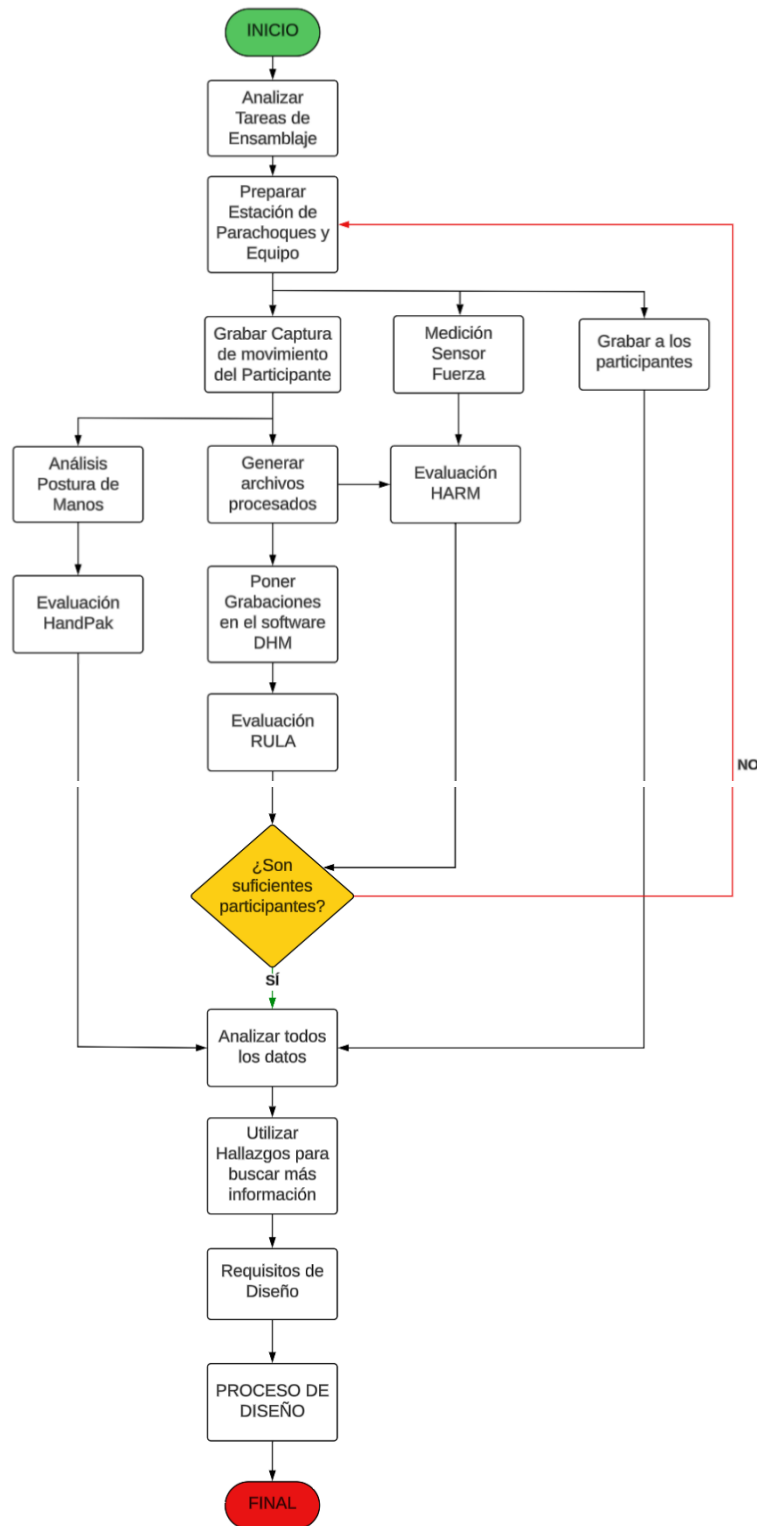


Ilustración 4: Diagrama de Flujo Análisis Inicial. Fuente: Elaboración Propia.

4.1 Observación Estación del Parachoques

Como se muestra en la *Ilustración 5*, esta estación de montaje del parachoques comprende un mazo de cables con varias conexiones. Sin embargo, para este proyecto, nuestra atención se centra en dos tipos de clips utilizados en esta estación para fijar el mazo de cables al parachoques, por lo que las tareas en las que se centrará este proyecto son la colocación del clip circular y del clip plano. Como se muestra en la *Ilustración 5*, los clips se sujetan al mazo de cables con bridas y, una vez colocado el clip, el mazo de cables se empuja hasta su posición.

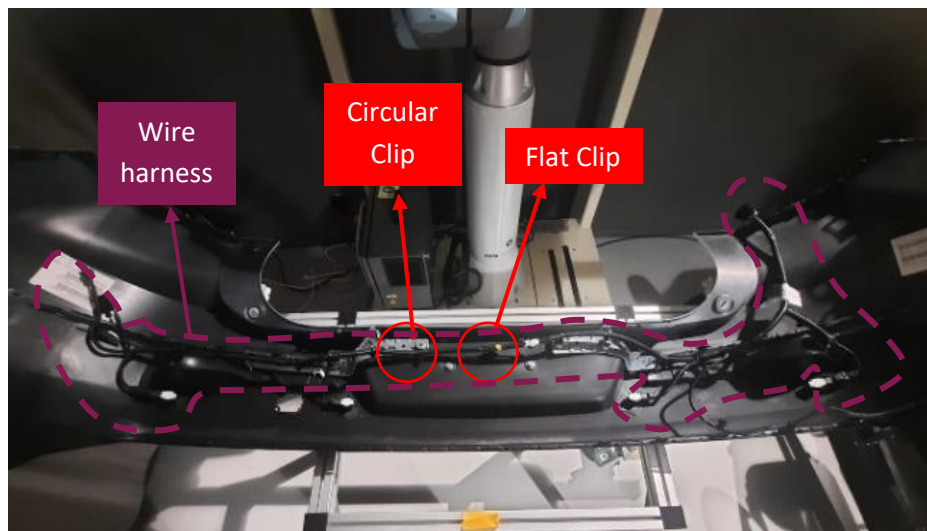


Ilustración 5: Estación del Parachoques. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.1 Clip Plano

El primer tipo de clip, que se muestra en la *Ilustración 6*, es plano, parecido a una especie de pinza que se engancha a un accesorio plano. Esta pinza tiene en su interior placas de hierro que facilitan una fijación segura. Cabe señalar que este clip no produce ningún sonido ni respuesta táctil para indicar su correcta colocación.



Ilustración 6: Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2 Clip Circular

El segundo tipo de clip, mostrado en la *Ilustración 7*, es circular y encaja en un orificio hueco. Tiene círculos más grandes alrededor del tubo principal del clip, lo que garantiza una fijación segura y dificulta su desenganche. Al igual que el primer tipo de clip, no produce ningún sonido ni una indicación clara de colocación correcta.

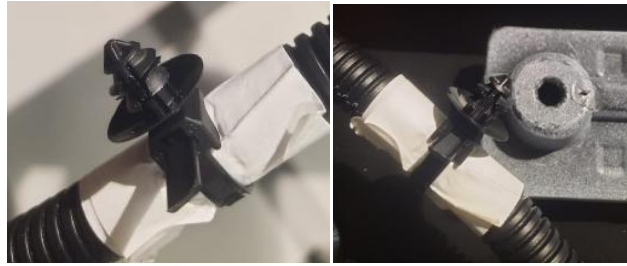


Ilustración 7: Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

4.2 Captura de movimiento

La ejecución del proyecto comienza con un análisis inicial en el que se ha empleado el sistema Xsens MVN Awinda, que es un sistema de captura de movimiento que utiliza unidades de medición inercial (IMU) y consta de 17 sensores ajustados al cuerpo con correas distribuidas por todo el cuerpo, incluidas las manos, la cabeza, la espalda, los pies, las piernas, los brazos, la pelvis y el esternón (MVN Awinda | Movella, 2024). Este equipo se ha utilizado para grabar el proceso de ensamblaje del mazo de cables, cómo los trabajadores colocan los clips para fijar el mazo de cables. La *Ilustración 8* muestra todos los equipos que componen el sistema.



Ilustración 8: Correas, Camiseta, Cinta de Cabeza, Sensores y antena del sistema Xsens MVN Awinda. Fuente: shop.movella.com

Se han realizado grabaciones de cuatro participantes (dos hombres y dos mujeres), concretamente un hombre alto, un hombre bajo, una mujer alta y una mujer baja. Se considera que esta diversidad de proporciones corporales explica la diversidad antropométrica y las posturas adoptadas durante el proceso en función de sus medidas corporales. Para empezar, se han tomado las medidas corporales del individuo con una cinta métrica. El software ofrece la opción de introducir sólo medidas específicas, como la altura del cuerpo y la longitud de los pies, o de introducir varias medidas corporales, como la anchura de las caderas, la anchura de los hombros y la altura de las rodillas, entre otras. Durante el proceso de grabación, el individuo se ha colocado todo el equipo de captura de movimiento, La *Ilustración 9* muestra cómo una persona tiene colocado el equipo, ha agarrado el cable con el clip y ha asumido las fuerzas y posturas que ha considerado más adecuadas para colocar el clip.

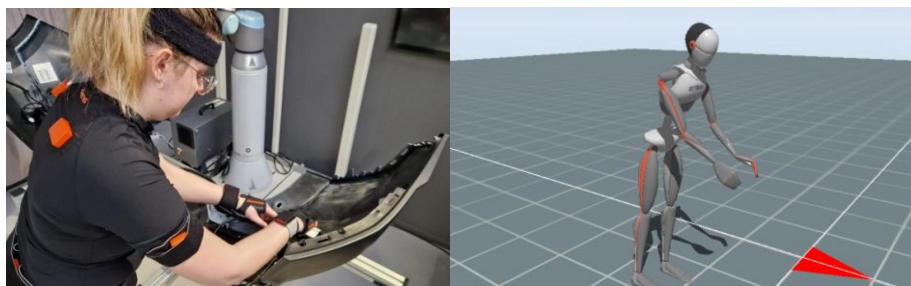


Ilustración 9: Captura y representación del movimiento humano mediante el sistema Xsens MVN Awinda.

Fuente: Elaboración Propia.

Para garantizar la diversidad antropométrica en nuestro estudio, se ha designado a cuatro participantes, identificados como Caso 1, Caso 2, Caso 3 y Caso 4. La *Tabla 1* representa todas las medidas utilizadas en este análisis. Sólo se tuvieron en cuenta estas medidas porque eran suficientes para adaptar las proporciones corporales. Se probaron otras medidas, pero acabaron distorsionando el esqueleto en el programa. Por lo tanto, al final se decidió utilizar sólo estas medidas para evitar representaciones corporales desproporcionadas. Estos participantes representan un abanico de estaturas y sexos para captar una amplia gama de posibles posturas y movimientos durante el proceso de montaje.

Tabla 1: Medidas de los Participantes en el Análisis Inicial

MEDIDA	CASO 1: Hombre		CASO 2: Hombre		CASO 3: Mujer		CASO 4: Mujer	
	Valor (cm)	Porcentaje (%)	Valor (cm)	Porcentaje (%)	Valor (cm)	Porcentaje (%)	Valor (cm)	Porcentaje (%)
Altura del Cuerpo	188	96.85	174.3	42.4	153	5.91	174.5	96.55
Longitud Pie	28.5	87.89	25	6.64	22.5	5.64	25.9	88.41

Otra herramienta que se ha utilizado en este análisis inicial de captura de movimiento son los Manus Xsens Metagloves, que pueden verse en la *Ilustración 10*, para capturar movimientos precisos de los dedos durante el proceso de ensamblaje del mazo de cables. Estos guantes ofrecen una solución avanzada que permite obtener datos detallados sobre cómo interactúan las manos con los componentes durante la tarea de ensamblaje (MVN Awinda | Movella, 2024).



Ilustración 10: Manus Xsens Metagloves. Fuente: shop.movella.com y Elaboración Propia.

Una ventaja significativa es la integración nativa de estos guantes en el software de captura de movimiento de Xsens. Esto permite obtener datos de los dedos en tiempo real y combinarlos con los datos corporales captados por otros sensores de Xsens, proporcionando una visión completa de los movimientos durante el ensamblaje de los cables. Además, la resistencia a las interferencias magnéticas y la flexibilidad para capturar datos en cualquier entorno garantizan la precisión y fiabilidad de las mediciones (MVN Awinda | Movella, 2024).

Para mostrar la funcionalidad y el impacto de estos guantes, la *Ilustración 11* ilustra la representación de las manos en el software tanto sin los Manus Xsens Metagloves como con ellos. Sin los guantes, la representación carece de detalle y precisión, y a menudo se omiten sutiles movimientos y matices de los dedos. Sin embargo, con los Manus Xsens Metagloves, la representación es mucho más detallada y precisa, ya que capta con exactitud incluso los movimientos más pequeños de los dedos. Este marcado contraste pone de manifiesto la eficacia de los guantes a la hora de mejorar la fidelidad de la captura del movimiento de la mano, lo que permite un análisis más exhaustivo de los movimientos de la mano durante el proceso de ensamblaje del mazo de cables.

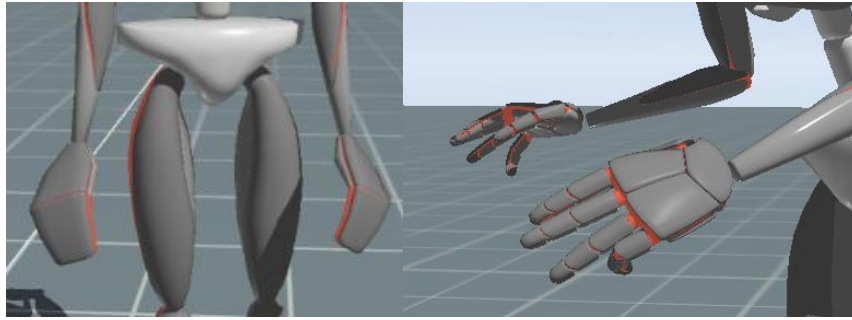


Ilustración 11: El sistema Xsens MVN Awinda sin y con los Metagloves Manus Xsens. Fuente: Elaboración Propia.

Durante esta fase, se realizaron grabaciones con el equipo completo, incluidos sensores, correas, guantes Manus y otros dispositivos. En esta sección se presentan fotos de todos los participantes equipados con el equipo completo. La *Ilustración 12* corresponde al Caso 1, la *Ilustración 13* al Caso 2, la *Ilustración 14* al Caso 3 y la *Ilustración 15* al Caso 4.

Se observó que los participantes hacían gestos para determinar si el clip estaba correctamente colocado, como se muestra en la *Ilustración 16*. Sin embargo, sin recibir ninguna señal clara que indicara la colocación correcta, seguían aplicando fuerza en busca de esa confirmación. Este proceso supuso una pérdida de tiempo significativa, ya que los trabajadores esperaban señales de confirmación que nunca llegaban, lo que conducía a un ciclo de verificación y aplicación de fuerza adicional. Este hallazgo subraya la necesidad de que los trabajadores reciban información clara y precisa durante el proceso de colocación de clips.



Ilustración 12: Participante Caso 1 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 13: Participante Caso 2 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.

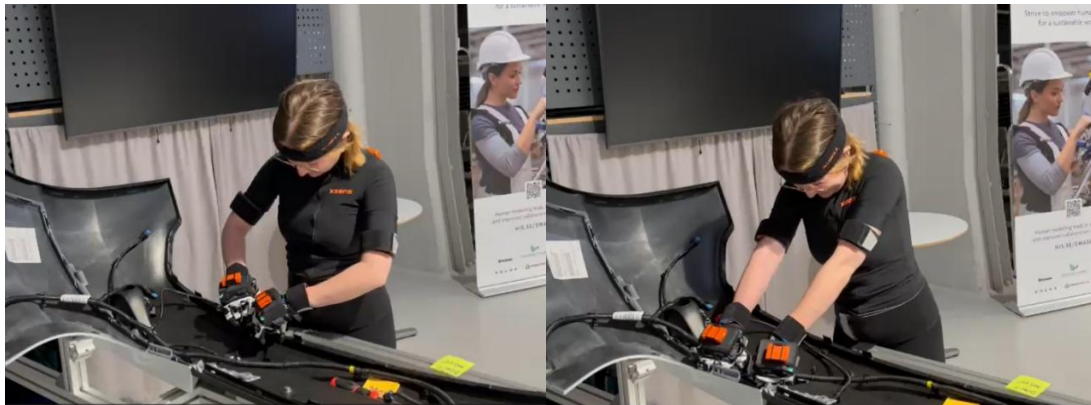


Ilustración 14: Participante Caso 3 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 15: Participante Caso 4 colocando Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 16: Participantes Casos 2 y 4 comprobando si el clip está correctamente colocado para liberar la fuerza. Fuente: Elaboración Propia.

4.3 Software DHM

Tras registrar los movimientos utilizando Xsens MVN Awinda y Manus Xsens Metagloves, los datos capturados se transfieren al software IPS IMMA. En esta fase, las grabaciones de los movimientos de los participantes se superponen a un maniquí virtual, lo que permite una visualización precisa de los movimientos realizados durante el proceso de montaje en el contexto del entorno de trabajo real. La *Ilustración 17* muestra los maniqués utilizados en el software IPS IMMA que tienen las medidas de los participantes. Posteriormente, el modelo 3D del parachoques se incorpora al software para proporcionar un entorno de trabajo virtual completo. Una vez completado este paso, los datos se utilizan para generar vídeos que muestran las posturas y los movimientos de los participantes mientras realizan el proceso de montaje. Estos vídeos sirven como valiosas herramientas para visualizar y comprender cómo los trabajadores interactúan con el entorno de trabajo y ejecutan las tareas asignadas.

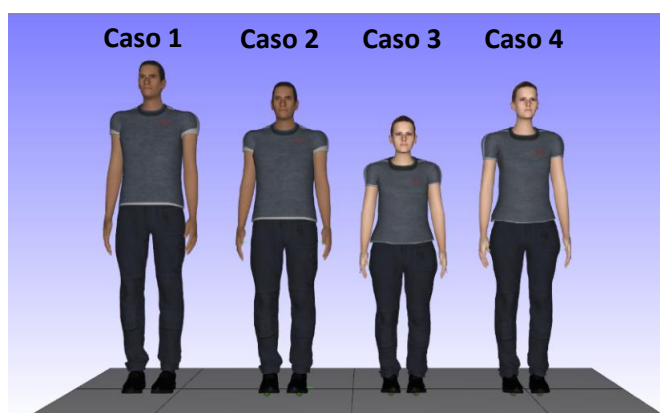


Ilustración 17: Maniqués de los participantes en el software IPS IMMA. Fuente: Elaboración Propia.

Durante esta fase, las grabaciones de Xsens se transfirieron al software DHM para su análisis. En esta sección se presentan imágenes de cada participante, incluyendo sus medidas antropométricas y grabaciones en el software DHM. Se capturó la postura más representativa o problemática durante el proceso de colocación de cada tipo de clip. En la *Ilustración 18* se muestra al participante 1 colocando los dos tipos de clips disponibles, y de forma similar en las *Ilustraciones 19, 20 y 21* con los participantes de los Casos 2, 3 y 4, respectivamente.

Como puede observarse en las figuras, las posturas representadas en el modelado humano digital son bastante similares a las observadas en la realidad, como se ha mostrado en el apartado anterior, gracias al uso del equipo de captura de movimiento. Con estas posturas, se realizó una evaluación RULA. Como se explica en la teoría, realizar esta evaluación con esta herramienta en lugar de manualmente con observadores mejora la objetividad, proporcionando así un poco más de precisión.

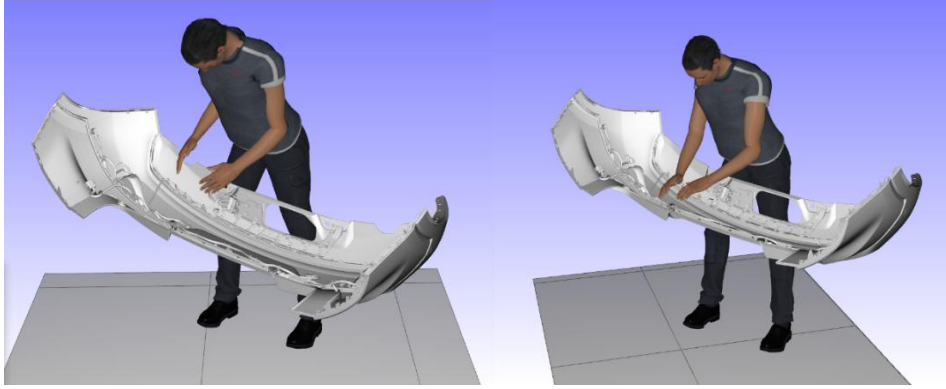


Ilustración 18: Caso 1 colocación de clip plano y circular. Fuente: Elaboración Propia.

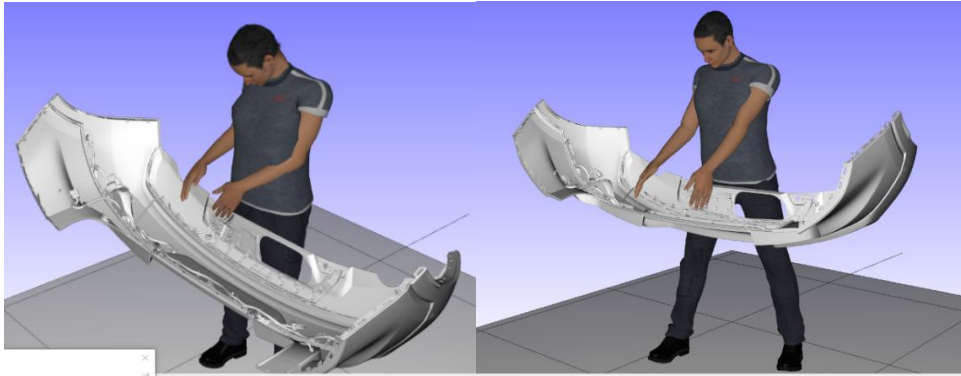


Ilustración 19: Caso 2 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.

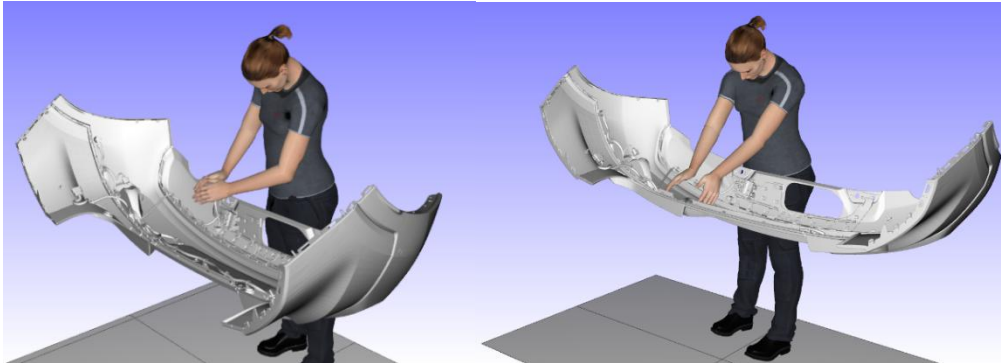


Ilustración 20: Caso 3 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.

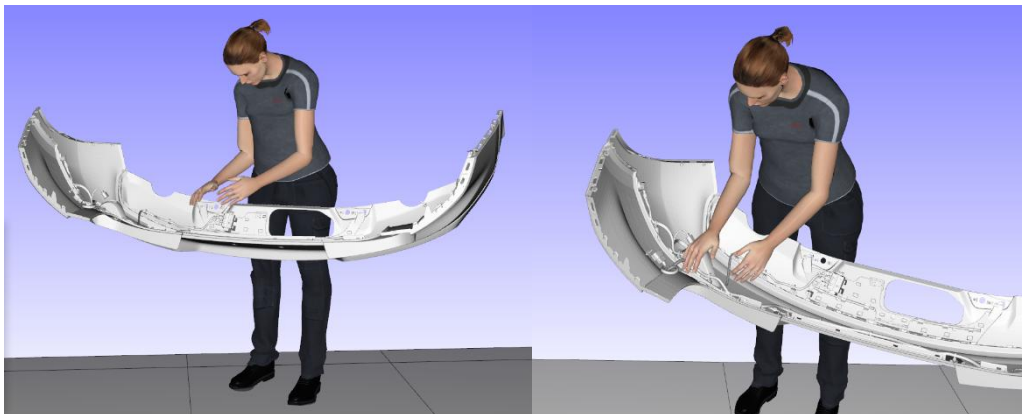


Ilustración 21: Caso 4 colocación de pinza plana y circular. Fuente: Elaboración Propia.

