



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Diseño de un chaleco con soporte para un  
brazo de asistencia a personas con  
discapacidad

AUTOR: Jorge Barragán Nadal  
TUTOR: Ranko Zotovic

Trabajo final de Máster Curso Académico: 2019 - 2020



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	7
1- ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DEL CHALECO.....	8
1.1 - Antropometría.....	8
1.2 – Primer modelo.....	11
1.3 – Definición del sistema de apertura.....	11
1.3.1- Sistema de apertura.....	12
1.3.2 – Sistema de cierre.....	13
1.4– Diseño para adaptación de talla.....	14
2- SEGUNDA OPCIÓN DE DISEÑO.....	16
2.1 Apertura de parte inferior.....	18
2.2 Apertura de la parte superior.....	20
3 - DENOMINACIÓN Y DISEÑO DE LAS PIEZAS.....	21
3.1 Explosionado del chaleco:.....	21
3.2 Ensamblaje trasero del chaleco.....	22
3.3 Ensamblaje delantero del chaleco.....	24
3.4 Cierre milimétrico.....	25
3.5 Resumen de partes.....	26
Piezas necesarias para el montaje del chaleco:.....	26
Piezas necesarias para el mecanismo de apertura inferior.....	28
4- CALCULOS Y SIMULACIONES SOBRE EL MODELO.....	29
4.1 Material empleado: Filamento ABS.....	29
4.2 Análisis estático: Creación en SolidWorks.....	30
4.3 Análisis estático: Sub-ensamblaje delantero.....	32
4.4 Análisis estático: Sub-ensamblaje trasero.....	38
5 - ELECCIÓN DE LA BATERÍA.....	40
5.1 Tabla comparativa de baterías.....	42
6 - SISTEMAS DE CARGA PARA BATERÍAS LIPO.....	43
6.1 Tabla comparativa de cargadores.....	44
7 - CARGA DE BATERÍAS LIPO EN PARALELO.....	44
7.1 Conexión en paralelo de baterías LiPo.....	45
7.2 Consumo eléctrico del brazo.....	46
7.3 Modelo de 4 grados de libertad en tarea “beber agua”.....	47



7.4 Modelo de 5 grados de libertad en tarea “beber agua” .....	48
7.5 Modelo de 4 y 5 grados de libertad con valores máximos de par .....	49
8 - VERIFICACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE CONSUMO .....	49
8.1 Criterio de duración de la batería .....	49
8.2 Criterio de C Rate.....	50
9 - TABLA COMPARATIVA DE CÁMARAS .....	51
10 - ANTECEDENTES PARA EL SISTEMA DE VISIÓN: TRIANGULACIÓN DE IMAGEN.....	52
11 - COMPONENTES ELECTRÓNICOS.....	55
12 - IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS .....	56
12.1 Preparación de archivos.....	57
12.2 Configuración de la impresora y funcionamiento .....	59
13 - MEJORAS Y CORRECCIONES APLICADAS TRAS LA IMPRESIÓN.....	61
13.1 Zonas con espesor reducido .....	61
13.2 Cierre Milimétrico .....	61
14 - PROGRAMA PARA APERTURA DEL CHALECO .....	63
PRESUPUESTO.....	65
RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
APÉNDICE: PLANOS .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espesor del cuerpo, de pie .....	8	
Figura 2: Anchura del pecho, de pie .....	9	
Figura 3: Espesor abdominal, sentado.....	9	
Figura 4: Vista delantera, cerrado	Figura 5: Vista delantera, abierto .....	11
Figura 6: Primera opción, bisagra	Figura 7: Rediseño bisagra integrada.....	11
Figura 8: Sistema de apertura.....	12	
Figura 9: Ensamblaje sobre pared .....	12	
Figura 10: Primer concepto de cierre, abierto	Figura 11: Primer concepto de cierre, cerrado .....	13
Figura 12: Segundo concepto de cierre, secuencia de movimientos.....	13	
Figura 14: Regulación de anchura, talla reducida .....	14	
Figura 13: Regulación de anchura, talla extendida .....	14	
Figura 15: Altura extensible .....	14	
Figura 16: Problema en extensibilidad vertical .....	15	
Figura 17: Solución a extensibilidad vertical .....	15	
Figura 18: Segunda opción de diseño, abierto	Figura 19: Segunda opción de diseño, cerrado .....	16
Figura 20: Cierre en detalle 2	Figura 21: Cierre en detalle 2.....	16
Figura 22: Comparación apertura, opción final	Figura 23: Comparación apertura, opción inicial .....	17
Figura 24: Modelo definitivo, ensamblaje final .....	18	
Figura 25: Secuencia de funcionamiento mecanismo apertura inferior .....	19	
Figura 26: Ensamblaje chaleco sobre soporte .....	19	
Figura 27: Apertura del chaleco sobre pared .....	20	
Figura 28: Secuencia de liberación del trinquete de cierre.....	20	
Figura 29: Explosionado del chaleco, vista contraída.....	21	
Figura 30: Explosionado del chaleco, vista expandida.....	21	
Figura 31: Vista isométrica, PiezaA_2	Figura 32: Vista isométrica, PiezaA_2.....	22
Figura 33: Vista isométrica, Pieza B_1	Figura 34: Vista isométrica. Pieza B_2 .....	22
Figura 35: Vista isométrica, PiezaC_RH	Figura 36: Vista isométrica, PiezaC_LH.....	23
Figura 37: Vista isométrica, PiezaD .....	23	
Figura 38: Vista isométrica, PiezaE_RH	Figura 39: Vista isométrica, PiezaE_LH .....	24
Figura 40: Vista isométrica, PiezaF.....	24	
Figura 41: Vista isométrica, PiezaG .....	25	
Figura 42: Vista isométrica, Cierre_milimétrico .....	25	
Figura 43: Vista isométrica, Soporte_cierre .....	25	
Figura 44: Vista isométrica, Trinquete.....	26	
Figura 45: Asesor de sujeciones SolidWorks .....	30	
Figura 46: Asesor de cargas SolidWorks .....	31	
Figura 47: Asesor de conexiones SolidWorks.....	31	
Figura 48: Sub-ensamblaje delantero, apoyo abdominal	Figura 49: Sub-ensamblaje delantero, bisagras .....	32
Figura 50: Brazo robótico.....	33	
Figura 51: Posición brazo robótico	Figura 52: Sub-ensamblaje delantero, fuerza aplicada .....	34
Figura 53: Mallado sub-ensamblaje delantero .....	34	
Figura 54: Primer cálculo de tensión, sub-ensamblaje delantero .....	35	
Figura 55: Segundo cálculo de tención, sub-ensamblaje delantero.....	36	