4.4 Sensor de Fuerza

Tras la etapa de captura del movimiento, el siguiente paso de la aplicación consiste en medir la fuerza ejercida por los participantes durante el ensamblaje del clip. Para ello, se utilizó un sensor de fuerza llamado Loadsol, concretamente el modelo Loadpad (Loadpad, 2024), que se muestra en la *Ilustración 22*. El Loadpad mide la fuerza total aplicada, incluso si esta fuerza se distribuye de forma desigual por su superficie. Este dispositivo registra la fuerza producida durante cualquier actividad manual o manipulativa, lo que permite analizar parámetros como la frecuencia, la amplitud, la sincronización y la tasa de producción de fuerza.

Durante esta fase, se pidió a cada participante que repitiera el proceso de colocación del clip, pero esta vez colocando el sensor de fuerza entre sus manos y el clip. De esta forma, el sensor registraba la fuerza aplicada por el participante al presionar el clip. Los datos recogidos se guardaron utilizando la aplicación correspondiente para su posterior análisis en la evaluación ergonómica de HARM.



Ilustración 22: Sensor de fuerza Loadpad y un participante usándolo. Fuente: Elaboración Propia.

Con estos datos, se generaron gráficos que mostraban cuánta fuerza ejercía cada participante y de qué manera durante la tarea. Estos resultados proporcionan información importante sobre la carga física asociada al proceso de ensamblaje de clips, ayudando a identificar posibles riesgos ergonómicos y a orientar el diseño de soluciones preventivas adecuadas.

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de fuerza utilizando el Loadsol, concretamente el Loadpad. Se muestran imágenes de los gráficos generados para cada participante al colocar cada tipo de clip. En las *Ilustraciones 23 y 24, 25 y 26, 27 y 28, 29 y 30* se pueden observar las gráficas para los casos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Como puede observarse en todos los gráficos, es evidente que cada participante aplica una fuerza superior a 100 N al fijar cada clip.

Los resultados indican que la fuerza necesaria para fijar los clips es significativamente alta, lo que puede aumentar el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y otros trastornos relacionados con el trabajo. Estos resultados subrayan la importancia de revisar y mejorar el diseño de los clips y el proceso de fijación para reducir la carga física de los trabajadores y promover un entorno de trabajo más seguro y saludable.

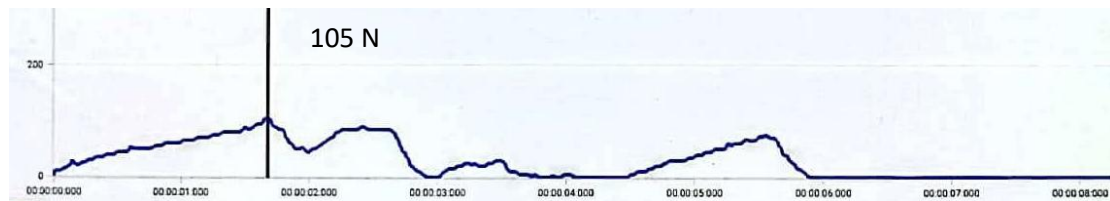


Ilustración 23: Gráficos de Fuerza Caso 1 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.

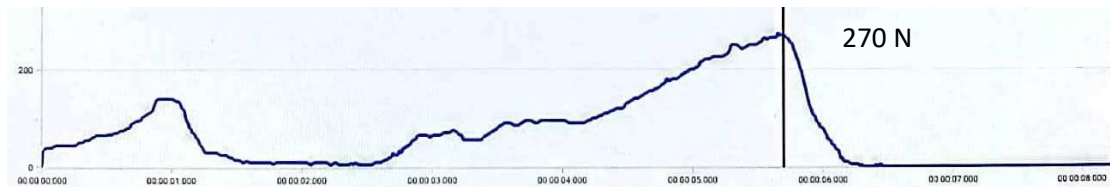


Ilustración 24: Gráficos de Fuerza Caso 1 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

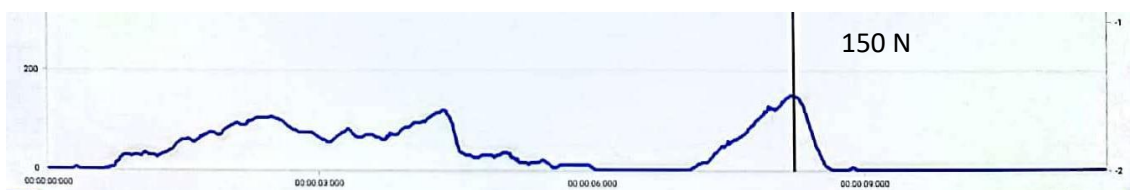


Ilustración 25: Gráficos de Fuerza Caso 2 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.

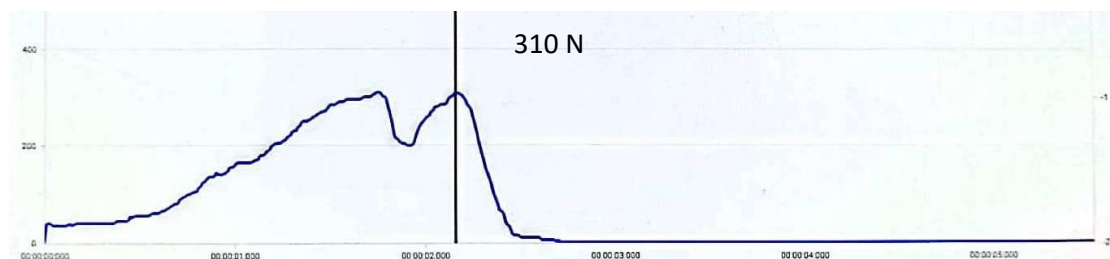


Ilustración 26: Gráficos de Fuerza Caso 2 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

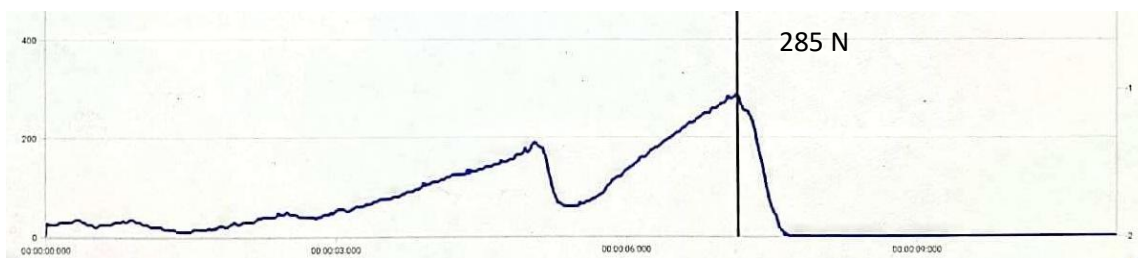


Ilustración 27: Gráficos de Fuerza Caso 3 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

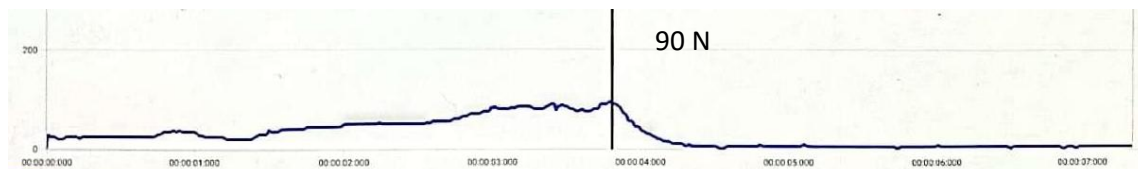


Ilustración 28: Gráficos de Fuerza Caso 3 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

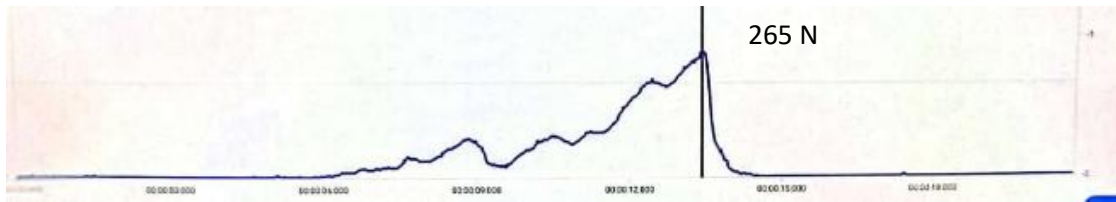


Ilustración 29: Gráficos de Fuerza Caso 4 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

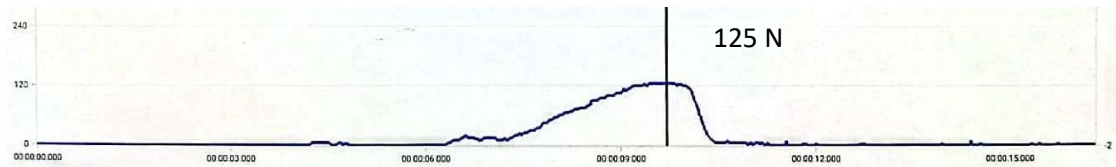


Ilustración 30: Gráficos de Fuerza Caso 4 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

4.5 Medición de la Fuerza Real Aplicada

En el siguiente paso de nuestra aplicación, se midió la fuerza real necesaria para colocar el clip y determinar así si los participantes aplican más fuerza de la necesaria al fijar los clips o no. Para realizar esta medición, se utilizó agua. La idea inicial es utilizar una garrafa de agua. Este método consiste en colocar la garrafa boca abajo sobre el clip, sujetarla con las manos lubricadas con aceite para minimizar la fricción, hacer un agujero en el fondo de la garrafa y verter agua poco a poco hasta que el clip esté completamente sujeto. Después se mide la cantidad de agua utilizada y se calcula la fuerza necesaria mediante la fórmula $F=m \times a$, donde F representa la fuerza, m la masa (medida en litros) y a la aceleración (gravedad).

Sin embargo, como no se disponía de una garrafa de agua, se improvisó un recipiente alternativo, en este caso, una papelerera. Se colocó un objeto en el fondo del recipiente para dirigir la fuerza a un punto concreto, simulando la fuerza necesaria para fijar el clip. A continuación, siguiendo el mismo proceso, se vertió agua en el recipiente y se midió la cantidad necesaria para que el clip se quedara completamente colocado. En la *Ilustración 31* se muestran todos los utensilios utilizados para este proceso de medición y en la *Ilustración 32*, el proceso de medición.

A pesar de la desviación del método original, este enfoque alternativo permite evaluar la fuerza necesaria para el ensamblaje de clips. La medición de la fuerza registrada sirvió de referencia para determinar si los participantes aplicaban la cantidad de fuerza adecuada durante la tarea, contribuyendo así a garantizar la seguridad ergonómica y la eficiencia en el proceso de montaje.



Ilustración 31: Utensilios usados en la medición. Fuente: Elaboración Propia.

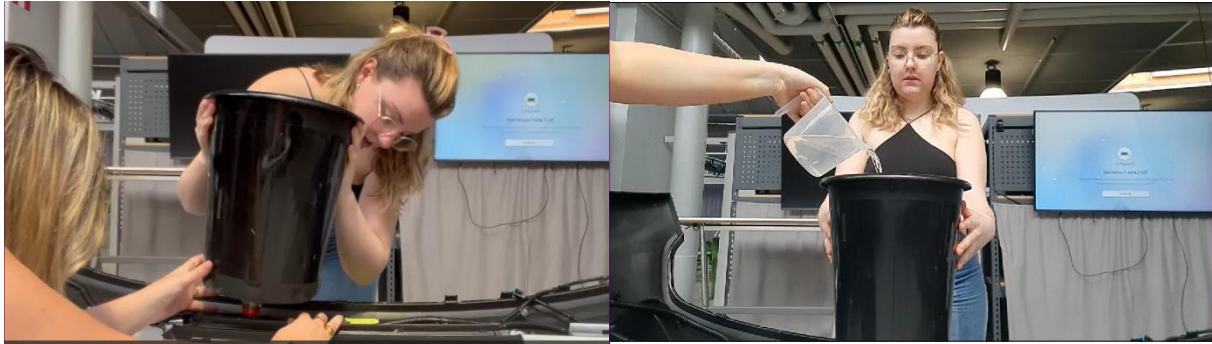


Ilustración 32: Realización de la medición. Fuente: Elaboración Propia.

En esta sección se midió la fuerza real necesaria para insertar el clip siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Se fue añadiendo agua al recipiente hasta que se introdujo el clip. Este procedimiento planteó algunas dificultades, ya que era difícil mantener el recipiente estable por encima del clip, y el peso creciente del recipiente hacía que el proceso fuera más engorroso. Sin embargo, después de algunos esfuerzos, se añadió el agua y se midió utilizando una jarra medidora de un litro. La medición dio como resultado 4,6 litros de agua.

Al convertir esta medición a newtons para calcular la fuerza mediante la fórmula $F = m \times a$, donde “m” son 4,6 litros (equivalentes a 4,6 kg) y “a” corresponde a la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$), el resultado fue de 45,08 N. Se utilizó inicialmente solo la masa del agua, es decir, 4,6 kg. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no se añadió en un primer momento el peso de la papelera utilizada como recipiente, que también contribuye a la fuerza total aplicada sobre el clip. Una papelera convencional de plástico suele tener una masa aproximada de 0,4 kg, por lo que la masa total sería de 5,0 kg.

Comparando este resultado con las lecturas del sensor de fuerza de todos los participantes, la mayoría de las cuales superaban los 100 N, es evidente que los participantes ejercen mucha más fuerza de la necesaria al colocar los clips. Es probable que esta aplicación excesiva de fuerza se deba a la falta de retroalimentación que indique cuándo se ha insertado correctamente el clip.

$$F = m \times a = 5 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 49 \text{ N}$$

4.6 HARM

Durante esta fase de aplicación, se utilizó el método HARM (Hand Arm Risk Assessment Method) para evaluar los riesgos ergonómicos asociados a la tarea. Este método emplea un software especializado que guía al usuario a través de una serie de preguntas específicas. En primer lugar, se proporcionaron los datos del proyecto, incluido el archivo de grabaciones de movimiento capturadas con el sistema Xsens MVN Awinda. Posteriormente, se introdujo la duración de la tarea, indicando que los trabajadores realizan la tarea durante 8 horas al día, 5 días a la semana, con un descanso de 7,5 minutos cada hora y media. Además, se incluyó el archivo de fuerzas medidas con el equipo Loadsol.

Cabe destacar que no se registran vibraciones durante la ejecución de la tarea. Una vez introducida toda esta información, el software evaluó los datos y proporcionó un resultado visual basado en tres colores: rojo, amarillo y verde. El color rojo indica un nivel de riesgo elevado que requiere atención inmediata, mientras que el verde significa que la tarea está dentro de los límites aceptables y no

requiere cambios. Este método se utiliza para evaluar tanto los movimientos como las fuerzas del brazo durante la tarea. Este procedimiento de seis pasos se ha repetido dos veces para cada participante, ya que cada participante ha sido grabado una vez para cada clip. La estación comprende dos clips diferentes, por lo que es necesario repetir el proceso para cada participante a fin de evaluar exhaustivamente los factores ergonómicos.

En esta sección, las evaluaciones se realizaron utilizando HARM, teniendo en cuenta los movimientos y posturas corporales registrados con el sistema Xsens MVN Awinda, así como los datos del sensor de fuerza Loadsol. Los resultados de estas evaluaciones se presentan en *las Ilustraciones 33 y 34, 35 y 36, 37 y 38, 39 y 40*, correspondientes a los participantes de los casos 1, 2, 3 y 4 respectivamente, para cada tipo de clip.

Como puede observarse en las Ilustraciones, todos los resultados están resaltados en rojo, superando la puntuación de 50 e incluso alcanzando los 70 puntos. Esto indica un alto nivel de riesgo ergonómico asociado al proceso de colocación de clips. Las elevadas puntuaciones sugieren problemas significativos en las manos de los trabajadores, incluidos esfuerzos excesivos y movimientos bruscos, que requieren atención y solución para mejorar las condiciones ergonómicas y reducir el riesgo de lesiones.

Además, como indica la propia evaluación, si la puntuación supera 50, existe un alto riesgo de dolencias en los brazos, el cuello o los hombros. Es importante tomar medidas preventivas de inmediato.

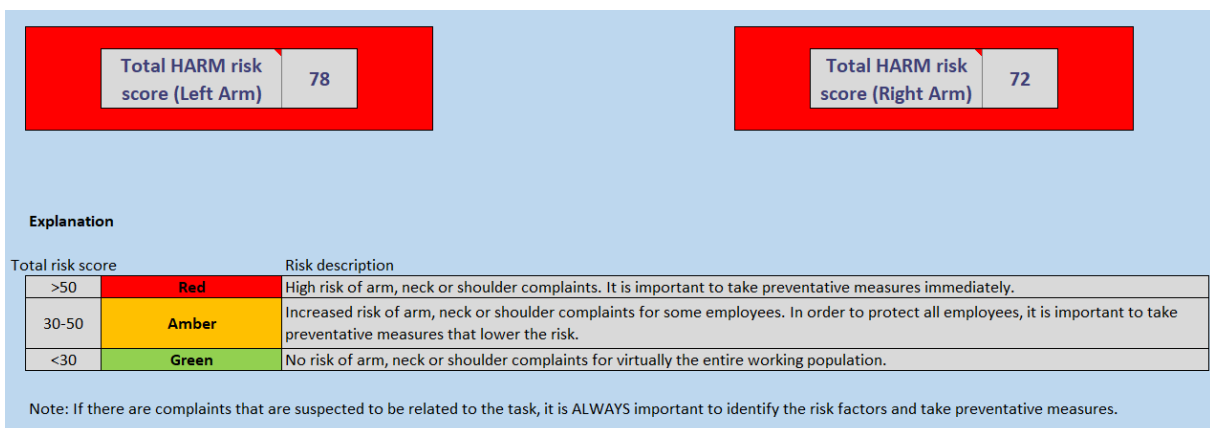


Ilustración 33: Evaluación HARM Caso 1 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.

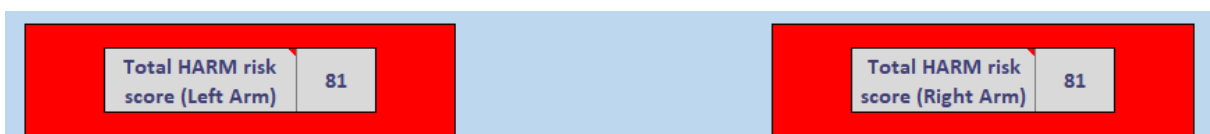


Ilustración 34: Evaluación HARM Caso 1 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

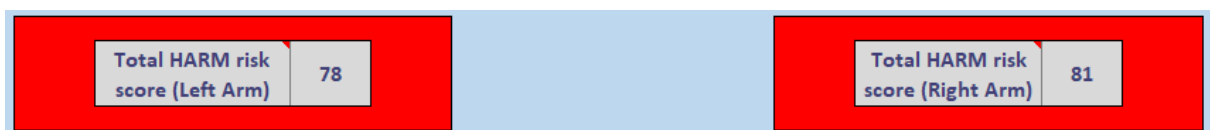


Ilustración 35: Evaluación HARM Caso 2 colocación Clip plano. Fuente: Elaboración Propia.

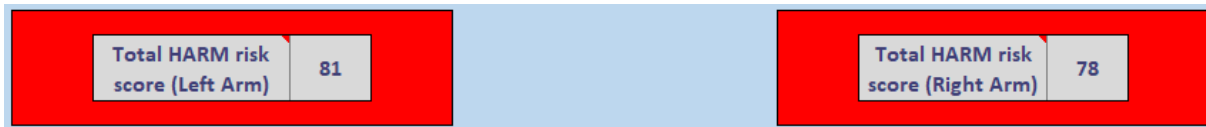


Ilustración 36: Evaluación HARM Caso 2 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

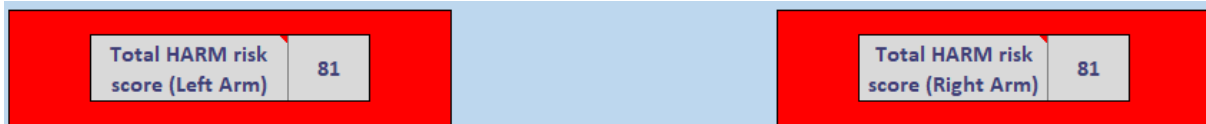


Ilustración 37: Evaluación HARM Caso 3 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

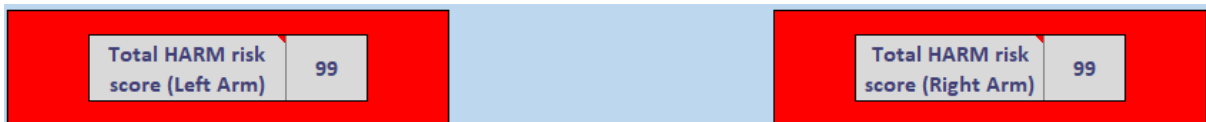


Ilustración 38: Evaluación HARM Caso 3 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

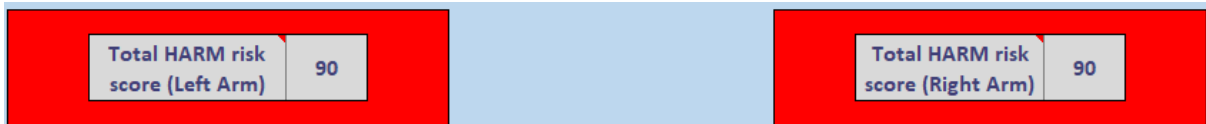


Ilustración 39: Evaluación HARM Caso 4 colocación Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 40: Evaluación HARM Caso 4 colocación Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

4.7 RULA

El siguiente paso en la aplicación consiste en llevar a cabo el método de evaluación RULA (McAtamney & Nigel Corlett, 1993) utilizando el software DHM. Este método ha evaluado las posturas adoptadas por los trabajadores durante el montaje, utilizando los vídeos creados en el software DHM. De estos vídeos se selecciona una postura específica que se considera la más común o problemática durante el montaje. A continuación, utilizando la postura seleccionada del vídeo de cada participante en el software DHM, se aplica el método de evaluación RULA para determinar el nivel de riesgo ergonómico asociado a dicha postura. En este análisis se han tenido en cuenta factores como el peso levantado por el trabajador y la frecuencia con la que repite la tarea a lo largo del día.

En esta sección, se presentan los resultados de la evaluación mediante el método RULA, utilizando las posturas registradas en las *Ilustraciones 18, 19, 20 y 21* de la sección del software DHM. Estos resultados corresponden a cada participante realizando la tarea con cada tipo de clip, y como se puede observar en la *Ilustración 41*, que corresponde al caso 1 colocando el clip plano y en el apéndice 2, donde se muestran el resto de resultados de los casos 1,2,3 y 4, la mayoría de ellos están resaltados en rojo o amarillo.

El código de colores indica que los participantes están adoptando posturas que pueden ser perjudiciales para ellos. Esta situación es especialmente preocupante, ya que estas posturas se repiten con frecuencia a lo largo de la jornada laboral. Es crucial abordar estas posturas para reducir el riesgo de lesiones y mejorar las condiciones ergonómicas en el lugar de trabajo.