Figura 56: Deformaciones primer estudio estudio.....	Figura 57: Deformaciones segundo estudio.....	37
Figura 58: Deformaciones tercer estudio .....		37
Figura 59: Sujeciones sub-ensamblaje trasero .....		38
Figura 60: Sujeciones sub-ensamblaje trasero .....		38
Figura 61: Mallado sub-ensamblaje trasero trasero .....	Figura 62: Detalles malla sub-ensamblaje trasero .....	39
Figura 63: Tensión de von Misses, sub-ensamblaje trasero.....		39
Figura 64: Deformaciones sub-ensamblaje trasero .....		40
Figura 65: Carga de almacenaje .....		43
<i>Figura 66: Placa de carga paralela sin fusibles</i> .....	<i>Figura 67: Placa de carga paralela con fusibles</i> .....	45
Figura 68: Esquema de carga en paralelo .....		46
Figura 69: Geometría epipolar, caso ideal .....		52
Figura 70: Geometría epipolar, caso real .....		53
Figura 71: Propuesta de ubicación de cámaras .....		54
Figura 72: Soporte para cámaras .....		54
Figura 73: Ensamblaje de soporte cámaras .....		55
Figura 74: ESCON Module 50/5 A 4-Q Servocontroller.....		55
Figura 75: Puertos Raspberry Pi4 .....		56
Figura 76: Creality CR-10S .....		57
Figura 77: Parámetros de impresión 1 .....		57
Figura 78: Parámetros de impresión 2 .....		58
Figura 79: Calibración de la impresora .....		59
Figura 80: Precalentamiento de la impresora.....		59
Figura 81: Imprimir desde SD .....	Figura 82: Laca empleada.....	60
Figura 83: Pieza en Ultimaker Cura .....		60
Figura 84: Impresión de PiezaB_1 NOK .....		61
Figura 85: Simulación PiezaB_1 NOK rediseñada.....	Figura 86: Simulación PiezaB_1 rediseñada.....	61
Figura 87: Cierre milimétrico, primer diseño.....		62
Figura 88: Rediseño de cinta milimétrica .....		62
Figura 89: Rediseño del soporte del cierre.....		62
Figura 90: Cierre milimétrico, diseño final .....		62
Figura 91: Esquema de conexión, automatismo de apertura con Arduino.....		64



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Antropometría media española .....	10
Tabla 2: Resumen de piezas, ensamblaje chaleco .....	27
Tabla 3: Resumen de piezas, ensamblaje apertura y soporte .....	29
Tabla 4: Detalle de malla, sub-ensamblaje delantero .....	35
Tabla 5: Comparativa de baterías .....	42
Tabla 6: Comparativa de cargadores .....	44
Tabla 7: Valores nominales de par 4 g.d.l .....	47
Tabla 8: Valores nominales de par 5 g.d.l .....	48
Tabla 9: Valores de par máximos .....	49
Tabla 10: Duración de las baterías .....	49
Tabla 11: Valores máximos de consumo de corriente .....	50
Tabla 12: Comparativa de cámaras de visión .....	51
Tabla 13: Presupuesto .....	65

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Modelo 4 g.d.l en tarea "Beber agua" .....	47
Gráfico 2: Modelo 5 g.d.l en tarea "Beber agua" .....	48



## RESUMEN

A raíz del proyecto realizado por José Antonio Mulet Alberola, en el que se diseñó y fabricó un brazo robot para personas con discapacidad, el profesor Ranko Zotovic me propuso el reto de diseñar un conjunto de elementos y soportes para poder utilizarlo. La idea principal, era crear una especie de chaleco para los usuarios, en el que integrásemos los componentes de alimentación y control del brazo robótico y que se pudiese poner y quitar sin necesidad de la ayuda de una segunda persona.

Este chaleco, debía ser lo más ergonómico posible, a la par que ligero. Además, pensamos en que, si se pudiese adaptar el tamaño para personas de diferentes condiciones físicas, no sería necesario reajustar el diseño de cada pieza a la hora de crear y ensamblar chalecos para distintos usuarios.

Además, se pretende diseñar un soporte sobre el que se deje almacenado tanto el chaleco como el brazo cuando la persona no lo necesite, incorporando a este soporte la tecnología y soluciones para recargar las baterías que almacenan la energía necesaria para el movimiento del robot.

El primer prototipo que se realice será destinado a una persona con síndrome de "Fail Arm", que le imposibilita mover los brazos, impidiéndole realizar tareas básicas como meter y sacar alimentos a la nevera o beber agua.

## ABSTRACT

Due to the master thesis written by José Antonio Mulet Alberola, in which he designed and built a robot arm for disabled people, the project coordinator Ranko Zotovic gave me the opportunity to design a support to carry it. The main goal was to create a kind of vest for the users in which we could integrate the power and control elements for the robot arm. In addition, the users should be able to go inside and outside of the vest without other person help.

The solution should be ergonomic and as lightest as possible. Therefore, we came up with the idea of designing a system that could be adapted to the size of different people. In that way, we won't need to redesign or adjust the size of every part if other person needs to use it.

The first prototype will go to a person that suffers "Fail Arm". It doesn't allow him to use his arms, so he cannot perform basic tasks as take the food from the fridge or drink water.

# 1- ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DEL CHALECO

Como inicio en el diseño del chaleco, en el que se pueda acoplar el brazo robótico para su uso, se plantearon los requisitos que debía cumplir de cara al diseño y características.

- **Sencillez y ligereza:** Se debe diseñar de forma que añada el mínimo peso posible, al peso del propio brazo robot, para reducir el esfuerzo de la persona que lo porte. Además, cuanto más sencillas sean las geometrías de las piezas que lo componen, se plantearían menos problemas a la hora de fabricarlas.
- **Ergonomía:** El chaleco debe ser cómodo para la persona que lo lleve, contando con elementos amortiguadores necesarios.
- **Adaptable:** La talla debe ser adaptable, para que pueda ser utilizado por personas de diferentes tamaños y constituciones físicas.
- **Auto-acoplable:** Debido a las posibles discapacidades de las personas a las que está dirigido el proyecto, el chaleco debe contar con un sistema para que alguien pueda ponérselo y quitárselo sin necesidad de utilizar las manos ni de ayuda externa.
- **Carga automática:** El soporte diseñado, sobre el que se dejará el chaleco con el brazo acoplado, cuando no se precise de su utilización, deberá llevar un sistema de auto-conexión, para poder cargar las baterías del brazo robótico.

## 1.1 - Antropometría

Siguiendo la UNE – EN ISO 7250, se definen las medidas básicas a tener en consideración para el diseño del chaleco:

### 4.1.10 Espesor del cuerpo, de pie

**Descripción:** Máximo espesor del cuerpo

**Método:** El sujeto se sitúa de pie totalmente erguido, con la espalda contra una pared, los pies juntos y los brazos colgando libremente hacia abajo.

**Instrumento:** Antropómetro



Figura 1: Espesor del cuerpo, de pie

#### 4.1.11 Anchura del pecho, de pie

**Descripción:** Anchura del torso medida a nivel mesosternal

**Método:** El sujeto se sitúa de pie totalmente erguido, con los pies juntos y los brazos colgando libremente hacia abajo.

**Instrumento:** Antropómetro (pie de rey grande), compás de espesores grande.



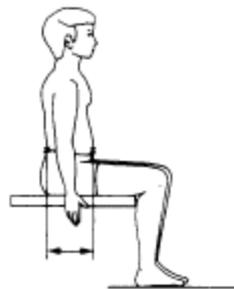
*Figura 2: Anchura del pecho, de pie*

#### 4.2.15 Espesor abdominal, sentado

**Descripción:** Máximo espesor del abdomen en posición sentado.

**Método:** El sujeto se sitúa sentado, completamente erguido y con los brazos colgando libremente hacia abajo.

**Instrumento:** Antropómetro (pie de rey grande)



*Figura 3: Espesor abdominal, sentado*

Según las medidas definidas, se observa el estudio de las longitudes que nos interesan para el diseño del chaleco, promediando las medidas observadas entre hombres y mujeres:

Datos antropométricos de la población española (diciembre 1996 - corregidos octubre 1999)											
	Nº (Refer. ISO 7250: 1996)	Designación	Tamaño muestra	Media	Desviación típica	Error típico	Percentiles				
							P1	P5	P50	P95	P99
Hombres	8 (4.1.9)	<b>Espesor del pecho, de pie</b>	1129	250,95	25,73	0,766	191	209	251	292	318
	10 (4.1.11)	<b>Anchura del pecho</b>	1129	321,35	26,97	0,803	253	280	320	364	389
	24 (4.2.15)	<b>Espesor abdominal, sentado</b>	1127	254,24	39,95	1,19	169	190	254	320	356
Mujeres	8 (4.1.9)	<b>Espesor del pecho, de pie</b>	593	245,75	28,73	1,18	193	207	241	304	329
	10 (4.1.11)	<b>Anchura del pecho</b>	593	283,16	28,01	1,15	230	247	280	328	374
	24 (4.2.15)	<b>Espesor abdominal, sentado</b>	592	213,245	38,897	1,599	150	163	206	289	325

Tabla 1: Antropometría media española

El espesor del pecho promediado es de 24,83 cm. Por lo que en el diseño se ha dejado un espesor máximo de 240 mm, ya que el uso principal será doméstico, donde no solemos llevar gruesas prendas de vestir.

En cuanto a la anchura del pecho, el promedio entre hombres y mujeres es de 302,25 mm. Dado que esta medida debe coincidir con la parte exterior de los tirantes superiores, se ha aplicado el criterio más restrictivo para asegurar que los soportes apoyan sobre la parte más plana de los hombros, haciendo que el conjunto sea más estable y evitando que se pueda salir del cuerpo perdiendo estabilidad. Por ello, la medida de anchura máxima del chaleco es de 290,8 mm, siendo ajustable a 277 mm y 256 mm con la posición más reducida. En cualquier caso, después de las primeras pruebas a escala real, será fácil configurar estas distancias sobre el diseño inicial

Para el espesor abdominal, el promedio entre hombres y mujeres es de 233,74 mm. Al igual que en el resto de las medidas, se ha cogido la medida promedio como el máximo. En la parte del ensamblaje que rodea la cintura se puede regular la distancia utilizando el cierre milimétrico, por lo que la distancia máxima estará en 230 mm pudiendo reducirse hasta 194 mm.

## 1.2 – Primer modelo

Inicialmente, se realizó un modelo con una estructura que envuelve el cuerpo humano por los hombros y la cintura, intentando imitar la geometría de un chaleco.

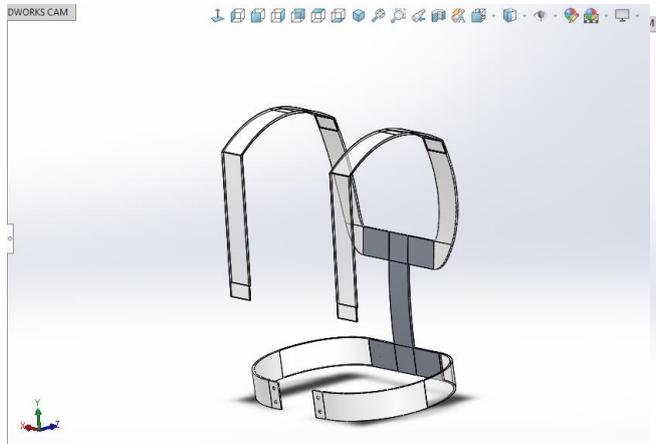


Figura 4: Vista delantera, cerrado

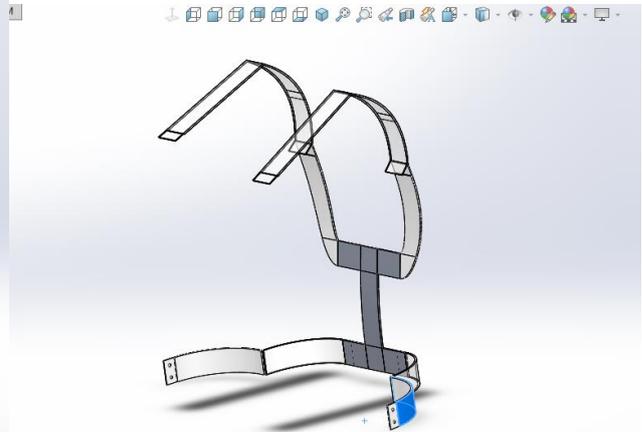


Figura 5: Vista delantera, abierto

La idea, es que las piezas resaltadas en gris oscuro, que componen la base del chaleco, se rediseñasen y modificasen para que puedan ser extensibles, de forma que permitirían adaptar la talla para personas más o menos altas, y más o menos anchas de espalda y cintura.