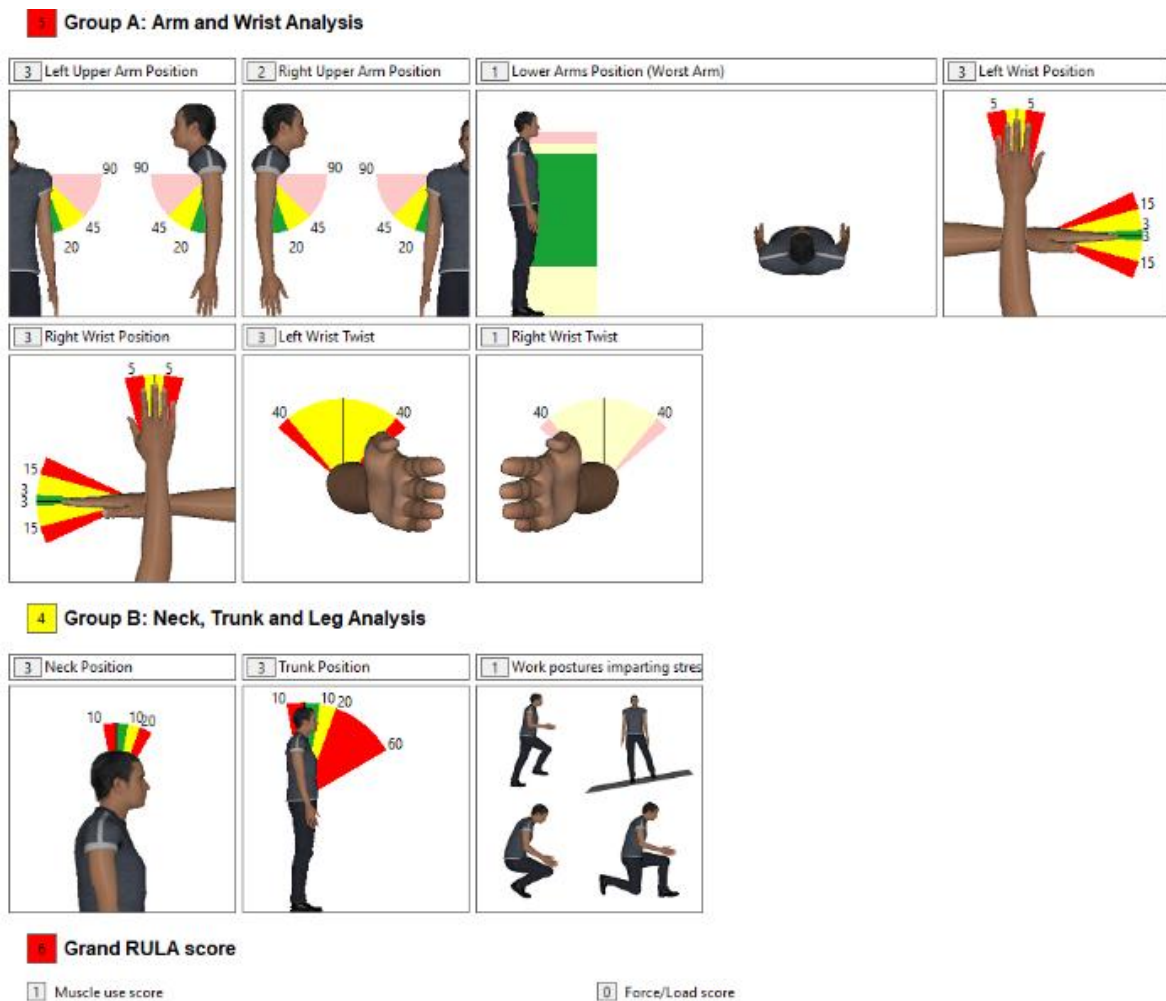


Ilustración 41: Evaluación RULA Caso 1 Colocando el Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

4.8 HandPak

En el siguiente paso de la implementación, se aplicó el método de evaluación ergonómica HandPak. El software se utilizó para determinar las fuerzas y los pares aceptables recomendados específicamente para la tarea de ensamblaje de los clips en el proyecto.

El proceso comenzó con la introducción de datos relevantes sobre la tarea de ensamblaje de clips en el software HandPak (Ilustración 42). Se utilizaron los módulos y parámetros específicos de HandPak para evaluar las demandas de fuerza y par asociadas a esta tarea (Ilustración 43).

Una vez introducidos todos los datos, el software HandPak proporcionó recomendaciones sobre las fuerzas y los pares aceptables para la tarea específica de montaje de clips. Estas recomendaciones

ayudaron a comprender mejor los requisitos de fuerza asociados a la tarea e identificaron cualquier riesgo potencial de lesión.

El método HandPak se integró en el análisis ergonómico global, complementando otros métodos de evaluación utilizados anteriormente. Gracias a HandPak, se obtuvo una comprensión más completa de las exigencias físicas específicas asociadas a la tarea de montaje de clips, lo que permitió tomar decisiones informadas sobre posibles mejoras en el diseño y el proceso.

HANDPAK
Common Inputs and Outputs

Torque: Forearm Pronation or Supination

Percent Capable
Select the percentage of the population for whom you want the task to be acceptable.

Gender
- male
- female

Frequency
Number of discrete efforts per minute (0.002/min gives MVC)

Units of Torque
- N or Nm
- lbs or in-lbs

Duration Range or Value
Specific value (in box >>>)
(duration of each effort)

Specific Duration (s)
Enter specific duration here

Duration Range
Pick from three ranges or enter a specific value

Calculate
determine final acceptable value

Maximum Acceptable Value
This value represents the recommended limit for gender and percent capable selected.

Fast Navigation to each module

Tips

Calculate Max Acceptable Force = 4.93 Nm

Reset all form values

Ilustración 42: Entradas y salidas comunes Software HandPak. Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak

Pushes & Pulls
Finger or Thumb Pushes

Push: with Finger(s) or Thumb(s)

Contact Point(s)
interface location(s)
- One Finger
- 2 Fingers from 1 Hand
- 1 Finger from Both Hands
- 2 Fingers from Both Hands
- One Thumb
- Two Thumbs

Tips(s) or Pad(s) Used?
This indicates whether the contact is with the tip (end) of the finger/thumb or with the pad
- Pad
- Tip

Wrist Posture
- Neutral
- Extended
- Flexed
- Ulnar Deviated

Calculate
Max Acceptable Force = 103.5 N

Gender: Female, Percent Capable: 75, Frequency: 0.002, Duration Range or Value: Under 0.2 seconds (e.g. snipe)

Contact Point(s): One Hand: Index and 2nd Finger (Interface with hand(s))

Tips(s) or Pad(s) Used?: Pad (Contact location on digit(s))

Wrist Posture: Neutral (Best description of wrist posture)

Ilustración 43: Software de empuje de pulgares HandPak. Fuente: [Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak](http://potvinbiomechanics.com/handpak)

Como resultado de la evaluación del Handpak, que puede verse en la *Ilustración 44*, se estima hipotéticamente la fuerza necesaria basándose en los datos proporcionados. En este escenario, se ha supuesto que la fuerza se aplica presionando con los pulgares. La salida del software sugiere que la fuerza máxima aceptable en esta situación es de 70 N, lo que supera la fuerza real calculada anteriormente, pero sigue sin justificar la fuerza medida por el sensor que indica la fuerza ejercida por los participantes. En conclusión, es evidente que es necesario mejorar este proceso de ensamblaje.

The screenshot shows the HandPak software interface. At the top, there is a navigation bar with links for Home, About, HandPak, BakPak, and Contact. Below the navigation bar, the text "Welcome to HandPak" is displayed, followed by the instruction "Select a module below to get started:". A dropdown menu is set to "Push: with Finger(s) or Thumb(s)". The main form contains several input fields:

- Gender:** Female
- Percent Capable:** 75
- Units of Force:** newtons (N)
- Frequency:** 0.25
- Duration Range or Value:** 0.6 to 0.8 second range
- Specific Duration (s):** 0
- Contact Point(s):** One Hand: Thumb
- Tip(s) or Pad(s) Used?:** Pad
- Wrist Posture:** Neutral

To the right of the form is a diagram of a hand with a green arrow pointing downwards from the thumb, indicating the direction of force application. At the bottom of the form, a green "Calculate" button is followed by a box displaying the result: "Max Acceptable Force = 70.9 N".

Ilustración 44: Evaluación HandPak. Fuente: potvinbiomechanics.com/handpak

En resumen, todos los resultados obtenidos en el análisis inicial revelan que los trabajadores realizan un esfuerzo considerable debido a la incertidumbre sobre si el clip está correctamente colocado o no, medida por el sensor de fuerza. Esta incertidumbre provoca que se aplique una fuerza excesiva, ya que los participantes se inclinan excesivamente sobre el parachoques para fijar el clip, doblando el cuello, la espalda y forzando los brazos en exceso, lo que se ha evaluado en RULA. A raíz de ello, se han establecido especificaciones de requisitos para rediseñar los clips.

5 Requisitos de Diseño

La lista de requisitos de diseño se ha elaborado a partir de todos los pasos dados durante la aplicación. Esta lista especifica los criterios y características que debe cumplir el nuevo diseño de la pinza para garantizar la mejora ergonómica y la eficacia del proceso de montaje. Esta especificación de requisitos ha servido de guía principal para el equipo de diseño, proporcionando una descripción detallada de las necesidades y expectativas del proyecto. Estos requisitos han servido como punto de referencia para evaluar y validar el diseño final, garantizando que cumple las normas ergonómicas y funcionales establecidas. En resumen, la lista de requisitos ha sido una herramienta fundamental para garantizar que el diseño resultante satisface las necesidades identificadas durante el proceso de implantación.

Se han desarrollado dos conjuntos de especificaciones de requisitos: uno para los dos tipos de pinzas que utilizan actualmente los operarios (tabla 2), y otro para un rediseño destinado a la colaboración entre humanos y robots (tabla 3). En este último caso, se trata de diseñar una pinza específica para la colaboración entre humanos y robots, con el concepto de que el humano coloca la pinza en su posición mientras el robot aplica presión para asegurarla. Estas especificaciones describen los distintos criterios y funcionalidades requeridos para cada tipo de pinza, garantizando que satisfacen las necesidades ergonómicas y operativas de sus respectivos procesos de montaje.

Tabla 2: Requisitos de diseño, clips para el bienestar de los trabajadores

REQUISITOS DE DISEÑO, CLIPS para el bienestar de los trabajadores							
N.º	Requerido/ Deseado	Criterio	Descripción	Valor Ideal	Unidad	Método de medida	Fuente
Dimensiones							
1.1	R	Tamaño Adecuado	El clip debe ser del tamaño de los dedos del trabajador. (dos pulgares)	$4 < x < 6$	cm	Cinta métrica	Observación
1.2	R	Tamaño del orificio del parachoques	El clip debe ajustarse al tamaño del orificio del parachoques donde se inserta.	7	mm	Cinta métrica	Observación
1.3	R	Compatibilidad con el mazo	El clip debe ajustarse a diferentes tamaños y formas de mazos de cables.	$1 < x < 4$	cm	Cinta métrica	Observación

Diseño							
2.1	R	Agarre sólido	El clip debe proporcionar un buen agarre para facilitar su manipulación.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
Material							
3.1	R	Material flexible	Utilice un material que permita cierta flexibilidad durante la inserción.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
3.2	R	Material resistente	El material debe ser lo suficientemente fuerte como para no romperse.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
Funciones							
4.1	D	Bloqueo seguro	Asegúrese de que el clip se bloquea firmemente en su sitio para evitar que se suelte accidentalmente.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
4.2	D	Facilidad de inserción	El clip debe permitir una inserción suave y sin esfuerzo en el mazo de cables.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
4.3	R	Reducción de la fuerza	Las características de diseño deben tener como objetivo minimizar la fuerza ejercida por los operarios durante la tarea.	X<45	N		Análisis Inicial

Tabla 3: Requisitos de diseño, clips para la colaboración humano - robot

REQUISITOS DE DISEÑO, CLIPS para la colaboración entre humanos y robots							
Nº	Requerido/ Deseado	Criterio	Descripción	Valor Ideal	Unidad	Método de medida	Fuente
Dimensiones							
1.1	R	Compatibilidad con la herramienta del robot	Las dimensiones del clip deben ser compatibles con la herramienta utilizada por el robot.	3	cm	Cinta métrica	Observación
1.2	R	Tamaño del orificio del parachoques	El clip debe ajustarse al tamaño del orificio del parachoques donde se inserta.	7	mm	Cinta métrica	Observación
1.3	R	Compatibilidad con el mazo	El clip debe ajustarse a diferentes tamaños y formas de mazos de cables.	$1 < x < 4$	cm	Cinta métrica	Observación
Diseño							
2.1	R	Superficie de agarre	Debe tener una superficie que facilite el agarre por parte del robot.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
Material							
3.1	R	Material flexible	Utilice un material que permita cierta flexibilidad durante la inserción.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial

Material							
3.2	R	Material resistente	El material debe ser lo suficientemente fuerte como para no romperse.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
Funciones							
4.1	D	Bloqueo seguro	Asegúrese de que el clip se bloquea firmemente en su sitio para evitar que se suelte accidentalmente.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
4.2	D	Facilidad de inserción	El clip debe permitir una inserción suave y sin esfuerzo en el mazo de cables.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial
4.3	D	Detección de colocación incorrecta	El clip debe estar diseñado para que el robot pueda detectarlo si no está colocado correctamente, lo que le permitirá corregir la colocación.	Sí	Sí/No		Análisis Inicial

Para concluir, el montaje actual del arnés de cables en el parachoques presenta importantes retos ergonómicos para el trabajador, que deben abordarse con prontitud. Para lograrlo, se rediseñaron los clips con el fin de mejorar el proceso de ensamblaje. En la sección siguiente se presentan todos los resultados del diseño.

6 Diseño

Cada etapa del proceso de diseño se ha llevado a cabo con el objetivo de mejorar la ergonomía y la eficiencia del sistema, garantizando que los productos finales cumplan los requisitos específicos establecidos inicialmente. A continuación, se detallan los pasos clave utilizados en el proceso de diseño, desde la lluvia de ideas inicial hasta la impresión 3D de los diseños finales.

6.1 Lluvia de Ideas

Durante esta fase, se generaron diversas ideas para el rediseño de los clips utilizados en la estación de montaje de mazos de cables (Ulrich et al., 2020). Se fomentó la exploración creativa de diferentes enfoques para mejorar la ergonomía y la eficiencia de los clips. Las especificaciones generadas a partir de la evaluación inicial sirvieron de guía para orientar las ideas hacia soluciones que abordaran los retos ergonómicos identificados. Se dio prioridad a los conceptos que cumplieran estas especificaciones y ofrecían mejoras significativas en términos de ergonomía y eficiencia.

Durante la fase de lluvia de Ideas se generaron diversas ideas para el rediseño de los clips, teniendo en cuenta los requisitos específicos establecidos durante la fase de implementación. De la sesión de Lluvia de Ideas surgieron las siguientes ideas:

TAMAÑO ADECUADO

1. Diseño ergonómico: El clip debe tener una forma que se adapte cómodamente a la mano del trabajador, con bordes redondeados para evitar puntos de presión incómodos.
2. Tamaño adecuado: El clip debe ser lo suficientemente grande como para ser manipulado con facilidad, pero no tan grande como para resultar incómodo o difícil de manejar.

COMPATIBILIDAD CON EL MAZO DE CABLE

3. Agarre ajustable al mazo de cable (por ejemplo, con velcro): Desarrollar un clip que pueda adaptarse a varios tamaños de mazo de cable, proporcionando un agarre ajustable para acomodar diferentes dimensiones de cable de manera efectiva y segura.

SUJECIÓN SÓLIDA

4. Superficie de agarre texturizada: Una superficie de agarre con una textura antideslizante, como pequeñas protuberancias o ranuras, para mejorar el agarre y reducir el riesgo de deslizamiento durante el uso.
5. Respuesta táctil: Los clips podrían proporcionar una retroalimentación táctil al trabajador cuando se colocan correctamente, como un clic o una ligera resistencia al empujar.
6. Mecanismo de palanca: Integrar un diseño que permita a la palanca de mano del trabajador aplicar presión adicional al clip, facilitando su inserción en el mazo de cable.
7. Mayor superficie de agarre: Ampliar la superficie de agarre de la pinza distribuye la fuerza aplicada por el trabajador sobre un área mayor, reduciendo potencialmente la presión sobre puntos concretos y facilitando la aplicación de la presión necesaria.

DISEÑO

8. **Inclinación interna:** La parte interna del clip podría estar ligeramente inclinada para facilitar la deformación y permitir una inserción más suave en el mazo de cables.
9. **Forma ergonómica:** Diseñar el clip con una forma ergonómica que imite la curvatura de los dedos, mejorando el agarre y la manipulación.
10. **Combinación de formas convexas y cóncavas:** Incorporación de zonas cóncavas y convexas en el diseño del clip para una distribución más uniforme de la presión durante su uso.
11. **Fácil desenganche:** Diseñando el clip de forma que pueda ser fácilmente desenganchado cuando sea necesario, sin requerir un esfuerzo excesivo por parte del trabajador.
12. **Marca distintiva:** Incorporar una marca o código de colores en el clip para facilitar su identificación y selección por parte de los trabajadores.

BLOQUEO SEGURO

13. **Agarre de mano:** Crear un agarre de mano del mazo de cable ajustable para evitar que el trabajador empuje directamente el cable al presionar el clip en su sitio. En su lugar, el trabajador empuja sobre la empuñadura, minimizando el riesgo de dañar el cable.

REDUCCIÓN DE LA FUERZA

14. **Indicador visual de posición:** Integrando un material especial en el interior del clip que cambia de color cuando se aplica presión, proporcionando una clara indicación visual al trabajador de que está correctamente colocado.
15. **Mecanismo de visión externa:** Diseñar el clip para que incorpore una lengüeta o lengüeta en su exterior que se mueva o sobresalga cuando el clip esté correctamente colocado. Por ejemplo, al insertar el clip, esta lengüeta podría deslizarse hacia fuera, revelando un indicador verde fácilmente visible para el trabajador.

MATERIAL FLEXIBLE

16. **Material flexible pero resistente:** Utilizar un material lo suficientemente flexible como para deformarse fácilmente durante la inserción, pero lo suficientemente resistente como para mantener su forma y funcionalidad.

COLABORACIÓN HUMANO-ROBOT

17. **Clip de colaboración humano-robot:** Desarrollar un clip rediseñado específicamente para la colaboración humano-robot, en el que el trabajador humano coloca el clip en su posición y el robot se encarga de aplicar presión. Este diseño implica la creación de un agarre adaptado a la herramienta del robot que presiona el clip en su sitio. Al integrar esta función de colaboración, el proceso se vuelve más eficiente y ergonómico, ya que el robot ayuda en la tarea físicamente exigente de aplicar presión al clip.

DETECCIÓN DE ERRORES DE COLOCACIÓN

18. Incluir un código de respuesta rápida (QR) en el rediseño del clip adaptado para la colaboración humano-robot. Este código QR serviría para que el robot leyera si la pinza está colocada correctamente o no. Cuando se coloque correctamente, el código QR cambiará, lo que permitirá al robot reconocer que la pinza está en la posición correcta y dejar de aplicar presión.

Estas ideas se desarrollaron con el objetivo de mejorar la ergonomía y la eficiencia del proceso de colocación de clips, teniendo en cuenta las necesidades y requisitos identificados durante el análisis inicial del proyecto.

6.2 Bocetos

En esta fase se elaboraron bocetos y dibujos detallados de los conceptos generados durante la lluvia de ideas (Ulrich et al., 2020). En la creación de los bocetos se tuvieron en cuenta los requisitos de diseño, garantizando que cada diseño propuesto cumpliera los criterios establecidos. Los bocetos se centraron en integrar las características necesarias para satisfacer las necesidades ergonómicas identificadas, manteniendo al mismo tiempo la viabilidad técnica y la fabricabilidad. Se crearon bocetos para tres tipos de clips: diseños para los dos tipos de clips orientados al operario y otro tipo específico para la colocación por el operario con prensado robotizado.

Durante la fase de creación de bocetos, se tuvieron en cuenta las especificaciones de los requisitos y las ideas propuestas en la sesión previa de lluvia de ideas. Las ideas derivadas de ello y que se han utilizado para los rediseños son:

1. Empuñadura: Diseñar un agarre que facilite la aplicación de presión, evitando dañar el cable y centrando la fuerza en la pinza y no en el propio cable.
2. Agarre de cable ajustable: Permitiendo que los clips se adapten a diferentes tamaños de mazos de cables, proporcionando versatilidad en su uso.
3. Indicador visual: Implementación de un indicador visual para garantizar la correcta colocación del clip. Se eligió esta opción porque un indicador acústico podría perderse entre el ruido de la fábrica, y uno táctil podría ser difícil de percibir con guantes.
4. Bocetos adaptados a la colaboración humano-robot: Centrado en un diseño específico para la colaboración entre humanos y robots, con un agarre adaptado a la herramienta del robot y un sistema de verificación de la colocación mediante un código QR.

Los bocetos presentados en la *Ilustración 45* muestran diseños adaptados a los operarios, atendiendo tanto al primer como al segundo tipo de clip existente en la estación de parachoques. En la *Ilustración 46*, se muestran bocetos adaptados a la colaboración humano-robot, respetando las directrices antes mencionadas. Además, en los bocetos se han incluido las especificaciones de los requisitos, junto con las ideas generadas en la sesión de lluvia de ideas.

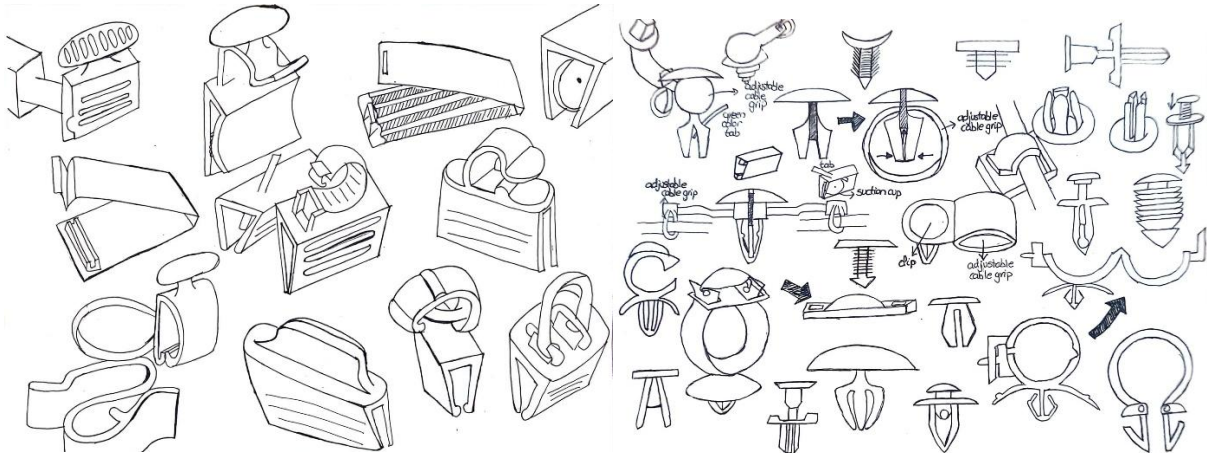


Ilustración 45: Bocetos Clip Plano y Circular. Fuente: Elaboración Propia.

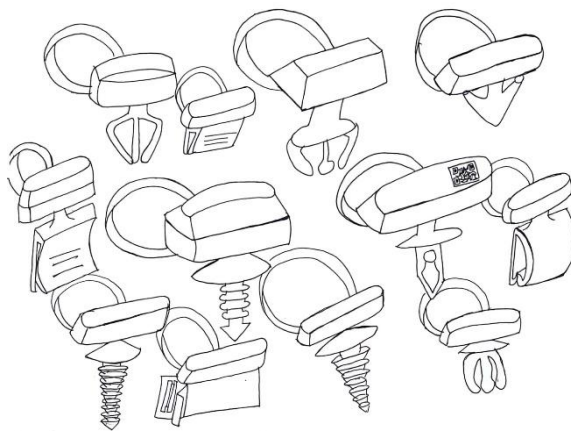


Ilustración 46: Bocetos Clip Colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.

6.3 Generación de Conceptos

Los bocetos se transformaron en conceptos de diseño más definidos y detallados. Los conceptos de diseño se generaron teniendo en cuenta las especificaciones establecidas previamente (Ulrich et al., 2020). Las ideas se refinaron para garantizar que cada concepto abordaba eficazmente los problemas ergonómicos identificados y cumplía los criterios establecidos en las especificaciones. Se dio prioridad a los conceptos que ofrecían soluciones innovadoras y viables que mejoraban la ergonomía y la eficiencia del proceso. Se crearon seis conceptos para cada tipo de clip.

Durante la fase de generación de conceptos, se desarrollaron seis conceptos para cada tipo de clip: plana, circular y para la colaboración entre humanos y robots. El clip plano y el clip circular en este proyecto no se podían combinar porque entonces se entraría en el rediseño del propio parachoques, algo en lo que no se quiere entrar en este proyecto, así que se han rediseñado los clips existentes. Estos conceptos surgieron de una mezcla de varias ideas extraídas de los bocetos presentados en la sección anterior. A continuación, se procede a explicar detalladamente cada uno de estos conceptos.