Sobre este primer modelo, se diseñaron y acoplaron las bisagras necesarias, para poder abrir y cerrar el diseño propuesto y definir las dinámicas de movimiento. En una segunda fase, se replanteará el montaje de bisagras, al integrar las articulaciones en las propias piezas del ensamblaje. De esta forma, simplificamos y eliminamos componentes.

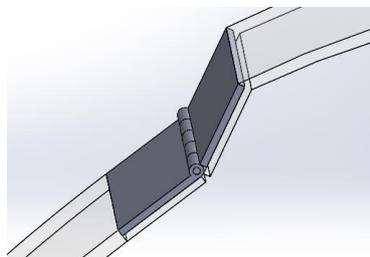


Figura 6: Primera opción, bisagra

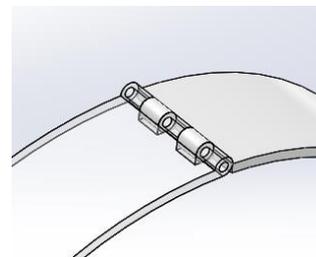


Figura 7: Rediseño bisagra integrada

## 1.3 – Definición del sistema de apertura

Para evitar añadir más peso al conjunto, se descartó la opción de montar pequeños motores eléctricos, que realizasen la función de abrir los mecanismos del chaleco. En su lugar, se optará por buscar una solución que permita al usuario dejar el chaleco sobre un soporte anclado en la pared y que este mismo tenga un sistema capaz de liberarlo.

Hay 4 bisagras sobre las que rotan las 2 piezas que apoyan sobre los hombros y las 2 piezas que conforman el soporte que envuelven la cintura. En la segunda fase de diseño, se eliminan las 2 bisagras inferiores dejando únicamente las superiores.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el de que sea posible quitarse el chaleco si hay un corte de luz y las baterías del brazo están totalmente descargadas.

Para abrir los 2 soportes de los hombros, se realizó un primer modelo de barras, con una dinámica de movimiento similar a la de las barras de seguridad de las atracciones de feria. La idea es que un motor eléctrico que estaría localizado en el soporte de pared sobre el que se dejará el chaleco, abriese el conjunto dejándolo enganchado en la posición de reposo y carga.

El problema vendrá a la hora de abrir el chaleco por la parte de la cintura, ya que se necesitará otro mecanismo para poder liberar a la persona una vez almacenado. Por ello, fue necesario rediseñar la parte inferior del chaleco e inventar un sistema distinto que permitiese abrir y cerrar todo el conjunto sin emplear más motores.

### 1.3.1- Sistema de apertura

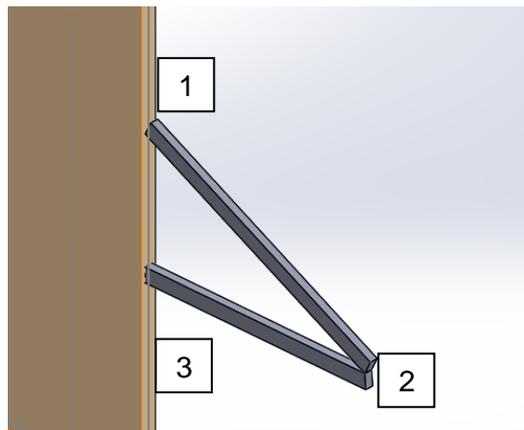


Figura 8: Sistema de apertura

El portador de chaleco se colocará de espaldas a la pared (objeto marrón en la Figura 8), enganchando los soportes de los hombros en el extremo 2. Accionando el motor eléctrico, se desplazaría el extremo 1 por una guía a lo largo de la pared y en sentido ascendente. De esta forma, el extremo 2 irá hacia arriba y hacia atrás abriendo los soportes y liberando la parte superior del cuerpo del portador del chaleco.

Se realizó un ensamblaje para observar el acoplamiento del sistema y el chaleco. Posteriormente, se deberá reajustar la longitud de las barras, para que el ángulo del extremo coincida con la curvatura descrita por el anclaje de apertura. Pero esto se realizará con el modelo definitivo.

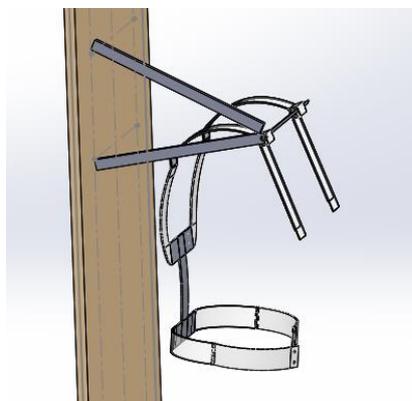


Figura 9: Ensamblaje sobre pared

### 1.3.2 – Sistema de cierre

Como se ha comentado anteriormente, el sistema de acople que mantenga el chaleco cerrado debe ser mecánico, para minimizar el peso y eliminar la dependencia de energía para poder abrirlo.

Como primera opción, se diseñó una horquilla que iría acoplada a las dos barras móviles superiores. La idea era que cerrando primero las barras de la cintura y bajando la parte superior, quedase todo acoplado y cerrado.

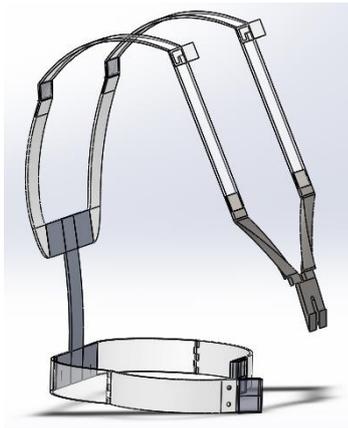


Figura 10: Primer concepto de cierre, abierto

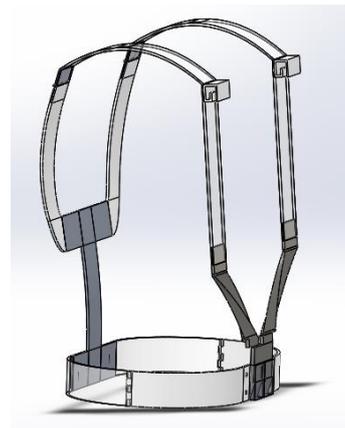


Figura 11: Primer concepto de cierre, cerrado

Con este concepto, surgió el problema de la necesidad de añadir otras 2 bisagras en la parte superior, haciendo que el sistema de apertura automático fuese más complejo.

Para solucionarlo, se rediseñó el sistema de acople, pasando de entrar por arriba en el acople de la cintura, a acoplar directamente desde delante. Así, se elimina la necesidad de incorporar 2 bisagras adicionales y dificultar la apertura automática.

A continuación, se muestra la secuencia de cómo se cerraría el ensamblaje completo:

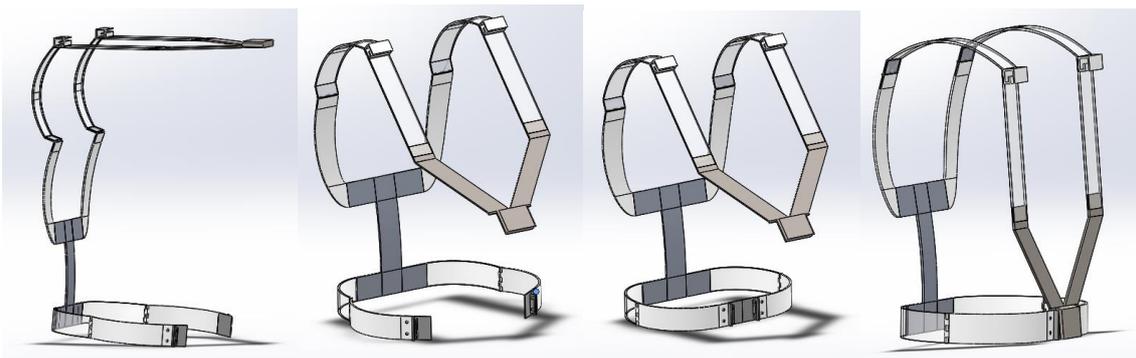


Figura 12: Segundo concepto de cierre, secuencia de movimientos

Este modelo facilita la apertura y cierre. Replanteando la apertura completa del conjunto, esta opción genera la necesidad de utilizar otro sistema automatizado para abrir y cerrar la parte de la cintura. Esto supondría otro motor adicional que conlleva más mantenimiento, más consumo eléctrico y por tanto potenciales problemas a largo plazo. Por ello, tras estudiarlo nuevamente con detenimiento, se definió un nuevo sistema de cierre en el que eliminaremos la necesidad de abrir la parte inferior.

## 1.4– Diseño para adaptación de talla

Para que el chaleco sea adaptable a personas con distinta talla, se diseñó un sistema extensible para aumentar tanto el ancho de la espalda y cintura como la longitud de la espalda.

Para la pieza común sobre la que se acoplan los amarres tanto de la cintura, como de los hombros, se decidió separar en 3 piezas distintas, guiadas por el centro y con unos orificios para poder configurar su anchura:

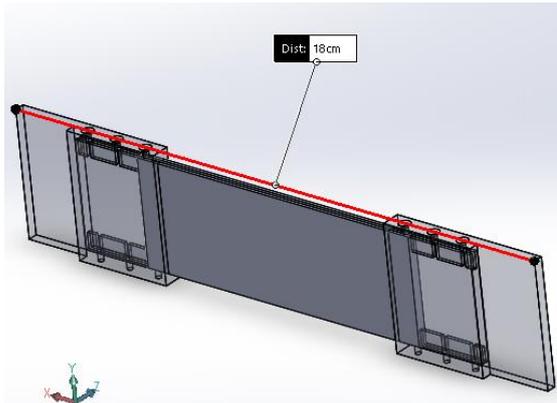


Figura 14: Regulación de anchura, talla reducida

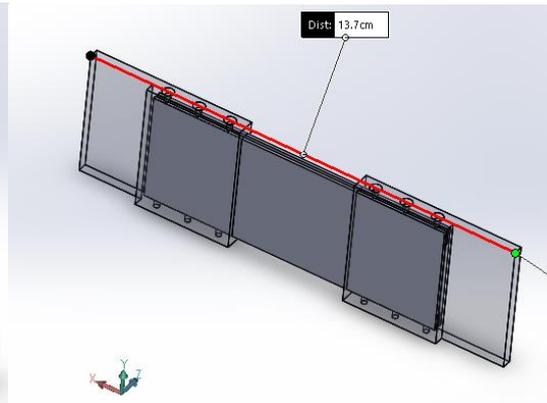


Figura 13: Regulación de anchura, talla extendida

La pieza central que se ubica detrás de la columna se separó en 2 piezas distintas, posibilitando la regulación de la altura del chaleco, para poder ajustarlo a personas más o menos altas:

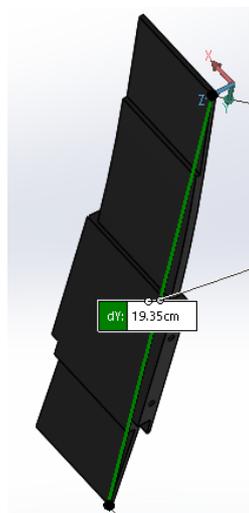


Figura 15: Altura extensible

Sin embargo, este diseño generó un problema en el conjunto del chaleco, ya que, al regular la altura, genera un desplazamiento hacia delante (al extenderlo) y hacia detrás (al contraerlo) de toda la parte superior. Esto se debe a la curvatura de la pieza.