6.3.1 Clip plano

Todos los conceptos del Clip Plano comparten un elemento crucial: el diseño del agarre adaptado al ser humano. Este diseño ergonómico se concibió para facilitar la manipulación por parte de los trabajadores. Esta idea destacó durante la fase de lluvia de ideas y bocetos, lo que llevó a su implementación en todos los conceptos desarrollados. Además, los conceptos 1, 2 y 5, representados en las *Ilustraciones 47 y 49* respectivamente, comparten un tipo específico de agarre del cable, elegido por su versatilidad y capacidad para ajustarse a diferentes tamaños de cable. Esta decisión concuerda con la idea original de disponer de una empuñadura de cable ajustable, tal y como se definió en la fase de bocetado. Por otro lado, los conceptos 1 y 6, representados en las *Ilustraciones 47 y 49* respectivamente, tienen una forma de clip similar, lo que los distingue visualmente de los demás.

Ahora, en cuanto a las diferencias entre los conceptos:

El Concepto 1, que se puede ver en la *Ilustración 47* presenta características que también se encuentran en otro de los seis conceptos desarrollados. El concepto 2, que puede verse en la *Ilustración 47*, por su parte, destaca por la forma redondeada de su clip, que puede ofrecer ciertas ventajas en términos de seguridad y agarre.

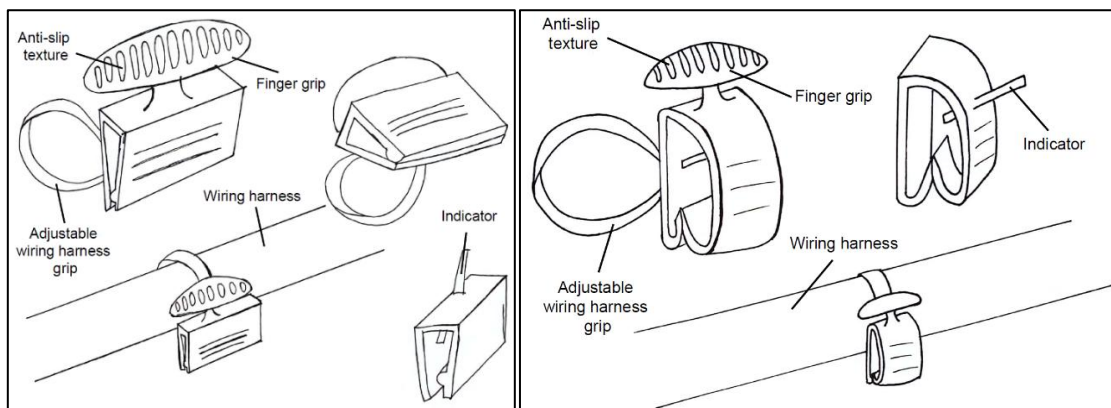


Ilustración 47: Concepto 1 y 2 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

Los conceptos 3 y 4, que pueden verse en la *Ilustración 48*, introducen un nuevo diseño de clip para cables en forma de gancho, que proporciona una alternativa robusta y segura para sujetar los cables en su sitio. Además, la forma específica de sus pinzas permite una sujeción firme, facilitando la instalación y reduciendo el riesgo de desprendimiento.

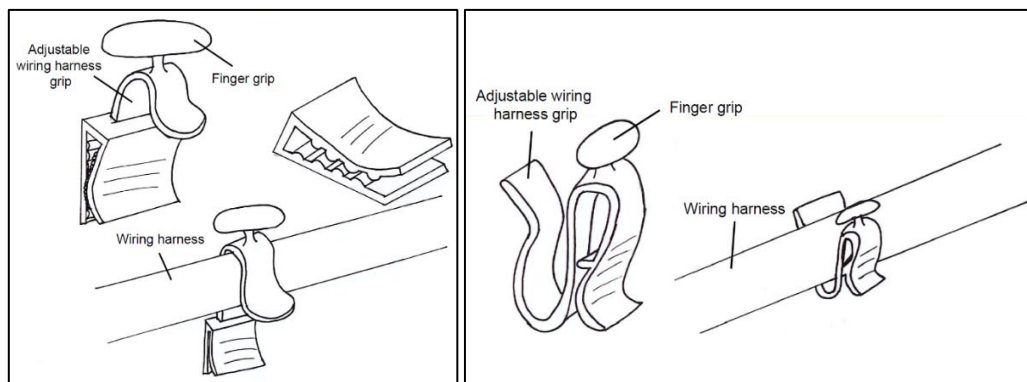


Ilustración 48: Concepto 3 y 4 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

El concepto 5, que puede verse en la *Ilustración 49*, se distingue por su forma de pinza, que proporciona un agarre adicional en un lado del clip, lo que puede ser útil en determinadas aplicaciones específicas. Por último, el concepto 6, que puede verse en *la Ilustración 49*, se distingue por el agarre desmontable del cable, lo que facilita la instalación y sustitución de las pinzas según sea necesario. Además, en este concepto, el cable se empuja junto con el clip.

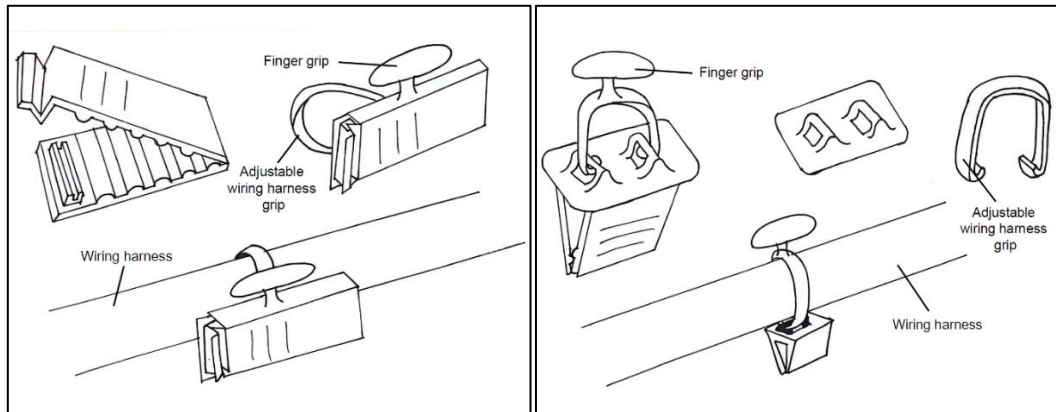


Ilustración 49: Concepto 5 y 6 del Clip Plano. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2 Clip Circular

En todos los conceptos del diseño Circular Clip, una característica clave es el agarre ergonómico adaptado a la manipulación humana, un aspecto fundamental identificado durante la fase de lluvia de ideas y bocetos. Cada concepto ofrece características únicas:

El concepto 1 presenta un agarre de cable tubular para una fijación segura e incluye un indicador visual que mejora la facilidad de uso (*Ilustración 50*). El concepto 2 presenta un diseño distinto de la empuñadura del cable con un indicador visual interno, lo que ofrece opciones de manipulación alternativas (*Ilustración 50*).

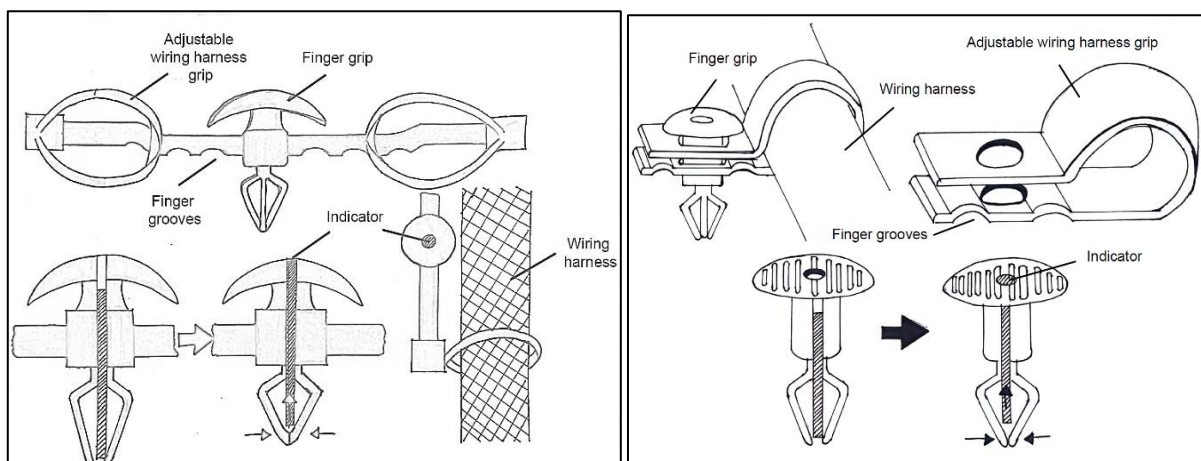


Ilustración 50: : Concepto 1 y 2 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

El concepto 3 introduce un agarre del cable que pasa por el centro del clip, proporcionando una presión adicional del cable durante la instalación, junto con un indicador visual único en forma de lengüeta verde. El concepto 4 hace hincapié en una mayor movilidad del clip, lo que facilita la instalación y el ajuste.

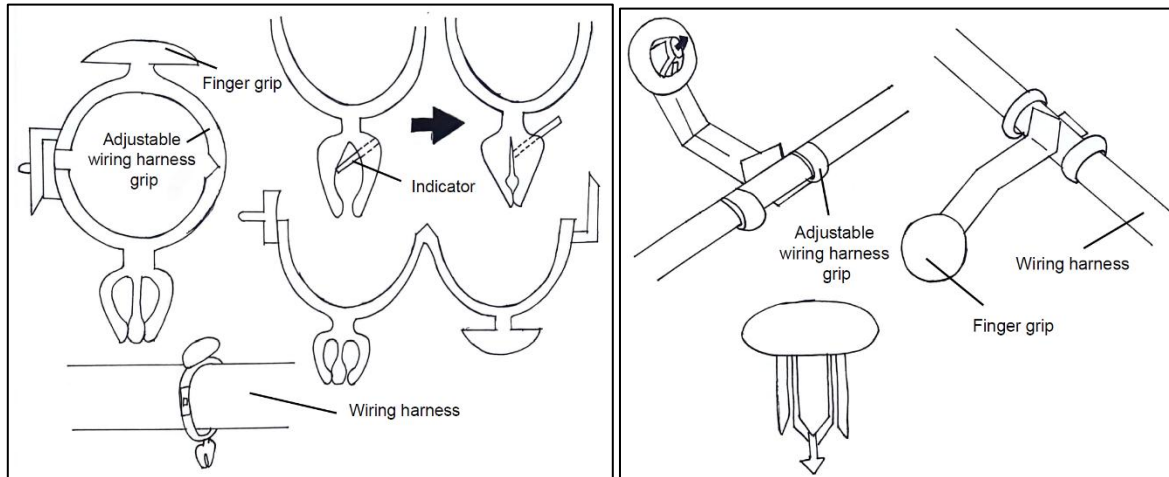


Ilustración 51: Concepto 3 y 4 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

Concept 5 destaca por su diseño robusto y su mayor movilidad, ofreciendo una mayor durabilidad y facilidad de uso. El Concepto 6 incorpora una empuñadura de cable ajustable para facilitar la instalación y la sustitución, junto con un indicador visual similar al del Concepto 3.

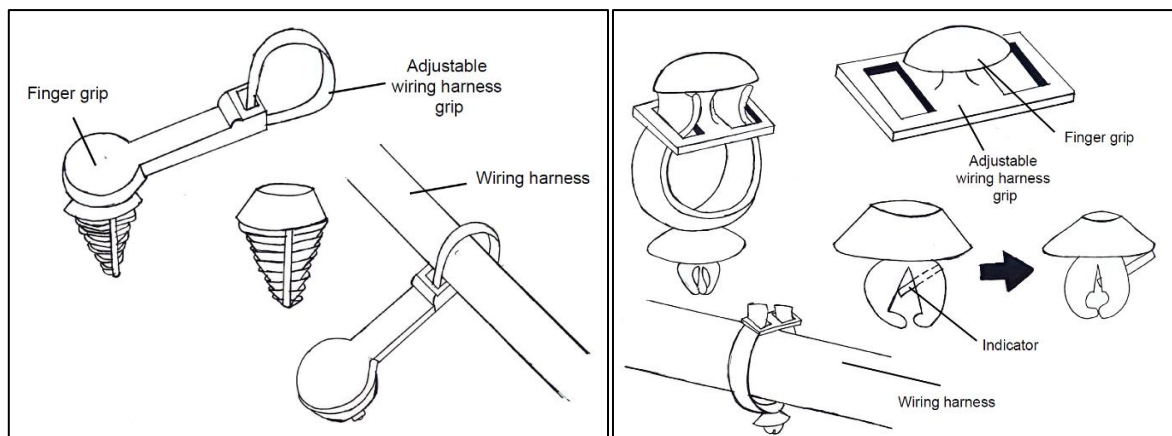


Ilustración 52: Concepto 5 y 6 del Clip Circular. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.3 Clip Colaboración Humano – Robot

El diseño del clip rediseñado para la implantación de la colaboración entre humanos y robots se basa en la premisa de que los humanos colocan el clip y el robot aplica presión. A diferencia de los clips diseñados para la manipulación humana, se ha priorizado la eficiencia en el proceso de sujeción, permitiendo que el robot ejerza la fuerza necesaria. Este planteamiento ha llevado a la creación de nuevos diseños de clips que combinan elementos destacados de los clips planos y circulares desarrollados anteriormente. Tras la iteración y corrección de errores de los diseños anteriores, se han generado tres conceptos para cada tipo de clip, con los conceptos 1, 2 y 3 para el clip plano, y los conceptos 4, 5 y 6 para el clip circular. Cada diseño incorpora un código QR con un cilindro central que,

cuando se coloca correctamente, el cilindro sube cambiando el código QR para que el robot detecte la correcta colocación del clip, asegurando una fijación adecuada. Además, todos los clips están adaptados a la herramienta del robot, como se muestra en la *ilustración 3*, y garantizan un agarre óptimo del mazo de cables. Esta diversidad de diseños ofrece flexibilidad y eficacia en el proceso de montaje sin necesidad de modificar el parachoques existente.

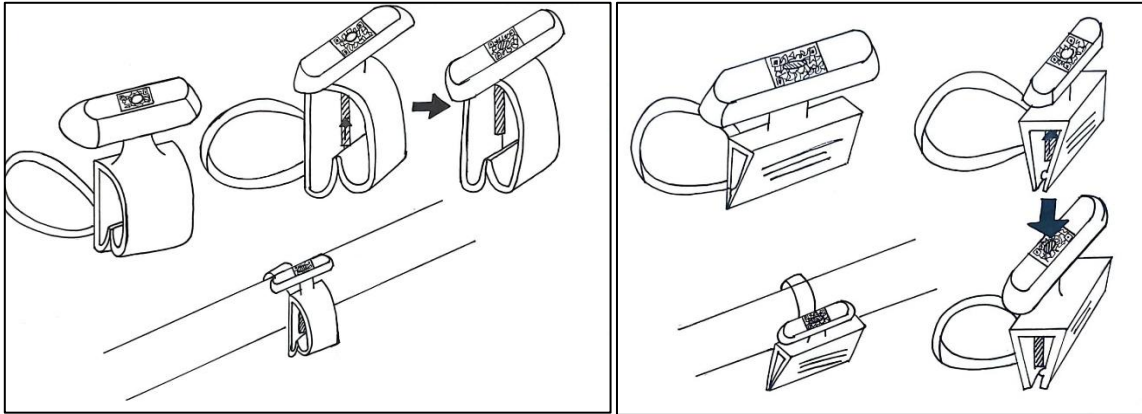


Ilustración 53: Concepto 1 y 2 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.

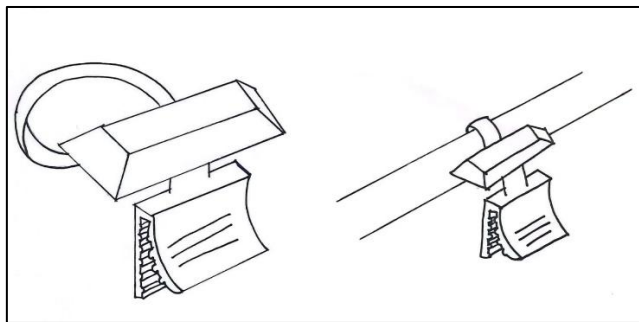


Ilustración 54: Concepto 3 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.

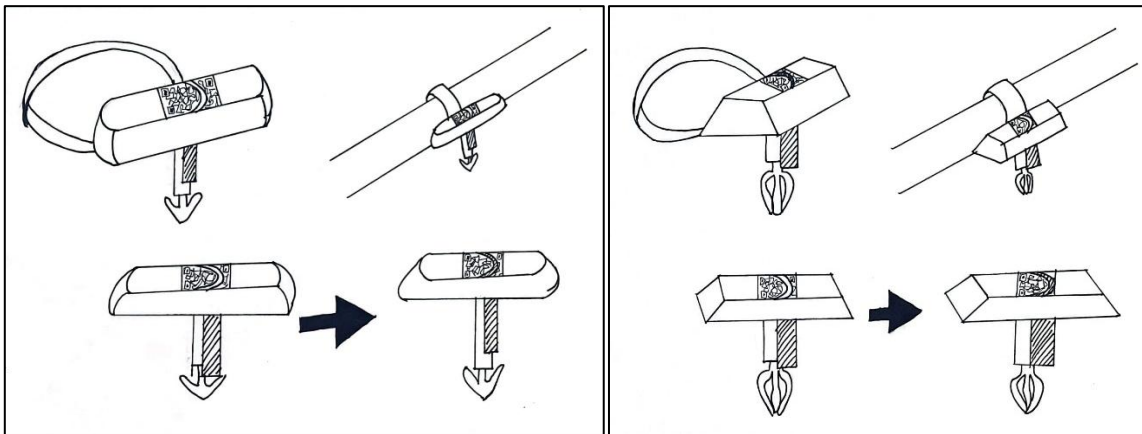


Ilustración 55: Concepto 4 y 5 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.

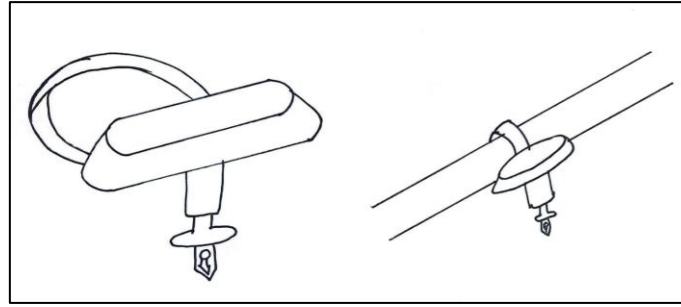


Ilustración 56: Concepto 6 del Clip colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración Propia.

6.4 Evaluación de Diseños

Los diseños se evaluaron utilizando la matriz de Pugh, considerando las especificaciones como criterios de evaluación (Ulrich et al., 2020). Se asignaron pesos a cada criterio en función de su importancia relativa, reflejando las necesidades ergonómicas y funcionales identificadas en la evaluación inicial. Se compararon los diseños y se seleccionaron los que mejor cumplían las especificaciones establecidas y ofrecían las mayores mejoras en ergonomía y eficiencia. De los seis conceptos creados para cada tipo de pinza se eligieron los tres más votados en la matriz de Pugh.

Durante la fase de evaluación del diseño, se ha utilizado el método de la matriz de Pugh. Se crearon tablas individuales para cada tipo de clip: Plana, Circular y para colaboración humano-robot, englobando todas las especificaciones de requisitos previamente establecidas. Cada concepto generado durante la fase de diseño se sometió a una evaluación relativa a estas especificaciones, recibiendo una puntuación de 2, 1 o -1 en función del grado de cumplimiento de cada requisito. «1» corresponde a «Cumple el criterio, pero no es ideal», «2» a «Cumple bien el criterio» y «-1» a «No cumple bien el criterio».

Los conceptos que obtuvieron las puntuaciones más altas, indicando su rendimiento superior en la evaluación, fueron elegidos para pasar a la siguiente fase del proceso de diseño. Este enfoque sistemático facilitó la identificación objetiva de los conceptos más prometedores, considerados los más adecuados para cumplir los requisitos establecidos y abordar los objetivos del proyecto. Los resultados de esta evaluación se explicaron detalladamente, aclarando el proceso de selección de los conceptos más destacados. Los cuadros 4, 5 y 6 muestran la evaluación del diseño mediante el método de la matriz de Pugh, que se llevó a cabo con los conceptos desarrollados en la fase anterior.

Tabla 4: Matriz Pugh Clip Plano

FLAT CLIP						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Suitable size	2	2	2	2	2	2
Size of bumper hole	2	2	2	2	2	1
Compatibility with harness	2	2	1	1	2	1

FLAT CLIP						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Ergonomic design	2	1	1	1	1	1
Solid grip	2	2	2	2	2	2
Flexible material	2	2	2	2	1	1
Resilient material	2	2	2	1	1	2
Secure locking	1	2	2	2	2	1
Easy of insertion	1	2	1	1	-1	1
Force Reduction	2	2	-1	-1	-1	-1
TOTAL	18	19	14	13	11	11

Los tres diseños ganadores para los clips planos son los conceptos 1, 2 y 3, como puede verse en la tabla 4. Los conceptos 1 y 2 destacaron principalmente porque cumplen el criterio crucial de reducir la fuerza necesaria para la instalación. Los conceptos 1 y 2 destacaron principalmente porque cumplen el criterio crucial de reducir la fuerza necesaria para la instalación. Ambos diseños incorporan un indicador que ayuda a los trabajadores a ver cuándo el clip está bien colocado, algo de lo que carecen los demás conceptos. Este indicador reduce el esfuerzo innecesario y mejora las condiciones ergonómicas de los trabajadores.

Se eligió el concepto 3 por su agarre excepcionalmente fuerte y su exclusivo método de sujeción del cable. Este diseño permite prefijar los clips, por lo que los trabajadores sólo tienen que fijar los cables, reduciendo significativamente la cantidad de fuerza necesaria durante la instalación. Esta versatilidad convierte al Concept 3 en una solución eficaz para mejorar la eficiencia y reducir el esfuerzo físico.

Tabla 5: Matriz Pugh Clip Circular

CIRCULAR CLIP						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Suitable size	2	2	2	2	2	2
Size of bumper hole	2	2	2	2	2	2
Compatibility with harness	2	1	-1	2	2	-1
Ergonomic design	2	2	-1	1	1	-1

CIRCULAR CLIP						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Solid grip	2	2	2	2	2	2
Flexible material	2	2	2	2	2	1
Resilient material	2	2	2	1	2	1
Secure locking	2	2	2	1	2	1
Easy of insertion	2	2	-1	2	2	-1
Force Reduction	2	2	2	-1	-1	2
TOTAL	20	19	11	14	16	8

En el caso de los clips circulares, los diseños ganadores son los conceptos 1, 2 y 5, como se muestra en la tabla 5. El concepto 1 resultó ganador porque cumplía eficazmente todos los criterios de evaluación. El concepto 2 también obtuvo buenos resultados en varios criterios, asegurándose el segundo puesto. Por último, el concepto 5 destacó por su diseño robusto y duradero.

Se eligió el concepto 5 porque su diseño es más sólido que el de los demás conceptos, lo que le confiere mayor resistencia y longevidad. Por ejemplo, los conceptos 3 y 6 tienen un mecanismo de prensado directo del cable, lo que podría suponer una desventaja. Este posible problema ayudó al Concepto 5 a convertirse en uno de los tres ganadores, gracias a su mayor resistencia y fiabilidad.

Tabla 6: Matriz Pugh Clip colaboración Humano - Robot

CLIP HUMAN-ROBOT COLLABORATION						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Compatibility with robot tool	2	2	2	2	2	2
Size of bumper hole	2	2	2	2	2	2
Compatibility with harness	2	2	2	2	2	2
Robust design	2	1	-1	2	1	-1
Grip Surface	2	2	2	2	2	2
Flexible material	2	2	2	2	2	2

CLIP HUMAN-ROBOT COLLABORATION						
CRITERIA	CONCEPT 1	CONCEPT 2	CONCEPT 3	CONCEPT 4	CONCEPT 5	CONCEPT 6
Resilient material	2	2	2	2	2	2
Secure locking	1	-1	2	2	2	-1
Ease of insertion	1	2	-1	2	1	2
Misplacement detection	2	2	-1	2	2	-1
TOTAL	18	16	11	20	18	11

Para los clips adaptados a la herramienta robótica y a la colaboración humano-robot, basó las selecciones en los diseños de clip plano y circular existentes. El objetivo era elegir los diseños más votados, seleccionando uno de los tres conceptos correspondientes al clip plano y dos de los clips circulares, o viceversa. Al final, resultó que los diseños más votados incluían un clip plano y dos clips circulares, por lo que no es necesario considerar la posibilidad de garantizar una mezcla de tipos de clip, ya que se alinearon de esta forma de forma natural.