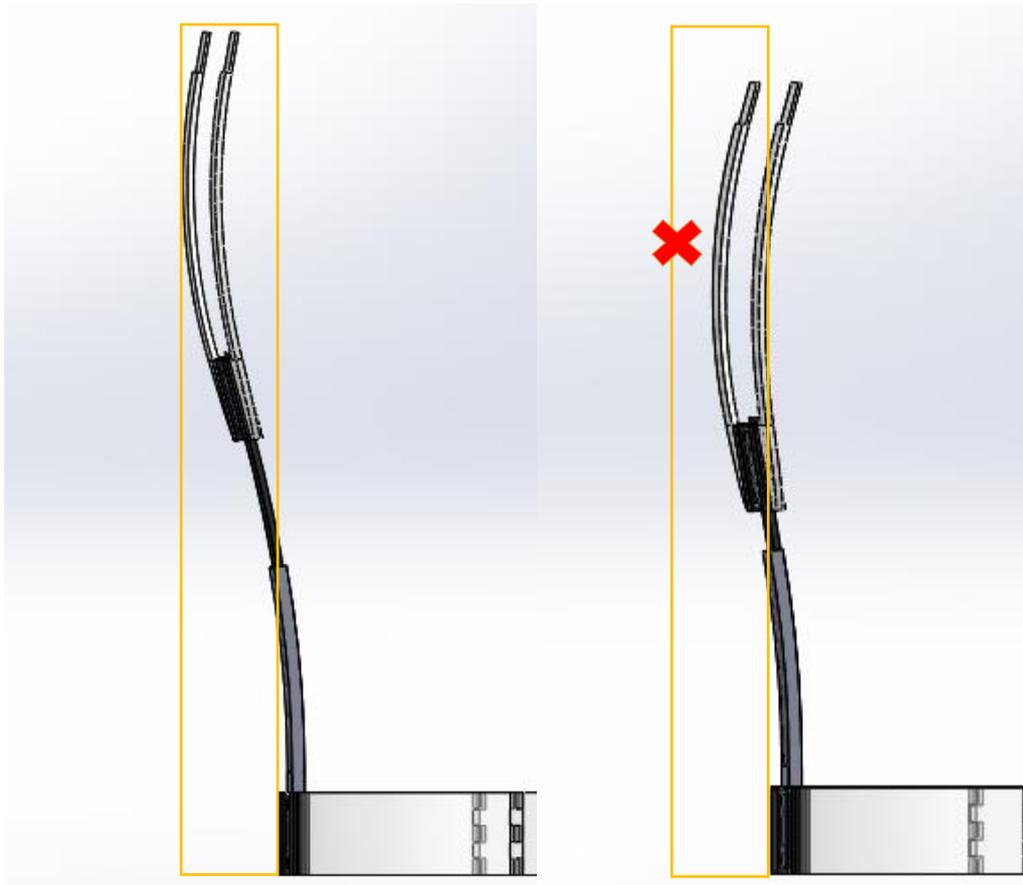


Figura 16: Problema en extensibilidad vertical

Como se puede observar en las anteriores imágenes, al reducir la altura de la parte superior mediante el ajuste de la pieza central extensible, se desplaza el soporte que apoya sobre los omoplatos hacia delante.

Para eliminarlo, se diseñó una pieza con el mismo concepto de extensibilidad, pero sin la curvatura inferior, eliminando el movimiento hacia delante y detrás del apoyo de los hombros.



Figura 17: Solución a extensibilidad vertical

## 2- SEGUNDA OPCION DE DISEÑO

Para intentar eliminar la necesidad de incorporar un segundo mecanismo de apertura, en la parte inferior de chaleco, que se fija a la cintura, se replanteó el diseño del conjunto completo. Los cambios planteados, conllevan la sujeción de las piezas G a los tirantes superiores que se elevan con el mecanismo de apertura que irá instalado en la pared. Este cambio, eliminaría el cierre del chaleco por la parte delantera, pasando a hacerse en la parte central de la cintura a ambos lados del sujeto.

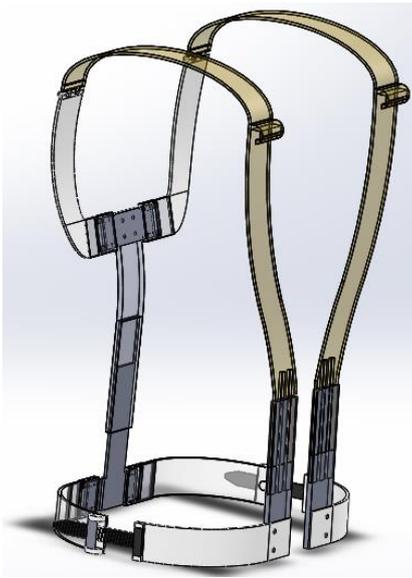


Figura 18: Segunda opción de diseño, abierto

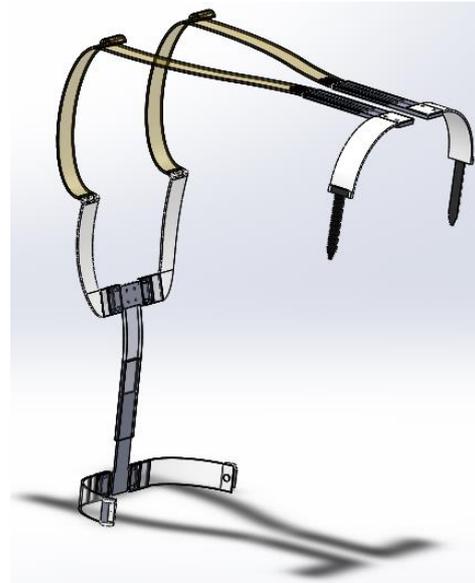


Figura 19: Segunda opción de diseño, cerrado

Con este nuevo concepto, en el que el chaleco se abre completamente utilizando solo las bisagras superiores, se elimina la necesidad de un segundo automatismo para liberar a la persona que lo lleve puesto.

Para que esto fuese posible, se tuvo que diseñar un sistema de fijación que además permitirá a la persona que lo lleve puesto aumentar o reducir el diámetro de la cintura cada vez que se lo ponga, posibilitando dejarlo más holgado con prendas grandes sin necesidad de que una segunda persona se lo ajuste.

El sistema trata de una pieza que bloquea la correa en cada diente a medida que se va cerrando:

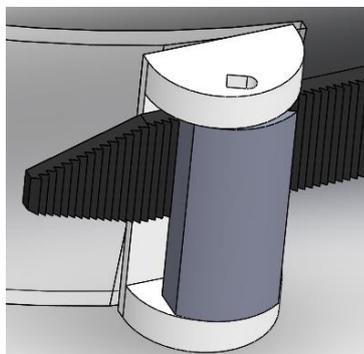


Figura 20: Cierre en detalle 2

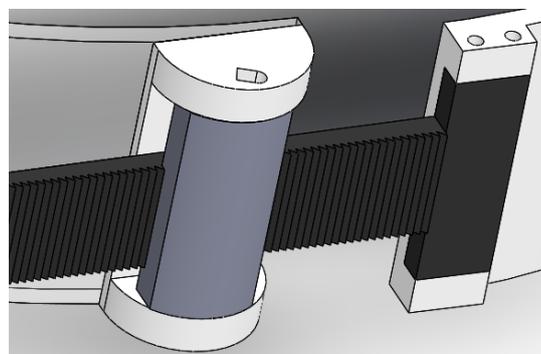
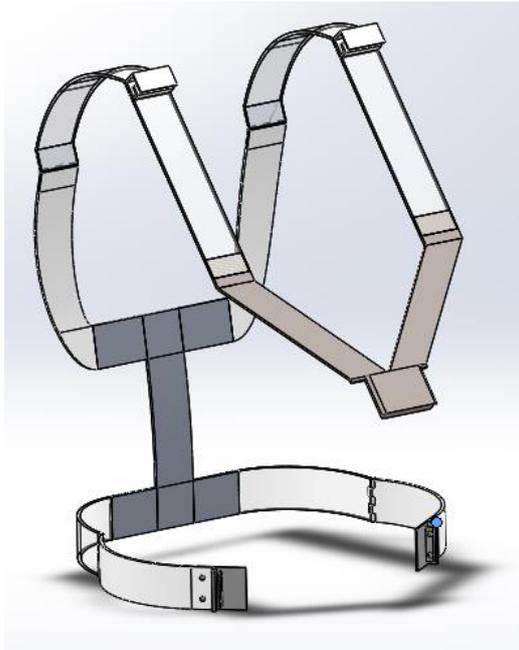