Los conceptos ganadores fueron 1, 4 y 5, que superaron a los conceptos 3 y 6 al cumplir el criterio de detección de colocación errónea mediante la integración de un indicador. El concepto 2 no fue elegido por no cumplir el criterio de bloqueo seguro. Por tanto, los ganadores finales fueron los conceptos 1, 4 y 5.

6.5 Diseño Asistido Por Ordenador (CAD)

Los conceptos seleccionados se transfirieron a programas de diseño asistido por ordenador (CAD) para su modelización tridimensional, asegurándose de que los requisitos de diseño quedaban reflejados en los modelos CAD (Ulrich et al., 2020). Se crearon modelos virtuales detallados que incorporaban todas las características necesarias para cumplir los criterios establecidos en las especificaciones. En esta sección, se presentan los diseños ganadores de la sección anterior, creados en CAD. En primer lugar, pueden verse los diseños para el clip plano.

6.5.1 Clip plano

6.5.1.1 Concepto 1

El concepto 1, que puede verse en la figura 57, presenta una forma redondeada que se corresponde con la empuñadura, con una textura antideslizante para mayor seguridad. La forma del propio clip está adaptada para encajar con seguridad en el punto de enganche designado en el parachoques, incluyendo un saliente que proporciona seguridad adicional para garantizar que el clip no se desprenda. Este diseño también incluye un indicador de lengüeta, que funciona empujándose hacia

fuera cuando el clip está correctamente enganchado, señalando al trabajador que deje de aplicar fuerza. Además, cuenta con un agarre ajustable para el mazo de cables, que podría asemejarse a una brida para cables.

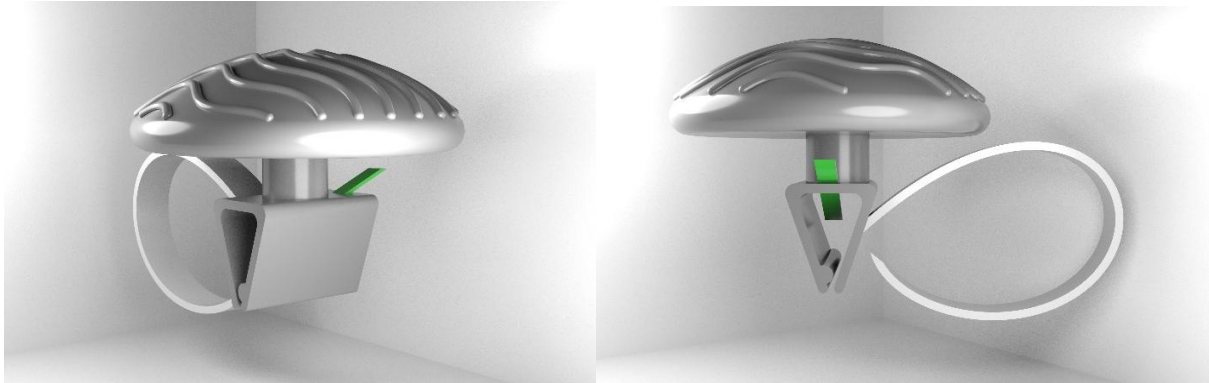


Ilustración 57: Concepto 1 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.

6.5.1.2 Concepto 2

El Concepto 2, que puede verse en la Figura 58, es bastante similar al Concepto 1, compartiendo la empuñadura antideslizante, el indicador de lengüeta y la fijación ajustable del arnés de cables. Sin embargo, presenta un diseño de cabezal diferente que ofrece mayor seguridad y una fijación más fiable al parachoques, garantizando que el clip permanezca en su sitio una vez instalado.

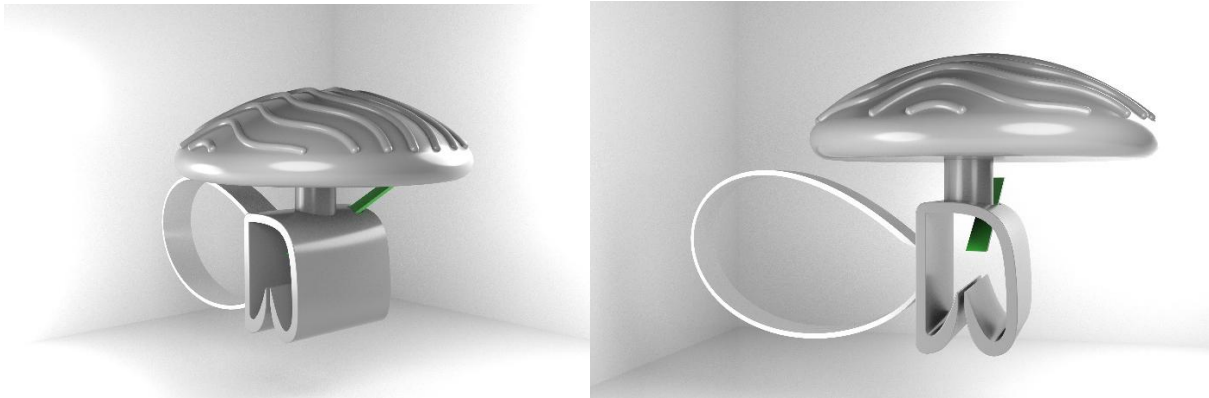


Ilustración 58: Concepto 2 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.

6.5.1.3 Concepto 3

El concepto 3, que puede verse en la figura 59, difiere significativamente de los dos primeros conceptos. Aunque tiene un diseño de empuñadura similar, carece de la textura antideslizante. Este concepto no incluye un indicador de lengüeta, lo que puede reducir su facilidad de uso. El enganche del mazo de cables está situado en el centro de la pinza, lo que puede ejercer presión sobre el cable. Además, la cabeza de este clip presenta más protuberancias que los otros dos conceptos, lo que proporciona mayor seguridad y garantiza que el clip permanezca firmemente sujeto.

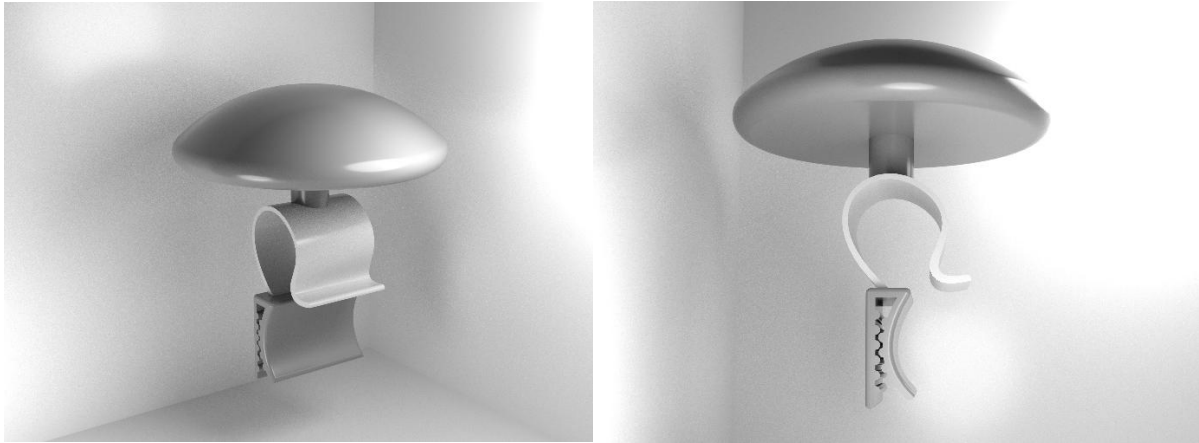


Ilustración 59: Concepto 3 Clip Plano. Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 Clip Circular

6.5.2.1 Concepto 1

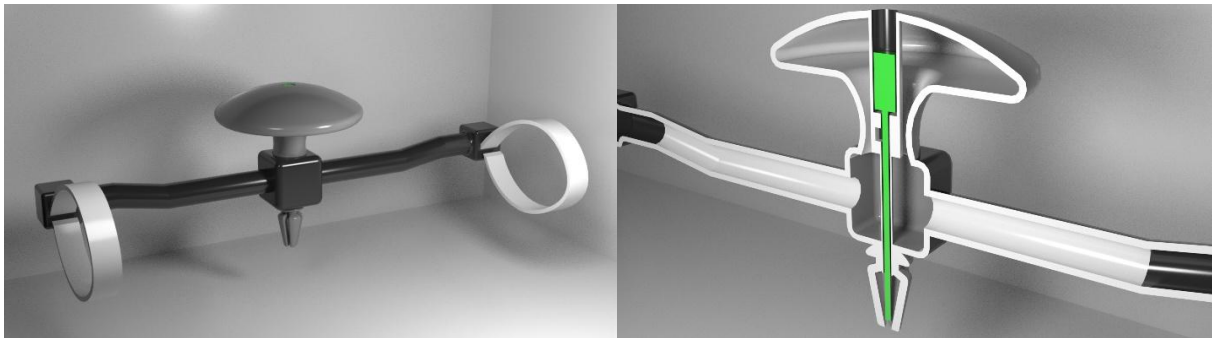


Ilustración 60: Concepto 1 exterior e Indicador interior Idea inicial. Fuente: Elaboración propia.

Al comprobar que la aplicación del indicador de la forma propuesta inicialmente no era factible, se optó en su lugar por un indicador cilíndrico. Este enfoque resultó más práctico para su uso con varios tipos de pinzas, a diferencia del indicador diseñado específicamente para la pinza circular, que sólo era compatible con esa forma concreta. Además, se comprobó que el tubo no sería práctico si hubiera más conexiones cercanas; sin embargo, si no hubiera conexiones cercanas, podría ser una opción viable. En consecuencia, se desarrolló una versión modular en la que el clip individual está disponible, con la opción de incorporar el tubo si se desea.

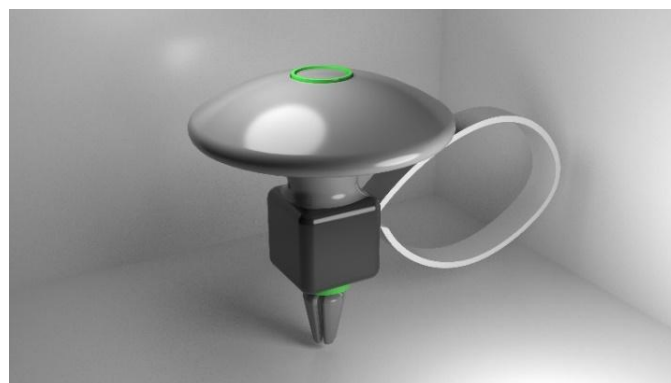


Ilustración 61: Concepto 1 Clip Individual. Fuente: Elaboración propia.

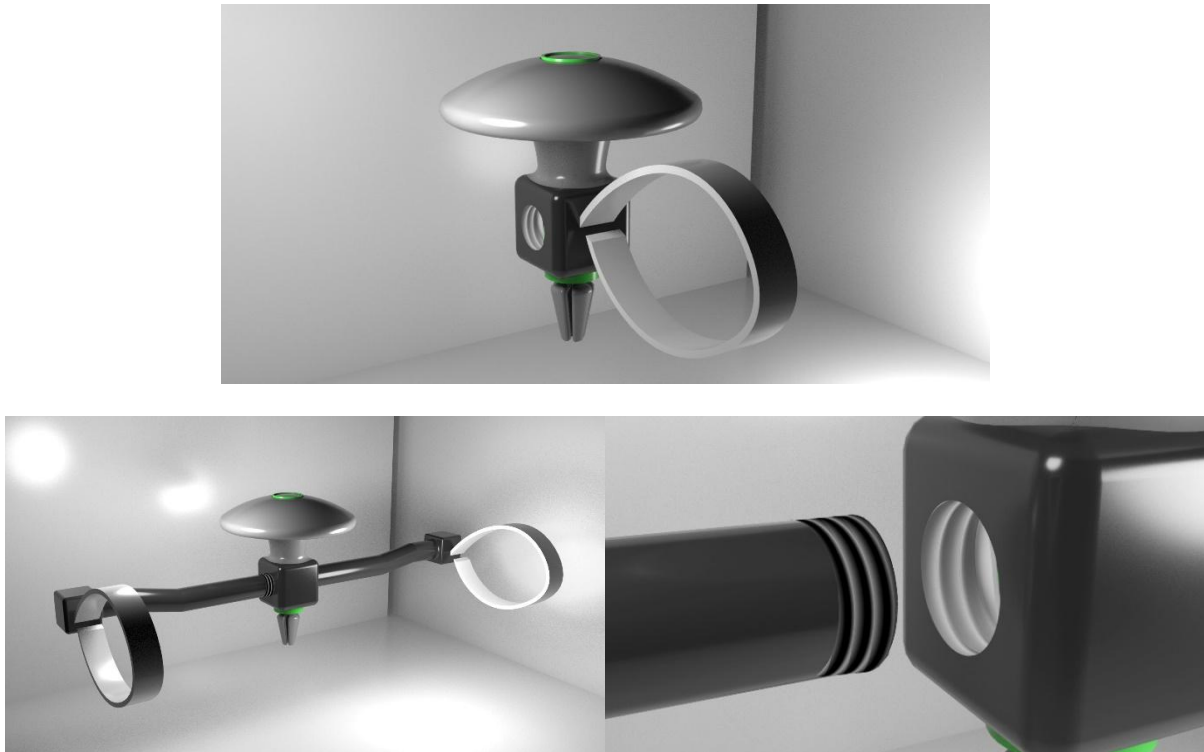


Ilustración 62: Concepto 1 Clip Modular. Fuente: Elaboración propia.

Como se ve en la siguiente sección sobre impresión 3D, utilizar la idea de un cilindro completo hacía que el clip se partiera en dos trozos, lo que provocaba que se deshiciera. Al final se decidió aplicar la idea de medio cilindro. De este modo, las dos piezas permanecían unidas y se mantenía la funcionalidad del indicador. Cuando el clip se inserta correctamente, el semicilindro se eleva, mostrando el color verde en la parte superior para indicar al trabajador que deje de aplicar fuerza.

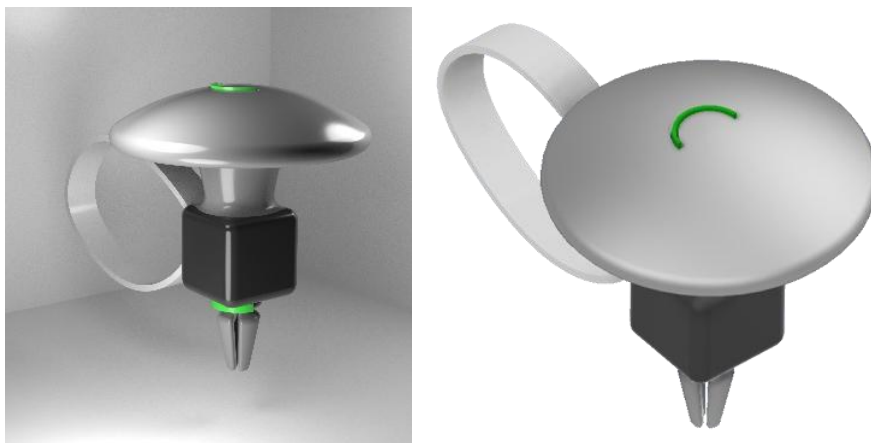


Ilustración 63: Concepto 1 Medio Cilindro. Fuente: Elaboración propia.

6.5.2.2 Concepto 2

El concepto 2, que puede verse en la figura 64, presenta el mismo tipo de empuñadura, indicador y diseño del cabezal que el concepto 1, lo que garantiza que encaje con seguridad en la ranura designada del parachoques. Sin embargo, tiene un enganche diferente para el arnés de cables. Este enganche, dependiendo del material utilizado, podría ser ajustable o fijo, pero proporciona un alto nivel de seguridad para garantizar que la pinza permanezca estable y no se mueva.

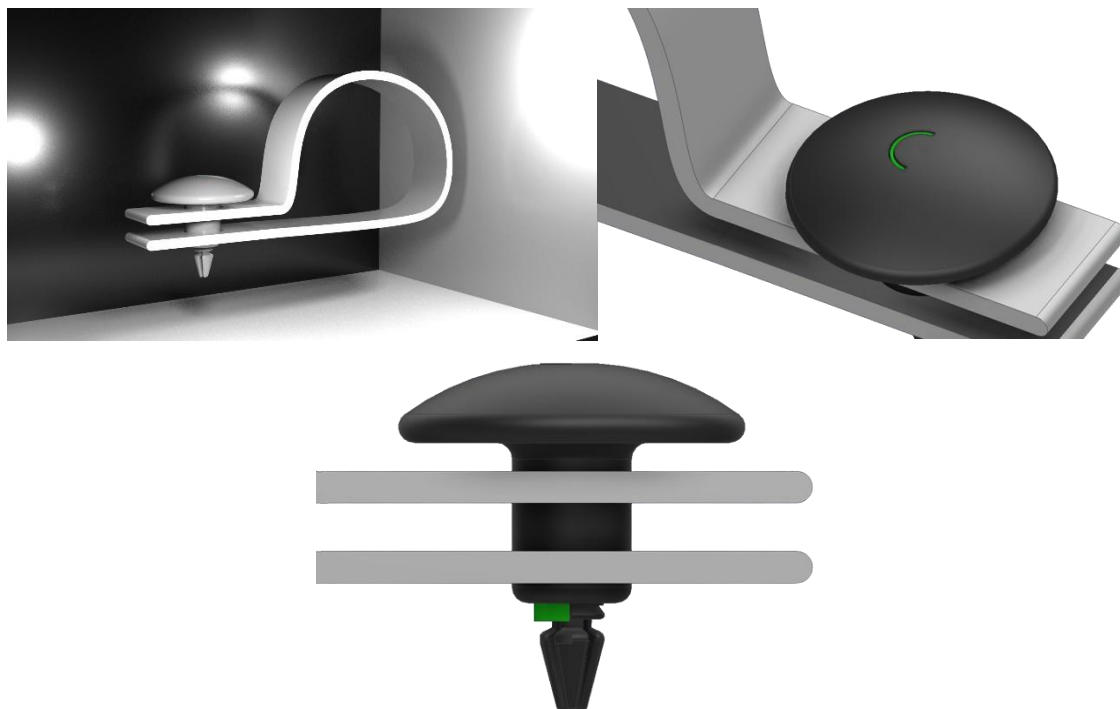


Ilustración 64: Concepto 2 Clip Circular. Fuente: Elaboración propia.

6.5.2.3 Concepto 5

El concepto 5, que puede verse en la Figura 65, resultó ganador en la matriz Pugh por su amplio espacio para aplicar más fuerza y su diseño robusto. Sin embargo, surgió un problema notable durante la fase de modelado CAD: la distancia significativa entre el clip y el cable provocaba un movimiento lateral excesivo, lo que resultaba en un agarre insuficiente del cable y posibles problemas dentro del vehículo. En consecuencia, este diseño se descartó durante esta fase, dejando sólo los conceptos 1 y 2 como posibles soluciones para el clip circular.

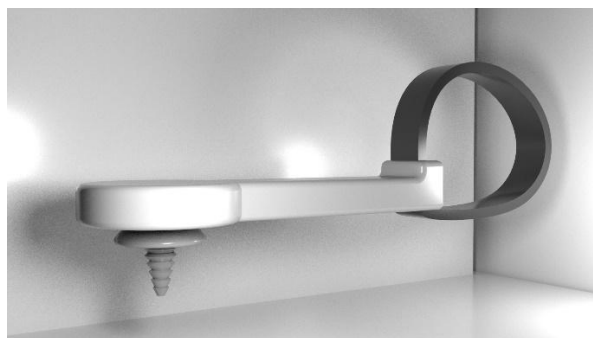


Ilustración 65: Concepto 5 Clip Circular. Fuente: Elaboración propia.

6.5.3 Clip Colaboración Humano – Robot

6.5.3.1 Concepto 1

El concepto 1, que puede verse en la figura 66, presenta un agarre adaptado a la forma de la herramienta del robot, que presiona la pinza para colocarla en su sitio. Esta pinza corresponde a la pinza plana explicada anteriormente y comparte similitudes con los dos primeros diseños de pinza plana. Incluye un agarre ajustable para el mazo de cables, que se asemeja o funciona como una brida para cables. Como se ve en la figura 67, esta pinza incorpora un código QR detectado por el robot para indicar si la pinza está bien colocada. Se incluye un indicador que funciona como otros tipos de pinza. Cuando la pinza está colocada correctamente, el indicador se eleva y el código QR cambia, lo que permite al robot detectar que la pinza está bien colocada.

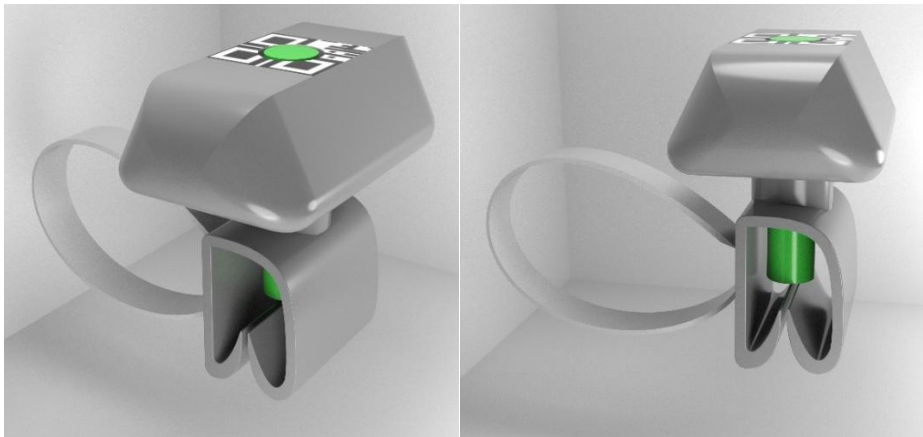


Ilustración 66: Concepto 1 Clip Colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración propia.

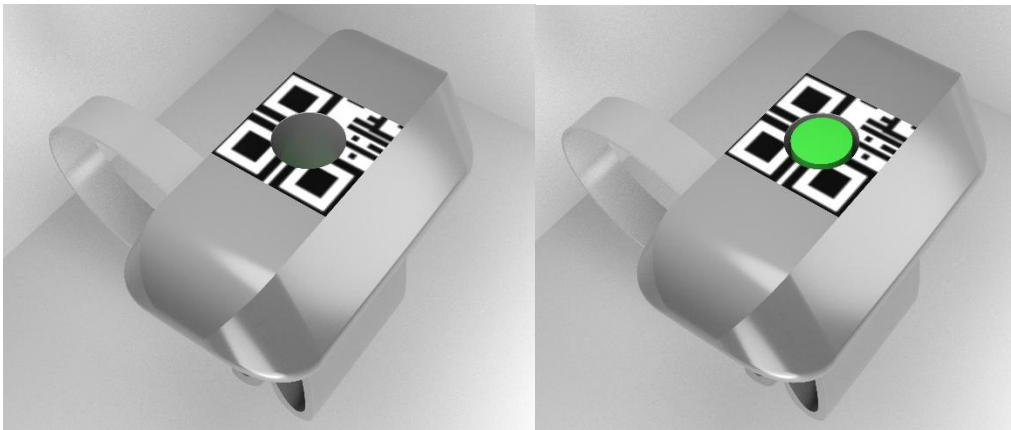


Ilustración 67 QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.

6.5.3.2 Concepto 4

El concepto 4, que puede verse en la figura 68, también tiene el mismo agarre de herramienta y agarre de mazo de cables que el concepto 1. Esta pinza corresponde a las pinzas circulares, como se ve en el diseño del cabezal de la pinza. Incluye un código QR con un indicador para la detección del robot. Este diseño tiene una forma de medio cilindro adaptada al cabezal de clip circular, pero funciona de forma similar al Concepto 1. Cuando se presiona el clip, el indicador cambia, al igual que el código QR, indicando al robot su correcta colocación.