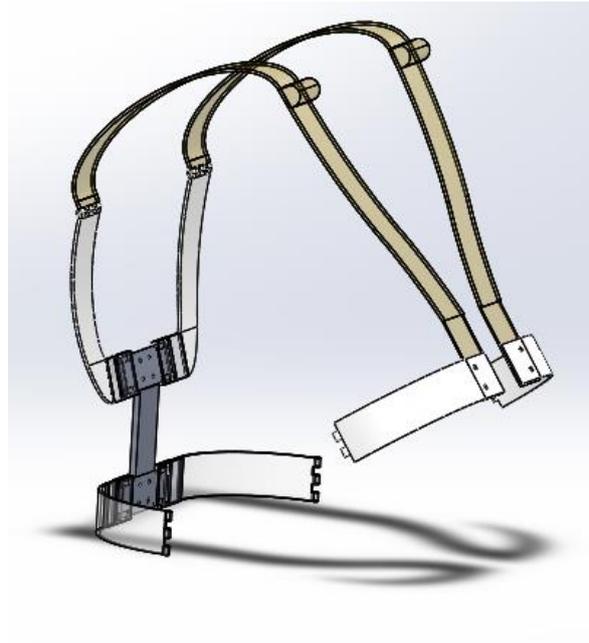
Figura 21: Cierre en detalle 2

Con este nuevo sistema, se amplían las posibilidades de liberar completamente la apertura del chaleco, simplemente desplazando el trinquete con forma de semicírculo. Sistema que se diseñará y explicará posteriormente.

Además, en este nuevo concepto de diseño se eliminan muchos componentes que daban forma a los tirantes, simplificando el conjunto y eliminando operaciones de montaje del mismo.



*Figura 22: Comparación apertura, opción final*



*Figura 23: Comparación apertura, opción inicial*

En estas figuras 22 y 23, podemos ver gráficamente el cambio de la apertura en 2 sistemas a la apertura en 1 solo tras replantear el diseño.

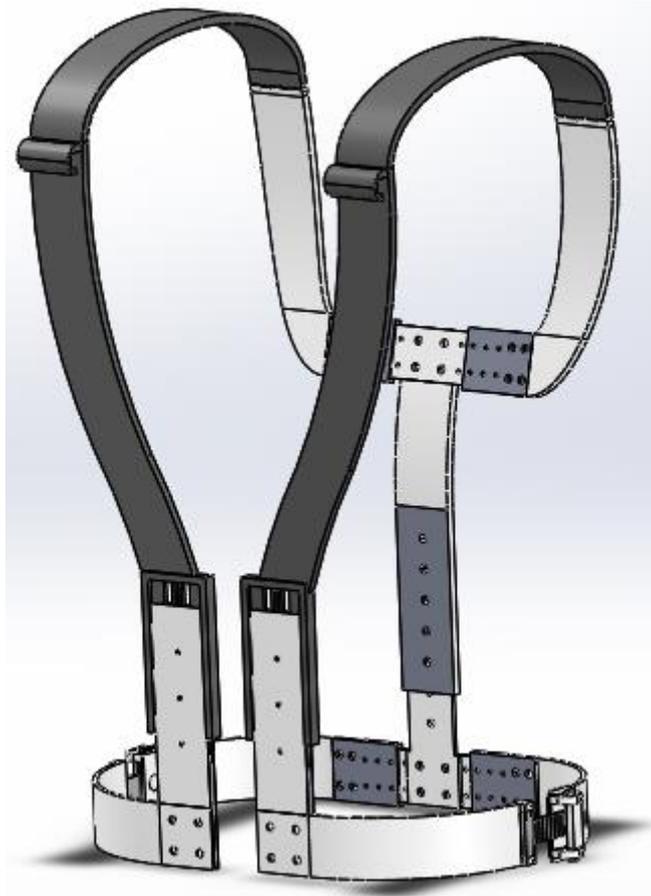


Figura 24: Modelo definitivo, ensamblaje final

Todo el diseño está pensado para poder abrir y cerrar el chaleco de forma manual, eliminando la dependencia de corriente eléctrica. En caso de un corte de luz, la persona que lo lleva podría pedir asistencia de una segunda persona para quitárselo, e incluso liberarse a si misma, dejando el chaleco sobre el soporte y empujando con el cuerpo la parte delantera una vez abiertos los trinquetes. El problema de salir sin utilizar la apertura es que después se deberá recolocar en la barra superior o se deberá entrar por debajo haciendo que sea mucho más incómodo y difícil de abrochar.

## 2.1 Apertura de parte inferior

Tras decidir los mecanismos y piezas que compondrán el conjunto, quedaba el reto de diseñar un accionador que liberase el anclaje inferior para permitir la apertura del chaleco.

En una primera fase, se analizó la posibilidad de que la barra superior que abre el chaleco fuese la que accionase un mecanismo para liberar el trinquete de la cintura. Sin embargo, todas las opciones añadían peso y complejidad al diseño, además de hacerlo más aparatoso.

Intentando prescindir de un segundo motor eléctrico para realizar la tarea de abrir el cierre milimétrico inferior, se diseñó un ensamblaje accionable con el pie permitiendo a personas con cualquier tipo de discapacidad en las extremidades superiores accionar los mecanismos. Como resultado, se diseñó una especie de cerrojo accionable con el pie, que desplaza hacia delante el trinquete y lo deja abierto para poder abrir la parte superior utilizando el automatismo de apertura.