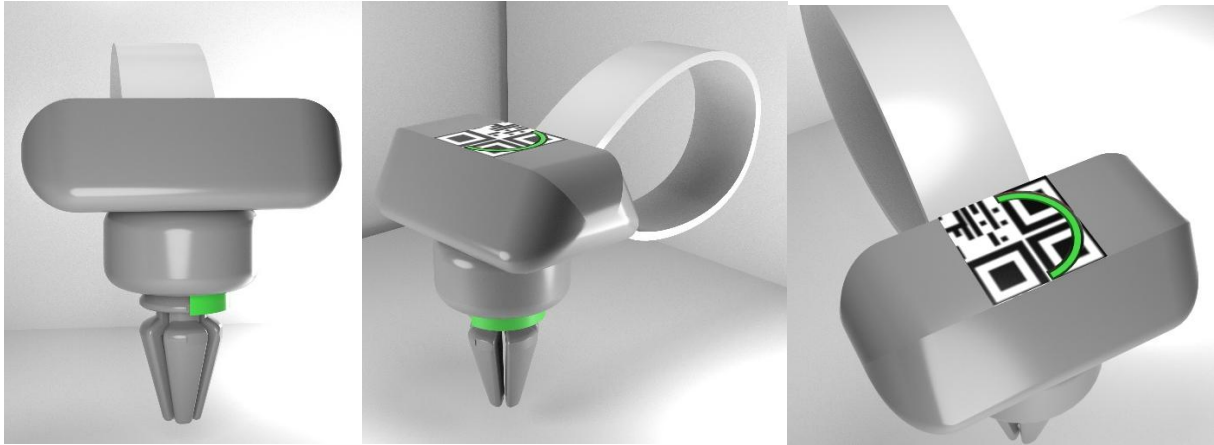


Ilustración 68: Concepto 4 Clip Colaboración Humano-Robot y QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.

6.5.3.3 Concepto 5

El Concepto 5, que se puede ver en la Figura 69, es similar al Concepto 4, pero con un diseño de cabezal diferente para probar cómo interactúa el robot con varios cabezales de pinzas. Este diseño de cabezal es menos viable para el uso humano debido a su dificultad de inserción, pero es factible para el robot, que tiene una fuerza mayor y ajustable. Así pues, también se implementó este tipo de cabezal.

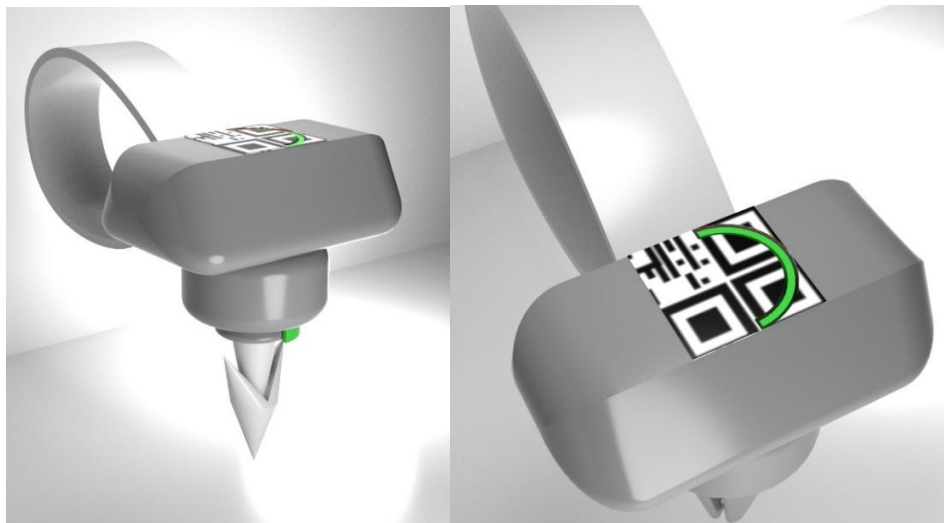


Ilustración 69: Concepto 5 Clip Colaboración Humano-Robot y QR, detección de los clips colocados correctamente. Fuente: Elaboración propia.

6.6 Prototipos

Los modelos CAD se utilizaron para generar archivos de impresión 3D, garantizando que los diseños impresos reflejaran fielmente los requisitos (Ulrich et al., 2020). Los prototipos impresos en 3D se evaluaron en función de estos requisitos para garantizar que cumplieran los criterios establecidos y ofrecían mejoras significativas en cuanto a ergonomía y eficiencia. En esta sección se puede ver cómo la impresión de los nuevos diseños de pinzas ha contribuido a mejorar su diseño. La impresión de estos ha ayudado a identificar que el tamaño de algunos clips o su agarre al mazo de cables era demasiado grande. Sin embargo, la principal mejora conseguida ha sido con el diseño de los clips circulares. Inicialmente, el diseño incluía un indicador en forma de cilindro que, como se muestra en *la Ilustración 70*, hacía que el clip se dividiera en dos partes. Esto llevó a la decisión de modificar el indicador a una forma de medio cilindro, garantizando así que el clip siguiera siendo una sola pieza. *La Ilustración 70* destaca la principal mejora con respecto a otros diseños, conseguida mediante la aplicación de la impresión 3D. Sin embargo, esta no es la única mejora realizada, ni son estos los únicos diseños seleccionados. Los diseños impresos en 3D adicionales se encuentran en el Apéndice 3.



Ilustración 70: Concepto 1 Clip circular, con todo el cilindro de indicador y luego con el medio cilindro. Fuente: Elaboración propia.

7 Concepto Final

En esta sección se discute ampliamente el diseño final elegido como mejor solución al problema. Esta decisión se basa en una evaluación exhaustiva de los distintos conceptos para cada tipo de clip, y se exponen los fundamentos de la selección de los diseños óptimos.

7.1 Clips Planos

Tras evaluar varios diseños, se consideró que el Concepto 2 era la mejor solución para los clips planos. El concepto 2 ofrece una combinación equilibrada de características que responden a los requisitos críticos del diseño:

- Inclusión de un indicador: El Concepto 2 puede alojar un indicador, que es crucial para señalar al trabajador cuándo el clip está bien colocado, evitando así que se ejerza una fuerza innecesaria y reduciendo el riesgo de trastornos musculoesqueléticos.
- Sujeción y seguridad: Aunque el Concepto 2 no agarra con tanta fuerza como el Concepto 3, proporciona mejor sujeción que el Concepto 1. Esto garantiza que el clip permanezca seguro sin que resulte excesivamente difícil insertarlo o extraerlo.
- Agarre ergonómico: El diseño incluye un agarre ergonómico con una textura antideslizante, que mejora la facilidad de uso para los trabajadores.

En general, el Concepto 2 fue seleccionado por su capacidad para integrar características esenciales como el indicador, al tiempo que proporciona un diseño seguro y fácil de usar.

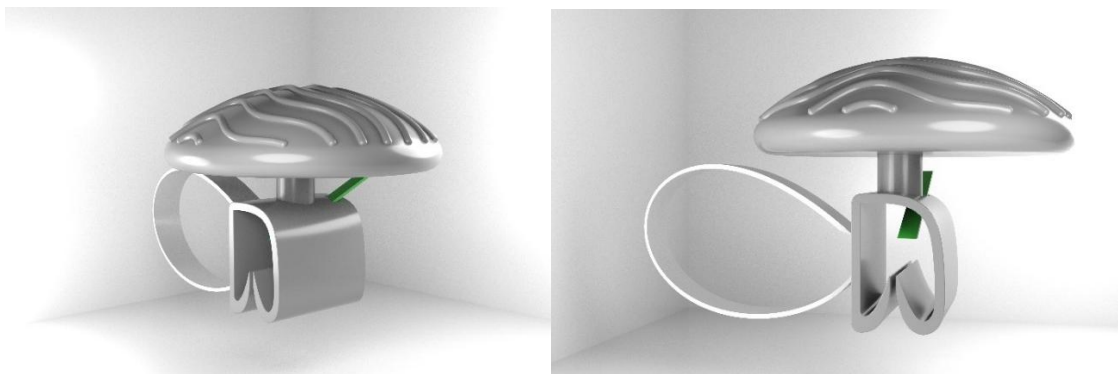


Ilustración 71: Concepto 2, finalmente elegido como mejor diseño para el clip plano. Fuente: Elaboración propia.

7.2 Clips Circulares

En el caso de los clips circulares, el concepto 1 se consideró el mejor diseño. Las razones de esta selección son las siguientes

- Formato modular: El formato modular del Concepto 1 permite una mejor personalización y adaptabilidad a diferentes escenarios.
- Sujeción del cable: Ofrece una mejor sujeción del cable en comparación con otros diseños, lo que garantiza que el cable permanezca en su sitio de forma segura.

- Consideración del tamaño: Durante el proceso de impresión 3D, se observó que el tamaño del Concepto 1 debería reducirse para ser más comparable al de los clips planos. Este ajuste mejoraría la compatibilidad y la facilidad de uso.

Las características de robustez y adaptabilidad del Concepto 1 lo convierten en la mejor opción para los clips circulares, a pesar de la necesidad de pequeños ajustes de tamaño.

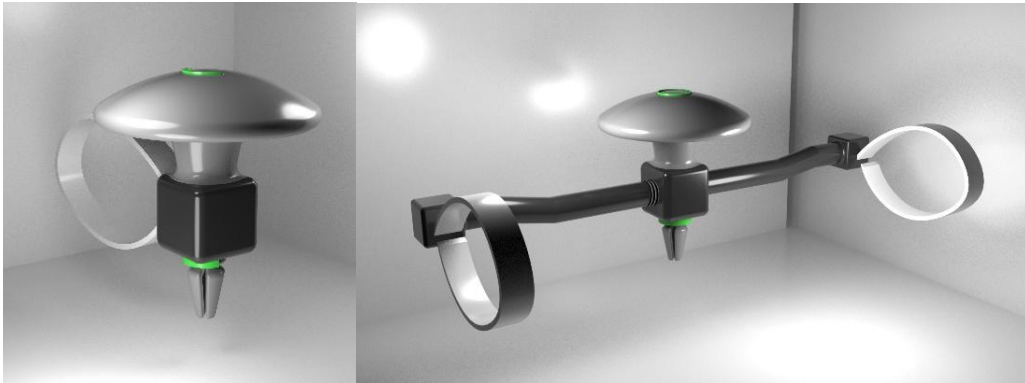


Ilustración 72: Concepto 1, finalmente elegido como mejor solución para el clip circular. Fuente: Elaboración propia.

7.3 Clips Colaboración Humano – Robot

Para los clips de colaboración humano-robot, los mejores diseños se identificaron como Concepto 1 y Concepto 4. Estos diseños se adaptaron específicamente a las pinzas planas y circulares, respectivamente. Estos diseños se adaptaron específicamente para los clips planos y circulares, respectivamente, incorporando las mejores características de los otros tipos de clips:

- Diseño ergonómico y funcional: Ambos conceptos incluyen un agarre ergonómico y una fijación ajustable al haz de cables, similar a una brida para cables, lo que garantiza un manejo seguro y sencillo.
- Indicador e integración de código QR: Incorporan un indicador que señala la colocación correcta y un código QR que el robot puede detectar para confirmar la colocación correcta. Esta integración es crucial para garantizar la precisión y la eficacia en el proceso de montaje.

El concepto 1 está adaptado para la pinza plana, mientras que el concepto 4 está hecho a medida para la pinza circular. La principal diferencia entre estos dos conceptos es la forma del cabezal, diseñado para adaptarse a cada tipo de clip.

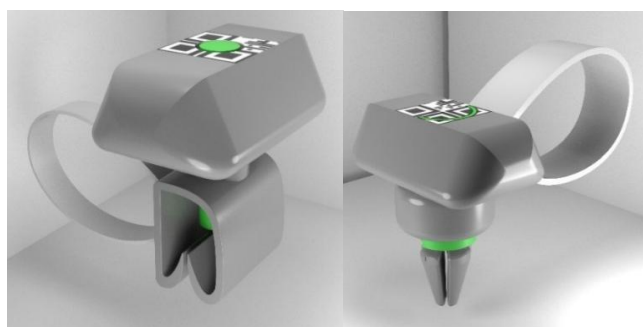


Ilustración 73: Concepto 1 y 4, finalmente elegidos como mejores soluciones para la colaboración Humano-Robot. Fuente: Elaboración propia.

7.4 Mejor Solución : Clips Colaboración Humano Robot

La decisión final es que la mejor solución es los clips integrados de colaboración humano-robot, concretamente los conceptos 1 y 4. Esta elección se basa en varios factores clave:

- Eliminación de la fuerza: Al permitir que el robot aplique la fuerza necesaria para colocar las pinzas, esta solución elimina la necesidad de que los trabajadores realicen esfuerzos físicos, lo que reduce significativamente el riesgo de lesiones.
- Integración de un indicador: La inclusión de un indicador es una característica crítica que garantiza que los trabajadores sepan cuándo el clip está colocado correctamente, evitando el sobreesfuerzo.
- Detección y ajuste del robot: La integración del código QR permite al robot detectar si un clip no está colocado correctamente y realizar ajustes automáticamente. Esto aumenta la precisión y la eficacia del proceso de montaje.

El objetivo final es que el operario coloque inicialmente los clips y que el robot detecte cualquier colocación incorrecta y los ajuste en consecuencia. Esta colaboración ahorra tiempo y minimiza el riesgo de lesiones del trabajador, lo que la convierte en la solución más eficaz y eficiente para el proceso de montaje.

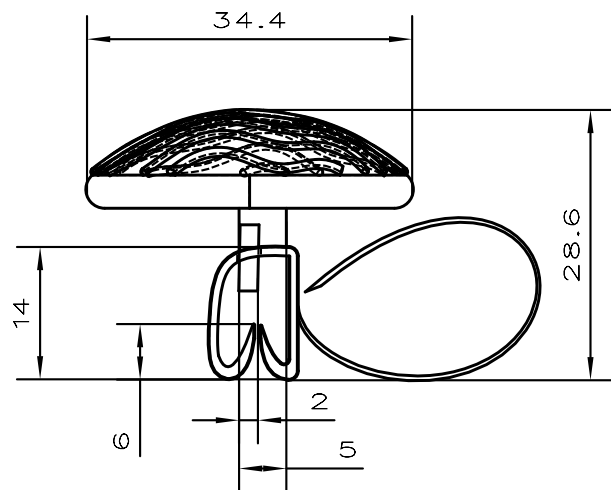
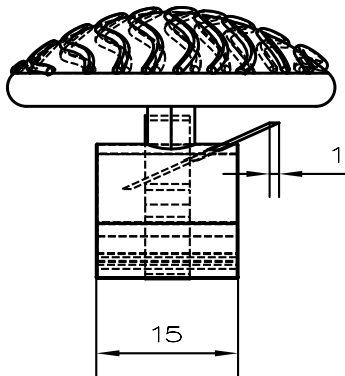
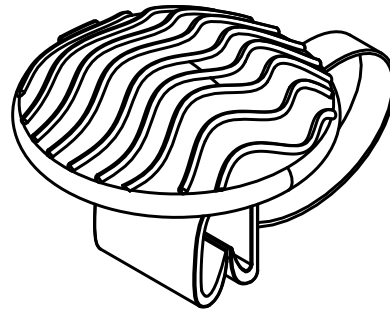
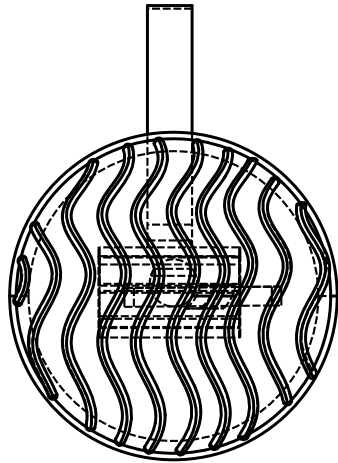
En conclusión, los clips de colaboración hombre-robot, en particular los conceptos 1 y 4, representan la mejor solución global para el problema abordado en este proyecto. Combinan diseño ergonómico, integración de indicadores y precisión robótica para crear un proceso de montaje más seguro y eficiente.

8 Planos

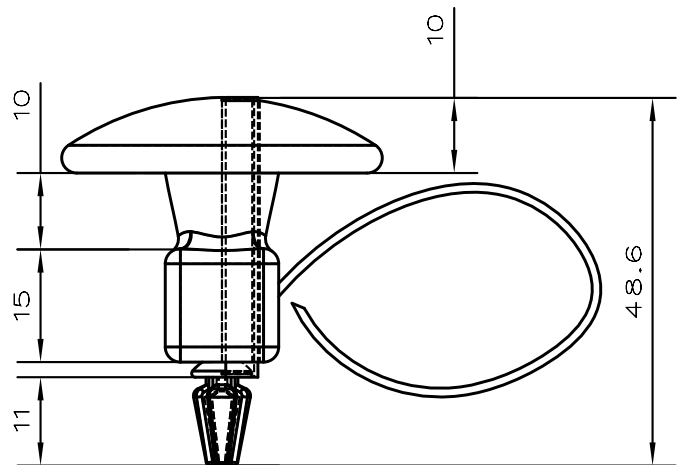
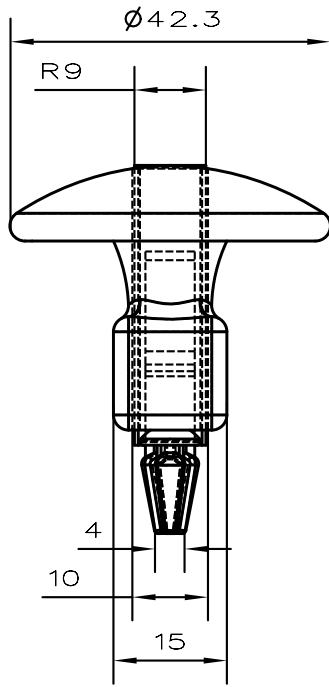
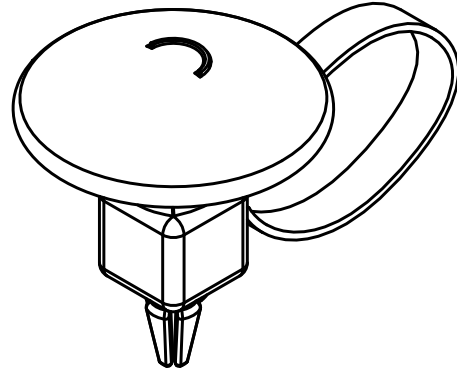
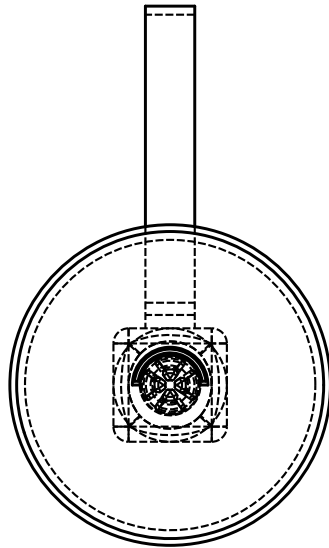
Como complemento a la documentación del proyecto, en este apartado se incluyen los planos técnicos de cada uno de los clips seleccionados como mejores soluciones. Estos planos permiten representar de forma clara y detallada el diseño final de cada propuesta, facilitando su comprensión visual y técnica, así como su análisis y posterior fabricación.

Los clips que se presentan a continuación corresponden a las tres soluciones finales elegidas: el clip plano, el clip circular y los clips diseñados en el contexto de la colaboración humano-robot. Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, no se ha optado por una única solución definitiva. La razón principal es que, para poder seleccionar un solo clip como pieza universal, sería necesario modificar el diseño del parachoques actual, lo cual excede el alcance y los límites establecidos para este proyecto.

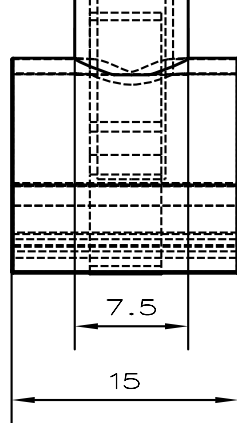
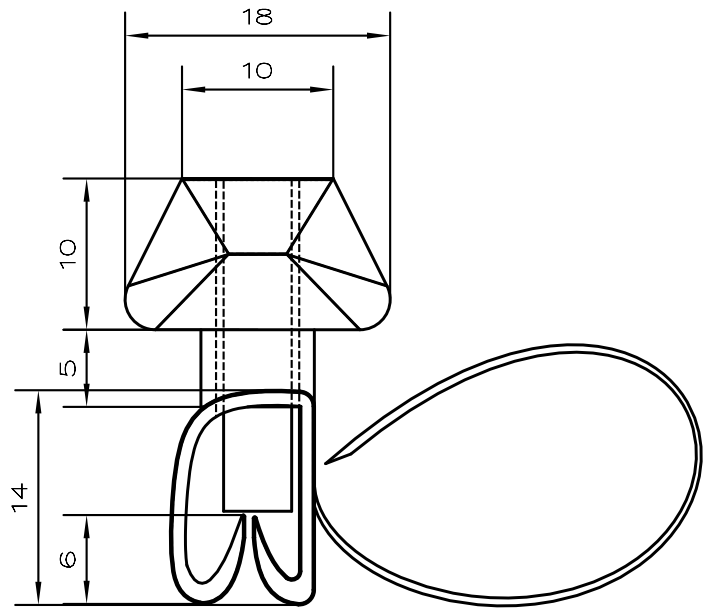
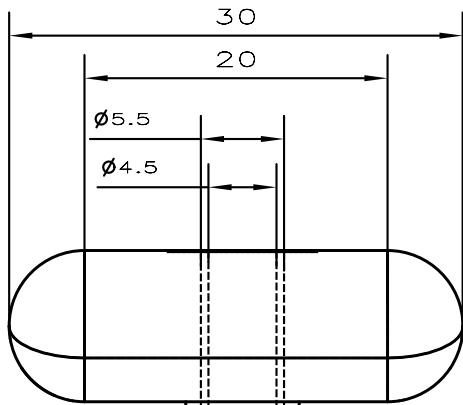
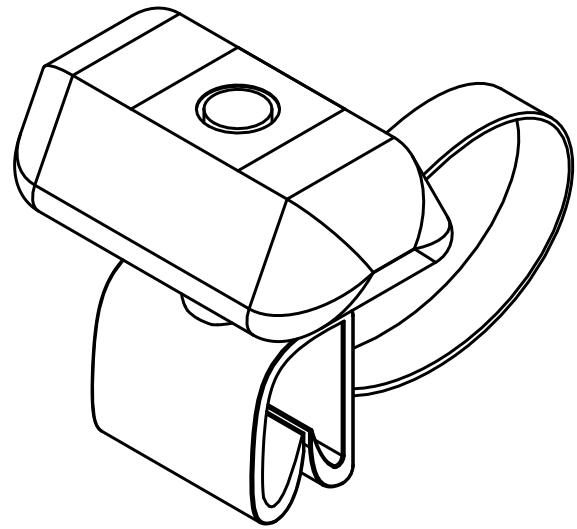
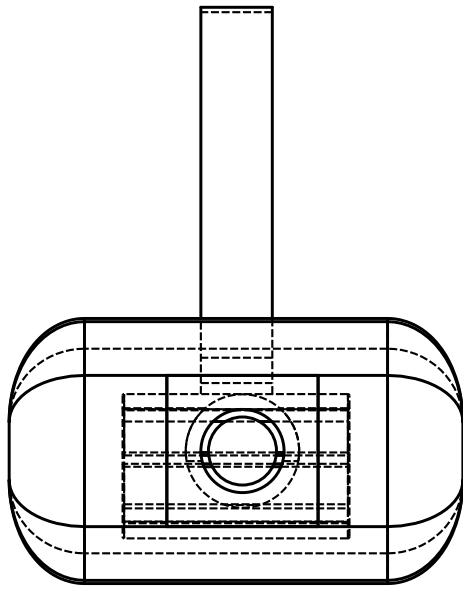
Por tanto, se han mantenido y desarrollado estas tres propuestas como soluciones viables, cada una optimizada para distintos contextos de aplicación, manteniendo la compatibilidad con el parachoques existente. La inclusión de sus respectivos planos responde a la necesidad de ofrecer una documentación técnica completa, que permita valorar adecuadamente cada propuesta en función de criterios funcionales, técnicos y de fabricación.



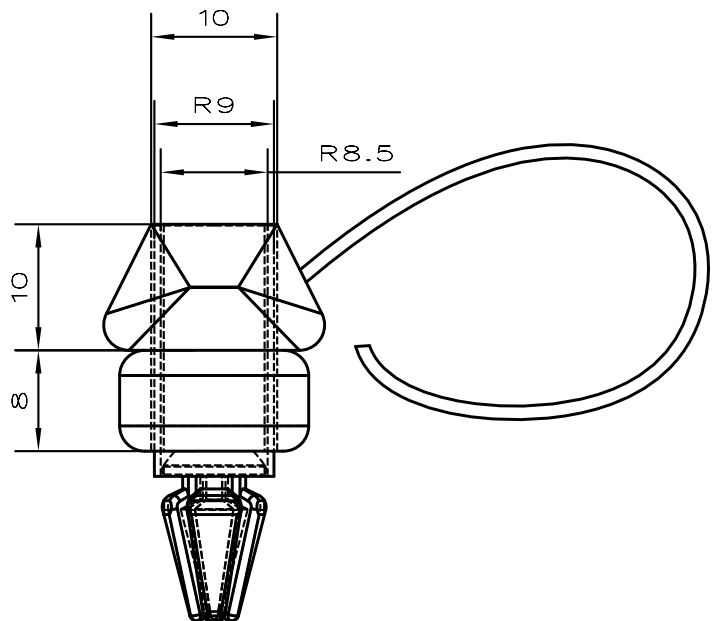
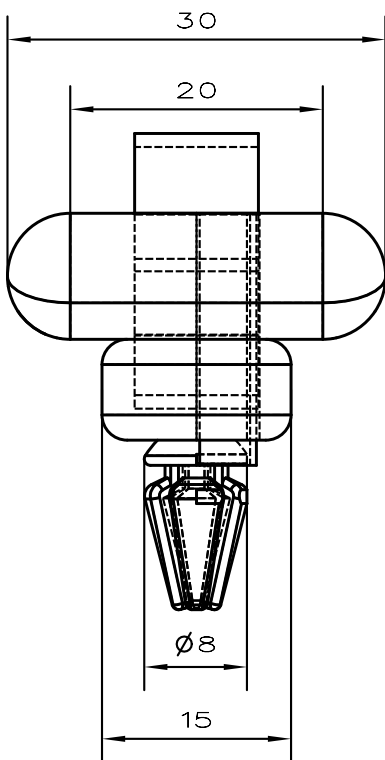
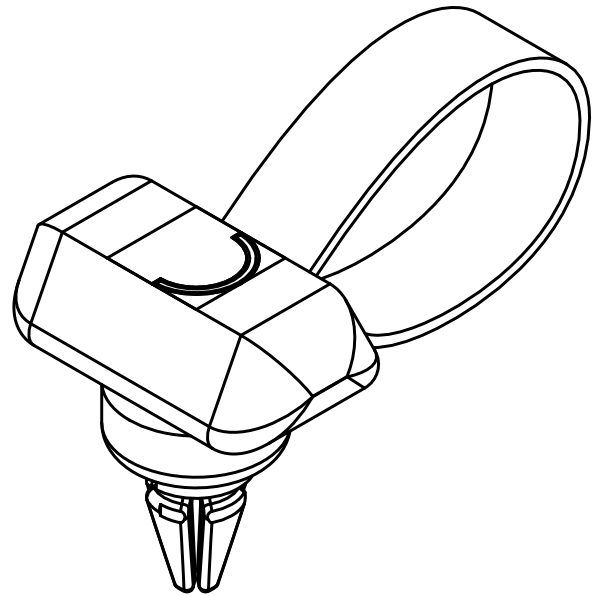
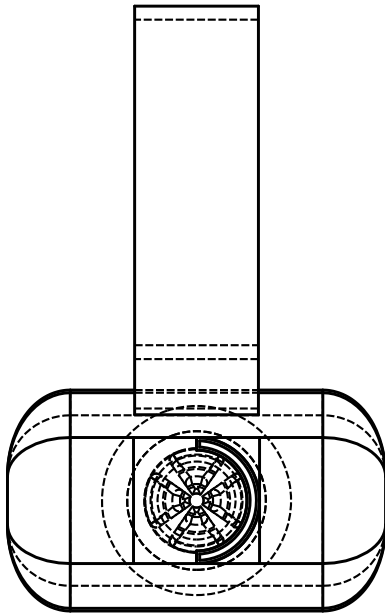
	Estudiante	Firmas	GRADO EN INGENIERÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DEL PRODUCTO EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA Universidad de Málaga
Nombre	Elena		
Apellidos	Ramírez de Arellano Gómez		
DNI			
Escala:	Denominación:	Fecha:	10/06/2025
	Concepto Final Clip Plano	Nº de Plano:	CP-C2-001



	Estudiante	Firmas	GRADO EN INGENIERÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DEL PRODUCTO EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA Universidad de Málaga
Nombre	Elena		
Apellidos	Ramírez de Arellano Gómez		
DNI			
Escala:	Denominación:	Fecha:	10/06/2025
1:1	Concepto Final Clip Circular	Nº de Plano:	CC-C1-001



	Estudiante	Firmas	GRADO EN INGENIERÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DEL PRODUCTO EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA Universidad de Málaga
Nombre	Elena		
Apellidos	Ramírez de Arellano Gómez		
DNI			
Escala:	Denominación:	Fecha:	10/06/2025
2:1	Concepto Final Clip Plano	Nº de Plano:	CP-C2-001



	Estudiante	Firmas	GRADO EN INGENIERÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DEL PRODUCTO EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA Universidad de Málaga
Nombre	Elena		
Apellidos	Ramírez de Arellano Gómez		
DNI			
Escala:	Denominación:	Fecha:	10/06/2025
2:1	Concepto Final Clip Plano	Nº de Plano:	CP-C2-001

9 Presupuesto

En este apartado se presenta una valoración económica estimada del desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado, como si hubiera sido encargado a un profesional externo o a un gabinete especializado en ingeniería de diseño industrial. El objetivo de este presupuesto no es calcular el coste de fabricación del producto o prototipo propuesto, sino cuantificar el valor del trabajo intelectual, técnico y creativo realizado durante el desarrollo del proyecto.

Para ello, se han clasificado las distintas tareas llevadas a cabo según su tipología (investigación teórica, análisis técnico, diseño, modelado digital, prototipado, redacción, etc.) y se ha estimado el número de horas dedicadas a cada una de ellas. A cada grupo de tareas se le ha asignado una tarifa horaria estándar, basada en precios medios de mercado para profesionales junior del sector, incluyendo en dicha tarifa los costes asociados a la actividad profesional (seguros sociales, impuestos, uso de herramientas digitales, licencias, equipo informático, etc.).

Tabla 7: Criterios de Estimación

CRITERIOS DE ESTIMACIÓN	
Tipo de tarea	Tarifa estimada/hora (€)
Investigación teórica	25 €/h
Desarrollo técnico (análisis, CAD)	30 €/h
Evaluación ergonómica	30 €/h
Diseño conceptual / bocetos	30 €/h
Prototipado / Validación	30 €/h
Redacción / Maquetación / Revisión	25 €/h

Tabla 8: Estimación de Tiempos y Costes

ESTIMACIÓN DE TIEMPOS Y COSTES				
Fase / Capítulo	Tipo de tareas principales	Horas estimadas	Tarifa €/h	Subtotal (€)
1. Introducción	Redacción y análisis inicial	8 h	25 €	200 €
2. Teoría	Revisión bibliográfica	20 h	25 €	500 €
3. Selección de Métodos	Análisis, redacción técnica	10 h	30 €	300 €
4. Análisis Inicial	Trabajo con datos, sensores, software, ergonomía	30 h	30 €	900 €
5. Requisitos de Diseño	Desarrollo técnico y redacción	10 h	30 €	300 €
6. Diseño	Bocetos, ideas, CAD, evaluación	40 h	30 €	1.200 €
7. Concepto Final	Selección y justificación de diseño final	10 h	30 €	300 €
8. Planos	CAD y documentación técnica	12 h	30 €	360 €
9. Presupuesto	Cálculo y redacción	4 h	25 €	100 €

ESTIMACIÓN DE TIEMPOS Y COSTES				
Fase / Capítulo	Fase / Capítulo	Fase / Capítulo	Fase / Capítulo	Fase / Capítulo
10. Discusión y Conclusión	Análisis y síntesis de resultados	6 h	25 €	150 €
11. Trabajo Futuro	Propuesta y análisis	2 h	25 €	50 €
12. Referencias y Anexos	Formato, maquetación, organización	8 h	25 €	200 €
Total estimado	—	160 h	—	4.560 €

VALOR TOTAL DEL PROYECTO

Total, sin IVA: 4.560 €

IVA (21%): 957,60 €

Total, con IVA incluido: 5.517,60 €

La suma total ofrece una visión aproximada del coste que tendría este proyecto si se contratara a una persona o equipo externo para su ejecución. Este ejercicio permite poner en valor la dedicación y el trabajo profesional que implica el desarrollo completo de un proyecto de diseño industrial desde su fase conceptual hasta la documentación final.

10 Discusión y Conclusión

Lo que fue bien

Varios aspectos del proyecto fueron especialmente bien:

- Evaluación inicial exhaustiva: La exhaustiva evaluación inicial identificó con éxito los principales problemas ergonómicos y proporcionó una dirección clara para el rediseño.
- Rediseños eficaces: Los rediseños de los clips, especialmente la inclusión de indicadores, fueron bien recibidos y abordaron el problema principal de la aplicación excesiva de fuerza por parte de los trabajadores.
- Concepto de colaboración humano-robot: La integración de la colaboración humano-robot demostró ser una solución prometedora para los problemas ergonómicos, y los diseños desarrollados con este fin fueron innovadores y prácticos.

Áreas de mejora

A pesar de los éxitos, existen áreas susceptibles de mejora:

- Pruebas de prototipos: El frágil material de los prototipos impidió realizar pruebas exhaustivas. El uso de materiales más duraderos para los prototipos iniciales podría haber proporcionado una mejor comprensión de la viabilidad de los diseños.
- Gestión del tiempo: El proyecto se enfrentó a restricciones de tiempo que limitaron la capacidad de aplicar y probar todas las soluciones propuestas. Una mejor gestión del tiempo y asignación de recursos podría haber mitigado este problema.
- Evaluación exhaustiva: Aunque la evaluación inicial fue exhaustiva, una evaluación de seguimiento más detallada con los clips rediseñados podría aportar más información y mejoras.
- Concentración en una única solución: El proyecto exploró múltiples soluciones simultáneamente, lo que diluyó el enfoque y los recursos. Centrarse en una única solución podría haber permitido un desarrollo y unas pruebas más exhaustivos, lo que habría dado lugar a un diseño más fiable y minuciosamente examinado.

Autocrítica y conciencia

La autoconciencia y la crítica son esenciales para la mejora continua. Algunas observaciones autocríticas son

- Selección de materiales: La elección de materiales para los prototipos no fue óptima. Los proyectos futuros deberían dar prioridad a la selección de materiales que equilibren durabilidad y rentabilidad.
- Gestión del alcance: La decisión de evitar rediseñar todo el parachoques fue práctica, pero limitó el potencial de una solución más integrada. Los proyectos futuros deberán considerar rediseños más amplios cuando sea factible.
- Opiniones de los usuarios: Unas opiniones más amplias de los usuarios durante la fase de diseño podrían haber aportado información adicional y haber dado lugar a diseños más fáciles de usar.

- Enfoque de la solución: Centrarse en demasiadas soluciones a la vez obstaculizó la profundidad del desarrollo. Los proyectos futuros deberían concentrarse en una única solución para garantizar la realización de pruebas y el perfeccionamiento.

Los resultados de la evaluación inicial de este proyecto revelaron un riesgo de desarrollo de trastornos musculoesqueléticos para los trabajadores implicados en el ensamblaje del mazo de cables. Se descubrió que los trabajadores ejercían una fuerza excesiva al colocar los clips, principalmente porque no podían determinar cuándo los clips estaban colocados correctamente. Esto los llevaba a seguir aplicando fuerza, a menudo utilizando todo el peso de su cuerpo contra el parachoques, lo que provocaba posturas muy incómodas. Estas posturas, que también se evaluaron durante este proyecto, mostraron resultados muy negativos y podrían causar trastornos musculoesqueléticos en el futuro, como se explicó al principio del proyecto.

Para hacer frente a estos problemas, se decidió rediseñar los clips del parachoques para incluir un indicador que señale al trabajador cuándo el clip está bien colocado, reduciendo así la fuerza innecesaria aplicada. El parachoques consta de dos tipos de clips: circulares y planos. Al final se decidió rediseñar ambos tipos por separado, ya que combinarlos requeriría un rediseño completo del parachoques, lo que quedaba fuera del alcance de este proyecto y, en cambio, está previsto para futuros trabajos. En consecuencia, se crearon rediseños separados para los clips circulares y planos.

Otro aspecto significativo de este proyecto fue la integración de la colaboración humano-robot. Este enfoque se consideró como una posible solución a los problemas ergonómicos de la estación. Por lo tanto, se llevó a cabo un rediseño específico para permitir que el humano colocara el clip en posición y el robot lo presionara, eliminando así el problema principal de que el humano aplicara la fuerza. Esto llevó a la creación de tres diseños para cada tipo de clip.

Determinar si es mejor que los humanos o los robots presen los clips depende de los objetivos de la empresa. Si se puede reducir la fuerza necesaria para presionar los clips, los clips operados por humanos podrían ser una solución excelente debido a la velocidad a la que pueden actuar los trabajadores, a pesar del riesgo inherente de lesiones. Por otro lado, la colaboración humano-robot ofrece una solución ideal en la que el humano coloca el clip y el robot lo presiona, minimizando el esfuerzo físico del trabajador. Habría que probar la rapidez, el coste y la eficacia de esta solución para reducir las lesiones. Si todo funciona según lo previsto y el robot funciona correctamente, la colaboración humano-robot utilizando los clips rediseñados con integración QR sería la mejor solución. El robot puede detectar y corregir clips mal colocados sin intervención humana, lo que garantiza la eficacia y la seguridad. En conclusión, este proyecto ha puesto de manifiesto los retos ergonómicos que plantea el proceso de ensamblaje de mazos de cables y ha propuesto soluciones viables mediante el rediseño de los clips y la colaboración humano-robot.

11 Trabajo Futuro

En esta sección se presentan ideas para su futura aplicación. La primera idea es realizar un análisis ergonómico de los nuevos diseños de clips. Esto no fue posible en el marco del proyecto actual debido a limitaciones de tiempo y recursos. Los prototipos creados no pudieron probarse porque el material utilizado era demasiado frágil. Por lo tanto, está previsto realizar el análisis ergonómico con prototipos de los nuevos diseños en el futuro. Esto permitirá probar si cumplen las especificaciones de los requisitos y si reducen el esfuerzo físico requerido por los trabajadores, disminuyendo así la probabilidad de trastornos musculoesqueléticos con el tiempo.

Otro aspecto del trabajo futuro es rediseñar el puesto de trabajo y el propio parachoques, además del rediseño del clip realizado en este proyecto. Para estos rediseños, la modelización humana digital (DHM) desempeñará un papel crucial a la hora de simular y probar las interacciones humanas con las configuraciones de la estación de trabajo o el parachoques de nuevo diseño. La creación física de prototipos de estos artículos de gran tamaño no sería viable por limitaciones de coste y viabilidad, lo que hace indispensables las herramientas digitales. Con DHM es posible crear modelos virtuales de los componentes rediseñados y realizar evaluaciones ergonómicas exhaustivas sin necesidad de prototipos físicos. Las herramientas DHM permiten simular una amplia gama de movimientos y posturas humanas, desde acciones sencillas como levantarse y estirarse hasta maniobras complejas propias de las tareas de montaje. Esta capacidad de simulación nos permite anticipar cómo interactuarán los trabajadores con los nuevos diseños e identificar posibles problemas ergonómicos en las primeras fases del proceso de diseño. Al abordar estas cuestiones virtualmente, es posible realizar los ajustes necesarios antes de fabricar los prototipos físicos, con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos.

Una de las ventajas más significativas del DHM es su capacidad para probar diseños con una amplia gama de datos antropométricos. En la práctica, esto significa utilizar maniqués digitales que representen distintos tamaños, formas y medidas corporales. Esta diversidad es crucial porque permite garantizar que los diseños son inclusivos y se adaptan a todo el espectro de la variabilidad humana. Por ejemplo, es posible simular cómo una persona baja, una persona alta y personas con distintos tipos de cuerpo interactuarán con la estación de trabajo o el parachoques rediseñados. Las pruebas con diversidad antropométrica nos ayudan a comprender cómo afecta cada diseño a los distintos tipos de cuerpo, lo cual es esencial para extraer conclusiones exhaustivas sobre la eficacia y seguridad del diseño. Al examinar cómo interactúan los distintos tipos de cuerpo con los diseños, se pueden identificar los ajustes específicos necesarios para mejorar la comodidad, reducir la tensión y prevenir los trastornos musculoesqueléticos.

Además, el uso de herramientas DHM para simular estas interacciones permite realizar análisis ergonómicos detallados. Estos análisis pueden evaluar factores como la accesibilidad, la visibilidad, el esfuerzo y la postura corporal. Al evaluar estos factores, se puede garantizar que los componentes rediseñados no sólo cumplan las normas ergonómicas, sino que también mejoren el bienestar general y la productividad de los trabajadores. En resumen, el amplio uso de la modelización humana digital en este proyecto permitirá realizar pruebas exhaustivas y optimizar los componentes rediseñados del puesto de trabajo y del parachoques. Este enfoque garantiza que los diseños se evalúen de forma exhaustiva a través de una amplia gama de características humanas, lo que conduce a soluciones más inclusivas y ergonómicas. Aprovechando DHM, es posible anticipar y mitigar posibles problemas en una fase temprana, creando en última instancia entornos de trabajo más seguros y eficientes.

12 Referencias

- anthropometry, n. Meanings, etymology and more* | *Oxford English Dictionary*. (s. f.). Recuperado 12 de mayo de 2024, de https://www.oed.com/dictionary/anthropometry_n
- Arvidsson, I., Dahlgvist, C., Enquist, H., & Nordander, C. (2021). Action Levels for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders in the Neck and Upper Extremities: A Proposal. *Annals of Work Exposures and Health*, 65(7), 741-747.
<https://doi.org/10.1093/annweh/wxab012>
- Berlin, C., & Adams, C. (2017). Production Ergonomics. En *Ubiquity Press*. Ubiquity Press.
<https://doi.org/10.5334/bbe>
- Brolin, E., Högberg, D., & Hanson, L. (2012). Description of boundary case methodology for anthropometric diversity consideration. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 3(2), 204. <https://doi.org/10.1504/IJHFMS.2012.051097>
- Chapin, N. (2003). Flowchart. En *Encyclopedia of Computer Science* (pp. 714-716). John Wiley and Sons Ltd.
- Condell, J. V., & Moore, G. (2008). Human hand motion capture in image sequences for real-time animation systems. *IMAGING SCIENCE JOURNAL*, 56(6), 307-313.
<https://doi.org/10.1179/174313108X374459>
- David, G. C. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine*, 55(3), 190-199.
<https://doi.org/10.1093/occmed/kqi082>
- Ding, N., Prasad, K., & Lie, T. t. (2017). The electric vehicle: A review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 9(1), 49-66. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2017.082816>
- Douwes, M., & de Kraker, H. (2012). HARM overview and its application: Some practical examples. *Work (Reading, Mass.)*, 41 Suppl 1, 4004-4009. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0700-4004>

- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, *116*, 162-180.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Tseng, M.-L., Grybauskas, A., Stefanini, A., & Amran, A. (2023). Behind the definition of Industry 5.0: A systematic review of technologies, principles, components, and values. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *40*(6), 432-447.
 Scopus. <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2216701>
- Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R., & Matt, D. T. (2019). 7.2 An evaluation methodology for the conversion of manual assembly systems into human-robot collaborative workcells. *Procedia Manufacturing*, *38*, 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.046>
- Gulliksen, J., Göransson, B., Boivie, I., Blomkvist, S., Persson, J., & Cajander, Å. (2003). 7.4 Key principles for user-centred systems design. *Behaviour & Information Technology*, *22*(6), 397-409. <https://doi.org/10.1080/01449290310001624329>
- Hanson, L., Blomé, M., Dukic, T., & Högberg, D. (2006). Guide and documentation system to support digital human modeling applications. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*(1), 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.06.006>
- Heisler, P., Utsch, D., Kuhn, M., & Franke, J. (2021). Optimization of wire harness assembly using human–robot-collaboration. *Procedia CIRP*, *97*, 260-265.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.235>
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, *31*(2), 201-205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Högberg, D., Hanson, L., Bohlin, R., & Carlson, J. S. (2016). Creating and shaping the DHM tool IMMA for ergonomic product and production design. *International Journal of the Digital Human*, *1*(2), 132. <https://doi.org/10.1504/IJDH.2016.077413>
- Industry 5.0—European Commission*. (2022, enero 10). https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en

International Ergonomics Association | Global federation of human factors/ergonomics societies.

(s. f.). Recuperado 5 de marzo de 2024, de <https://iea.cc/>

Johnson, H. E., & Nussbaum, M. A. (2003). Strength capabilities and subjective limits in repetitive manual exertions: Task and hand dominance effects. *AIHA Journal: A Journal for the Science of Occupational and Environmental Health and Safety*, 64(6), 763-770.

<https://doi.org/10.1202/510.1>

Karhu, O., Kansj, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8(4), 199-201. [https://doi.org/10.1016/0003-](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8)

[6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8)

Kee, D. (2021). Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 83, 103140.

<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103140>

Lä, Mkull, D., & Zdrodowski, M. (2020). The Need for Faster and More Consistent Digital Human Modeling Software Tools. En *DHM2020* (pp. 299-310). IOS Press.

<https://doi.org/10.3233/ATDE200037>

Loadpad[®]. (s. f.). Novel USA. Recuperado 26 de mayo de 2024, de

<https://www.novelusa.com/index.php>

McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99.

[https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)

Menolotto, M., Komaris, D.-S., Tedesco, S., O'Flynn, B., & Walsh, M. (2020). Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors*, 20(19), Article 19.

<https://doi.org/10.3390/s20195687>

MVN Awinda | Movella.com. (s. f.). Recuperado 7 de marzo de 2024, de

<https://www.movella.com/products/motion-capture/xsens-mvn-awinda>

- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0-A Human-Centric Solution. *SUSTAINABILITY*, 11(16), 4371.
<https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Navas-Reascos, G. E., Romero, D., Rodriguez, C. A., Guedea, F., & Stahre, J. (2022). 1.1 Wire Harness Assembly Process Supported by a Collaborative Robot: A Case Study Focus on Ergonomics. *Robotics*, 11(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/robotics11060131>
- Nguyen, T. P., & Yoon, J. (2021). 5.1 A novel vision-based method for 3D profile extraction of wire harness in robotized assembly process. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 365-374.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.003>
- Prevention of musculoskeletal disorders and psychosocial risks in the workplace: EU strategies and future challenges | Safety and health at work EU-OSHA*. (s. f.). Recuperado 5 de marzo de 2024, de <https://osha.europa.eu/en/publications/prevention-musculoskeletal-disorders-and-psychosocial-risks-workplace-eu-strategies-and-future-challenges>
- Raschke, U., & Cort, C. (2019). Chapter 3—Siemens Jack. En S. Scataglini & G. Paul (Eds.), *DHM and Posturography* (pp. 35-48). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00003-9>
- Rauch, E., Linder, C., & Dallasega, P. (2020). 2.1 Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105644.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.018>
- Salunkhe, O., Quadrini, W., Wang, H., Stahre, J., Romero, D., Fumagalli, L., & Lämkuil, D. (2023). Review of Current Status and Future Directions for Collaborative and Semi-Automated Automotive Wire Harnesses Assembly. *Procedia CIRP*, 120, 696-701.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.061>
- Sugiono, S., Efranto, R. Y., & Budiprasetya, A. R. (2018). 2.1 Reducing musculoskeletal disorder (MSD) risk of wiring harness workstation using workplace ergonomic risk assessment (WERA) method. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 2018(vol.27(4)), Article 27(4). <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.4.50>

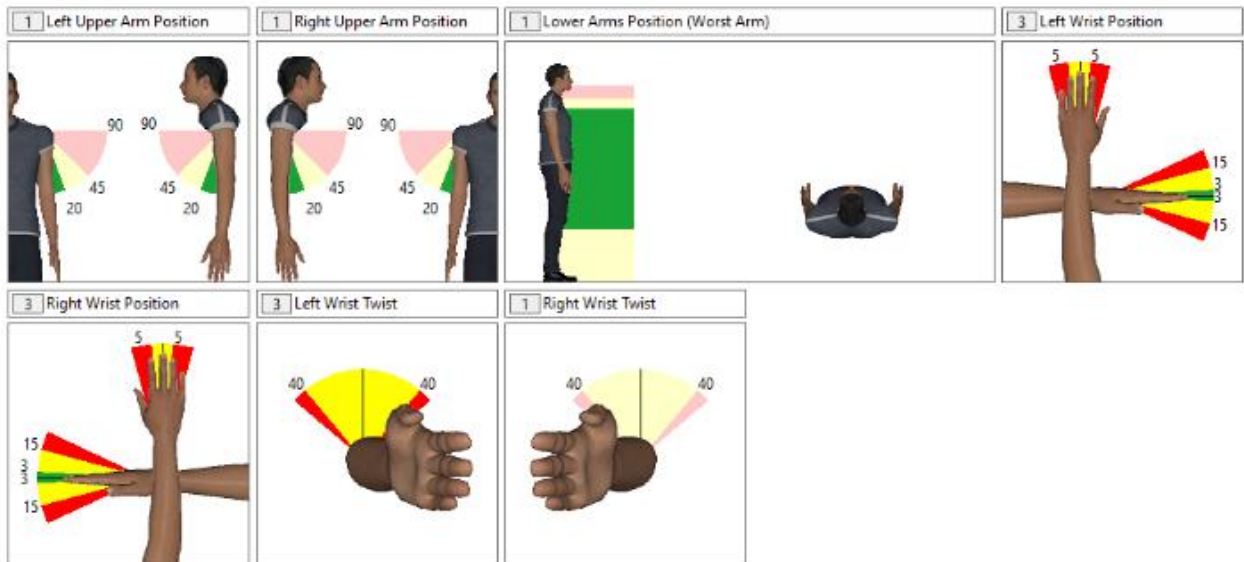
The Double Diamond—Design Council. (s. f.). Recuperado 14 de mayo de 2024, de

<https://www.designcouncil.org.uk/our-resources/the-double-diamond/>

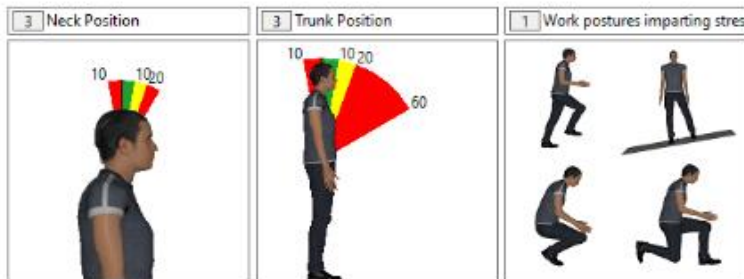
Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Yang, M. C. (2020). *Product design and development* (Seventh edition).

McGraw-Hill Education.

3 Group A: Arm and Wrist Analysis



4 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



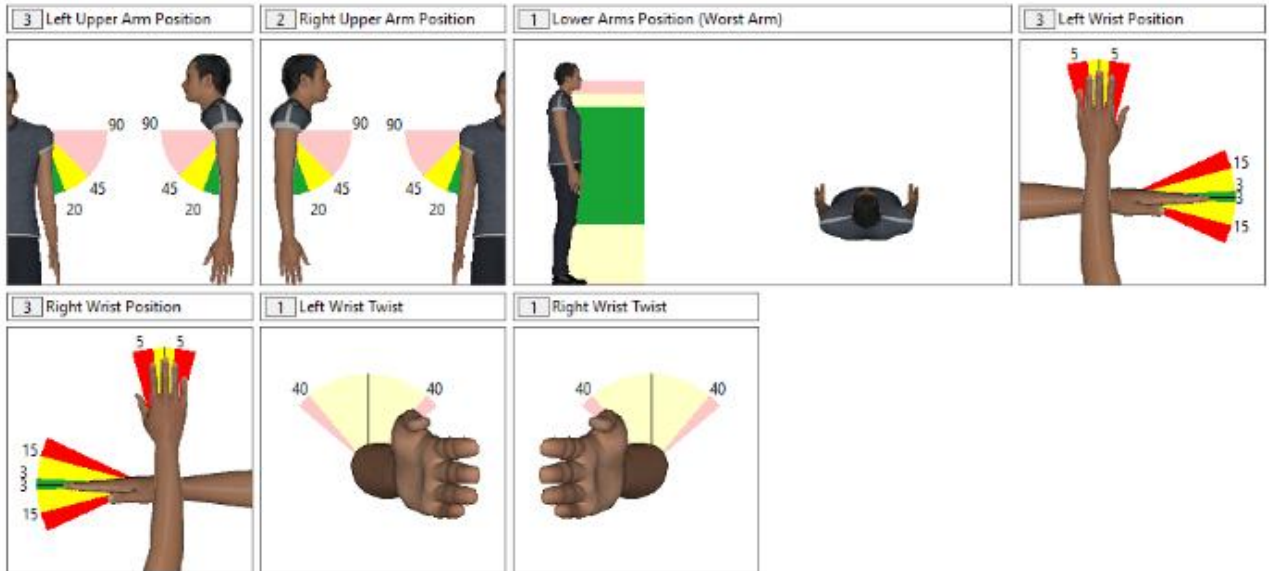
5 Grand RULA score

1 Muscle use score

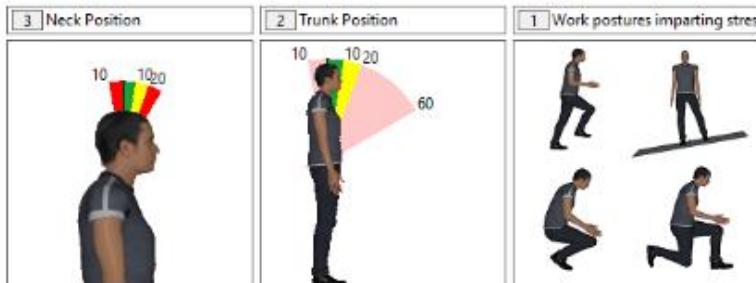
0 Force/Load score

Ilustración 2.1: Evaluación RULA Caso 1 colocando el clip Circular

4 Group A: Arm and Wrist Analysis



5 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



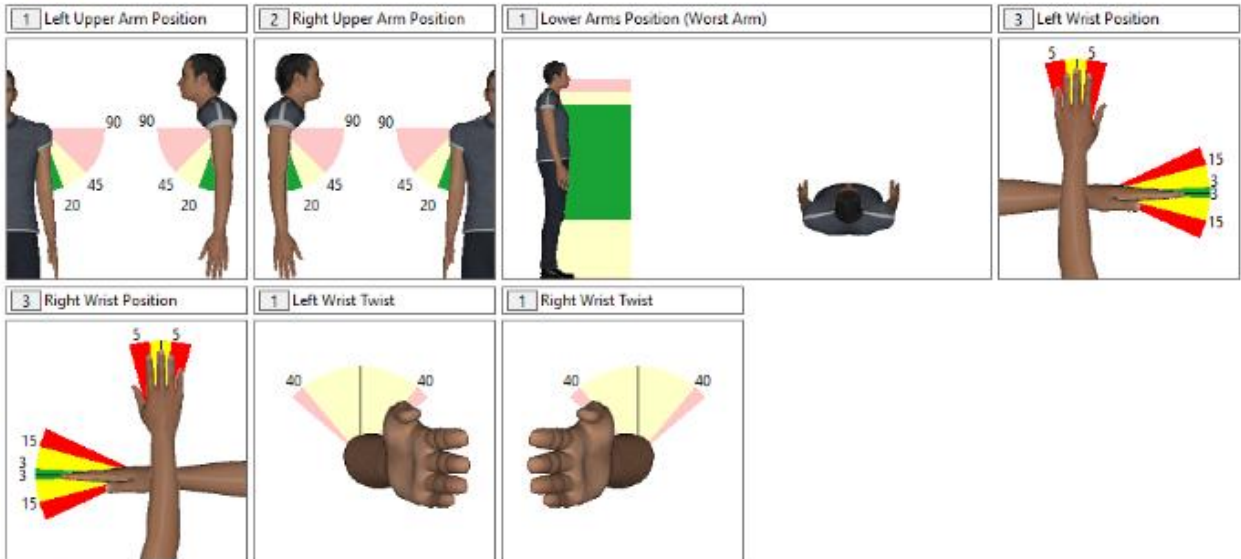
Grand RULA score

1 Muscle use score

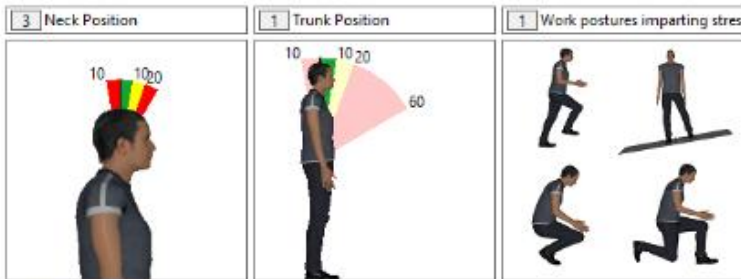
0 Force/Load score

Ilustración 2.3: Evaluación RULA Caso 2 colocando el clip Plano

3 Group A: Arm and Wrist Analysis



3 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



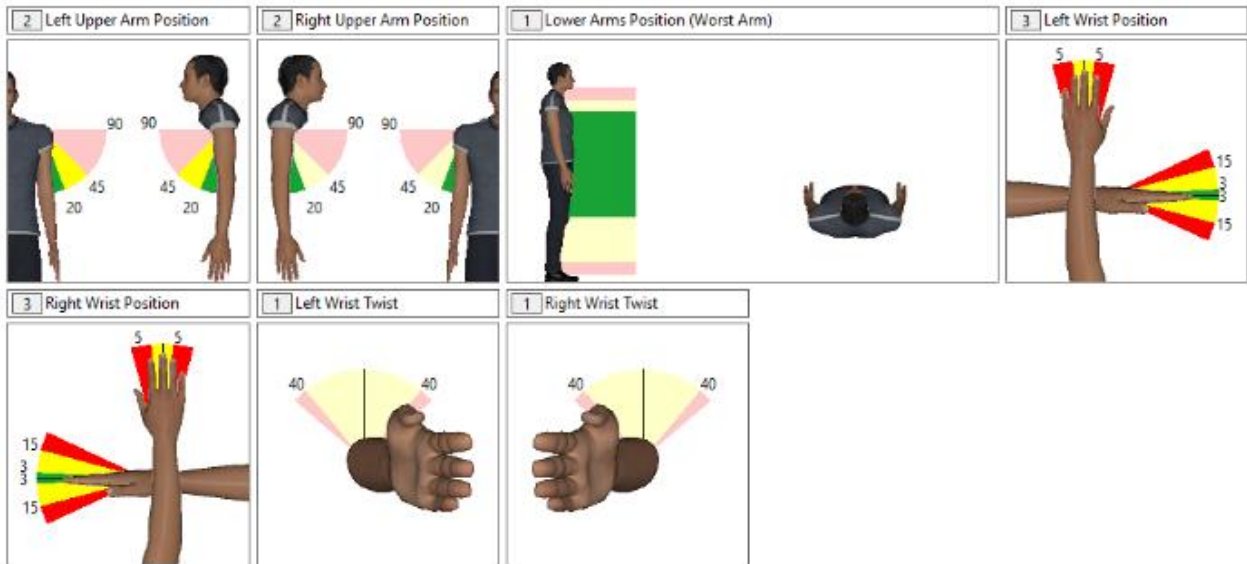
4 Grand RULA score

1 Muscle use score

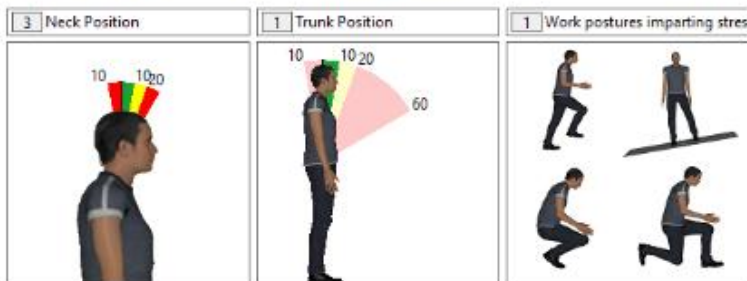
0 Force/Load score

Ilustración 2.4: Evaluación RULA Caso 2 colocando el clip Circular

3 Group A: Arm and Wrist Analysis



3 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



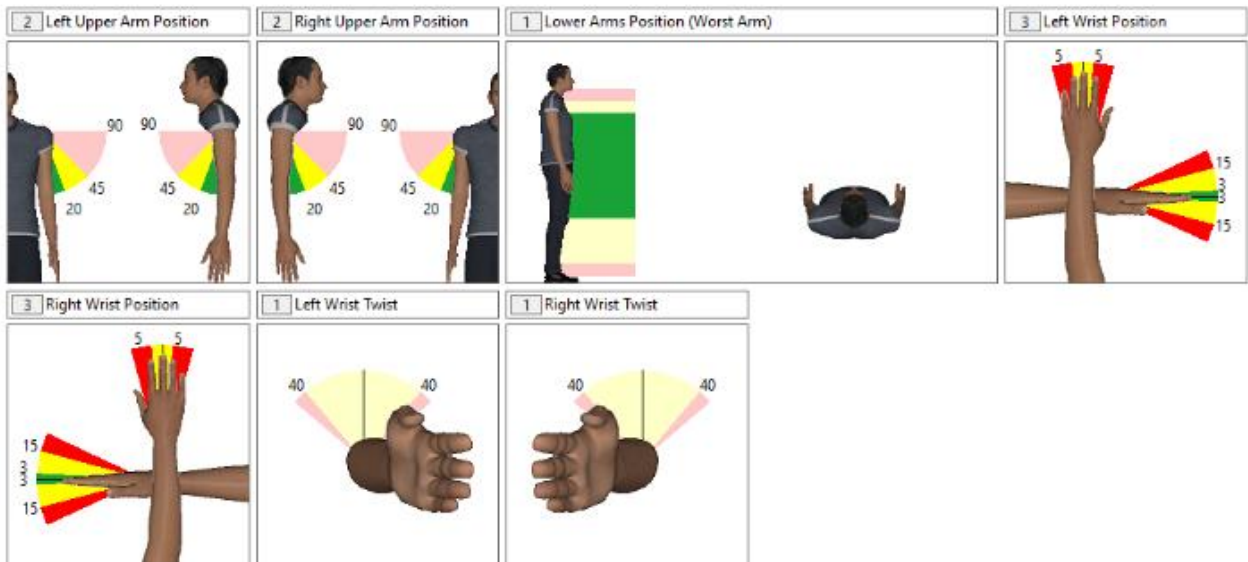
4 Grand RULA score

1 Muscle use score

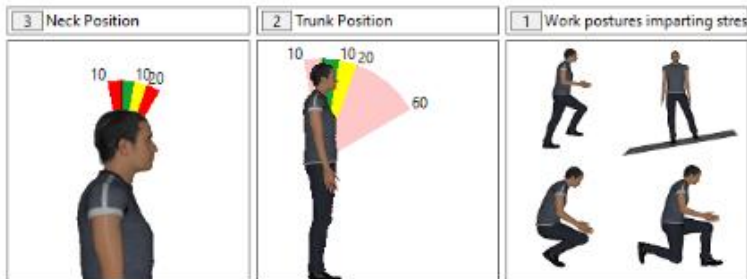
0 Force/Load score

Ilustración 2.5: Evaluación RULA Caso 3 colocando el clip Plano

3 Group A: Arm and Wrist Analysis



3 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



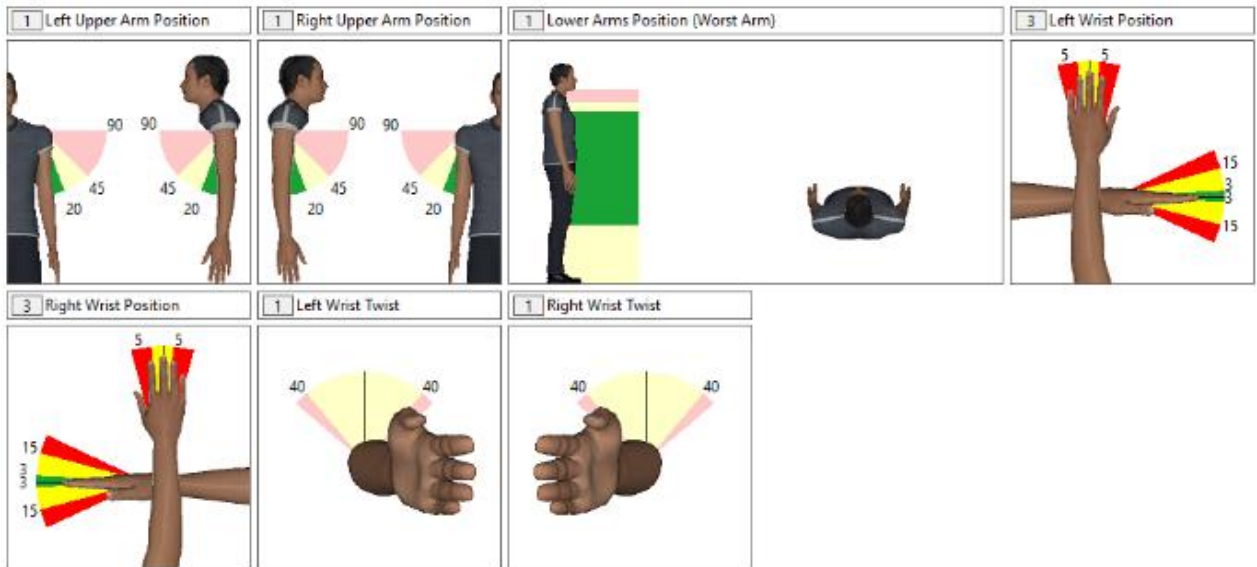
4 Grand RULA score

1 Muscle use score

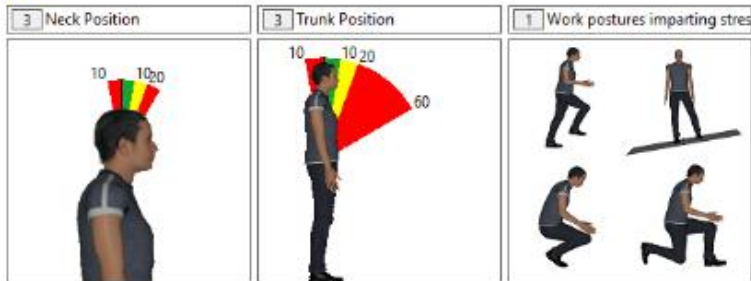
0 Force/Load score

Ilustración 2.6: Evaluación RULA Caso 3 colocando el clip Circular

2 Group A: Arm and Wrist Analysis



4 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



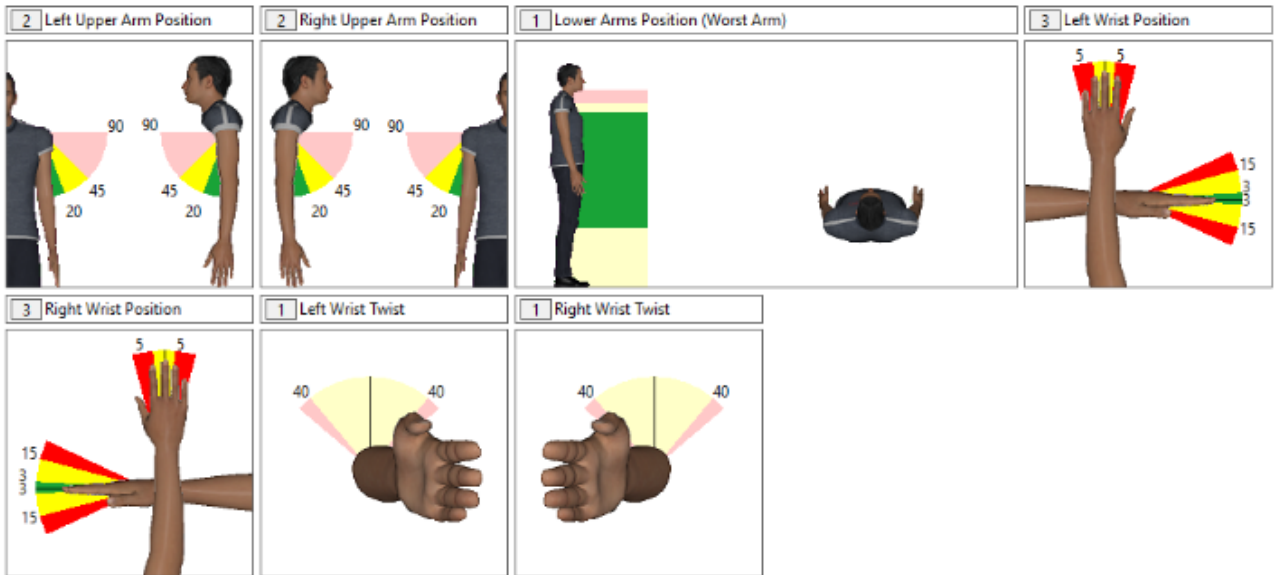
4 Grand RULA score

1 Muscle use score

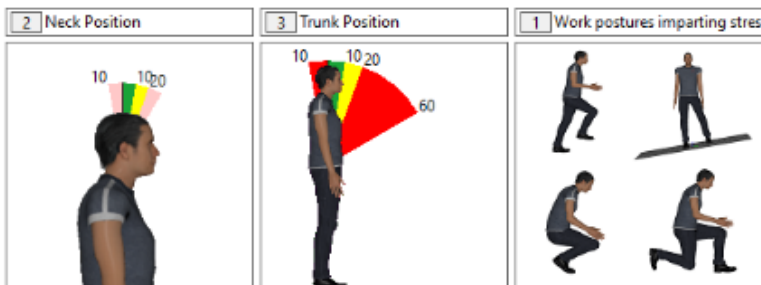
0 Force/Load score

Ilustración 2.7: Evaluación RULA Caso 4 colocando el clip Plano

3 Group A: Arm and Wrist Analysis



4 Group B: Neck, Trunk and Leg Analysis



5 Grand RULA score

Ilustración 2.8: Evaluación RULA Caso 4 colocando el clip Circular

Anexo 3

En este apéndice encontrará imágenes de los nuevos diseños de clips impresos en 3D.

Clip Plano



Ilustración 3.1: Concepto 1 Clip Plano



Ilustración 3.2: Concepto 2 Clip Plano



Ilustración 3.3: Concepto 3 Clip Plano

Clip Circular

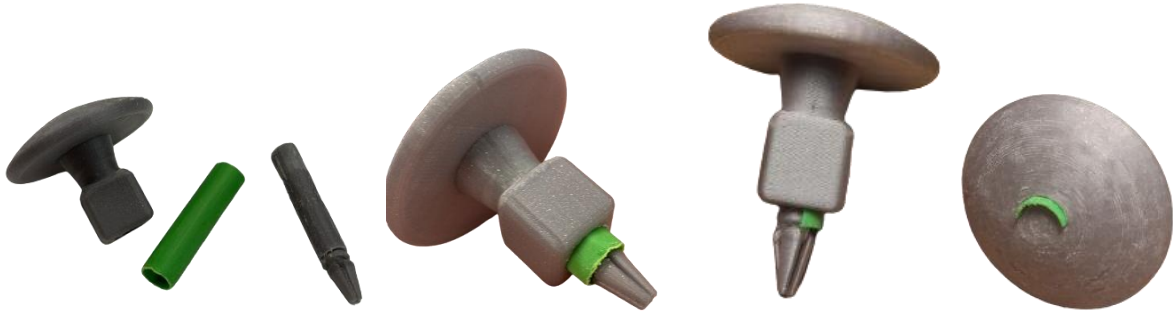


Ilustración 3.4: Concepto 1 Clip circular, con todo el cilindro de indicador y luego con el medio cilindro.



Ilustración 3.5: Concepto 2 Clip circular con el semicilindro indicador

Clip Colaboración Humano-Robot



Ilustración 3.6: Concepto 1 Clip colaboración humano-robot

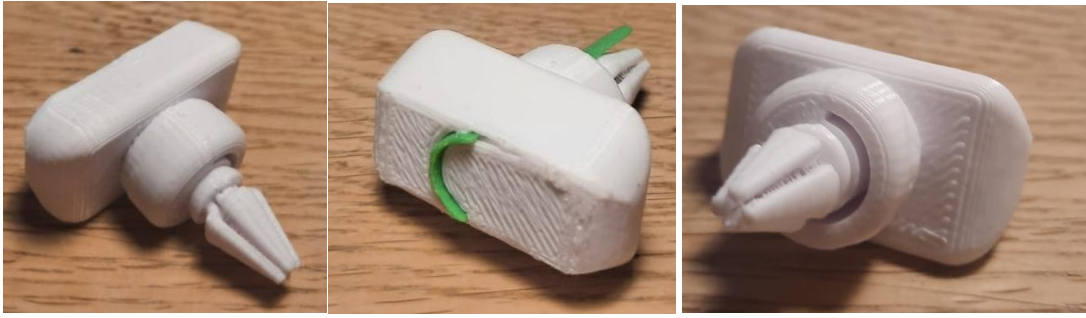


Ilustración 3.7: Concepto 4 Clip colaboración humano-robot



Ilustración 3.8: Concepto 5 Clip colaboración humano-robot