A continuación, se describe el funcionamiento del mecanismo:

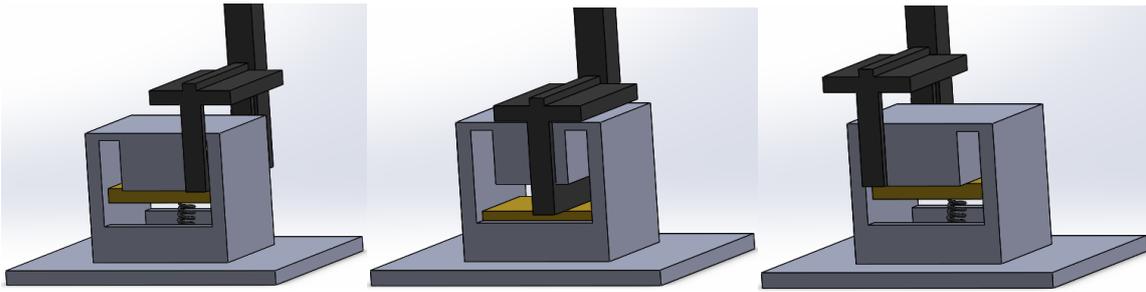


Figura 25: Secuencia de funcionamiento mecanismo apertura inferior

Al presionarlo con el pie la placa sobre la que apoya baja, permitiendo al usuario desplazarlo hacia delante y liberar el trinquete. Cuando dejamos de aplicar presión, el resorte de su interior lo hace subir otra vez, bloqueando el ensamblaje en la posición de abierto.

Sobre este “cerrojo” va montada una barra que presionará el trinquete, liberando el cierre.

Para que este mecanismo fuese adaptable en altura, el diseño de esta barra se ha realizado en dos piezas separadas, permitiendo regular la longitud.

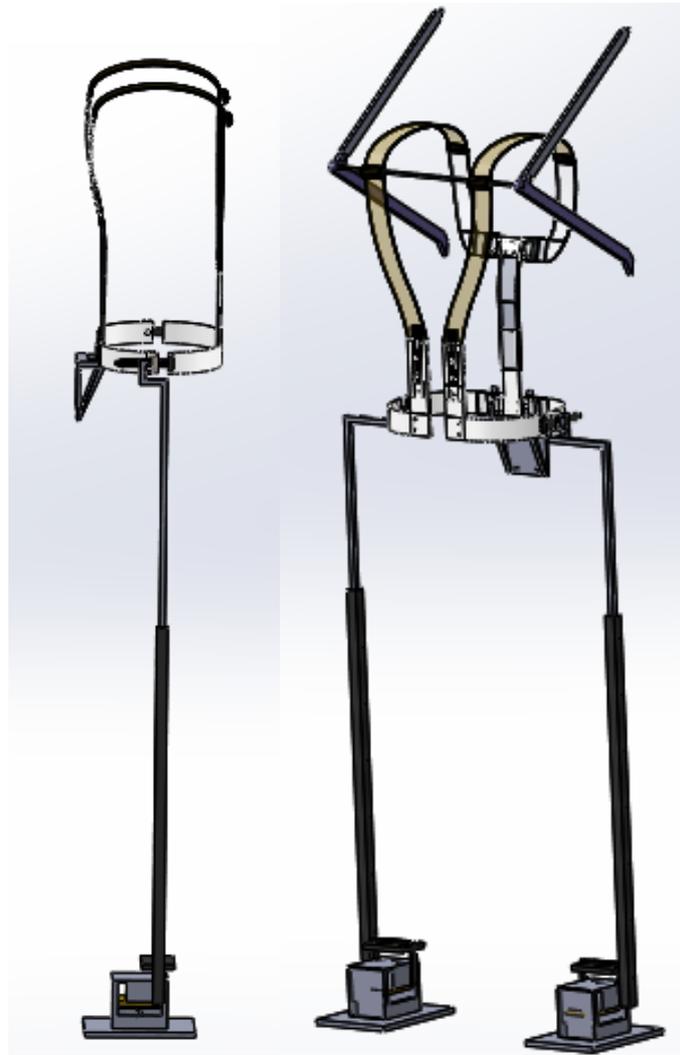


Figura 26: Ensamblaje chaleco sobre soporte

## 2.2 Apertura de la parte superior

Una vez abierto el cierre según se explica en el apartado anterior, se podrá accionar el motor eléctrico que desplazará la barra superior. Utilizando uno de los dos pies, se bajará la barra para enganchar el chaleco, y una vez enganchado se accionará el motor en sentido contrario haciendo que la barra se desplace hacia arriba y abrirá el chaleco. Además, la idea es que cuando el chaleco llegue a la posición de apertura completa, haga contacto con el cargador, poniendo las baterías Li-Po a cargar inmediatamente y de forma automática.

En estas figuras, se puede ver como el mecanismo del motor desplazará la barra hacia arriba liberando al usuario:

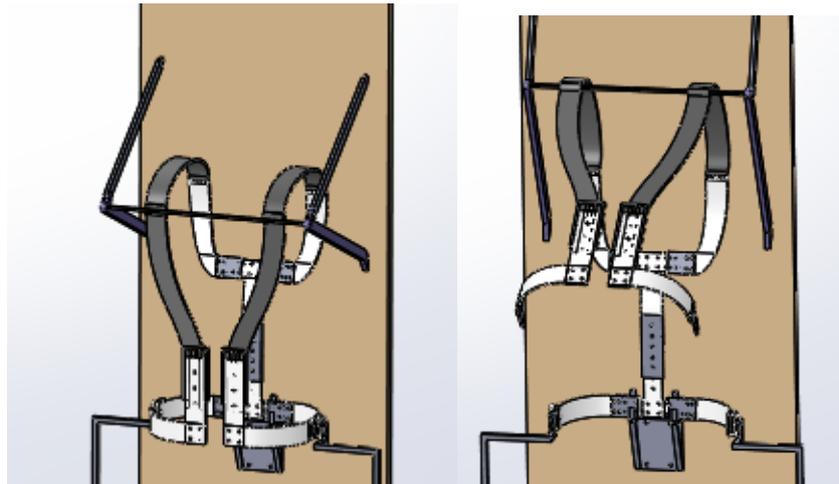


Figura 27: Apertura del chaleco sobre pared

A continuación, se muestra el funcionamiento de apertura del cierre milimétrico.

Dado que el desplazamiento que se debe recorrer para liberar el trinquete debe ser mucho menor, se deberá anclar en el suelo en la posición adecuada para que desplace el trinquete y libere la cinta justo cuando esté en el extremo.

En esta secuencia, se puede ver en detalle como el desplazamiento del pedal mostrado anteriormente, empuja el trinquete hacia delante dejando la cinta milimétrica libre. Así, el chaleco podrá abrirse como muestra la secuencia de imágenes:

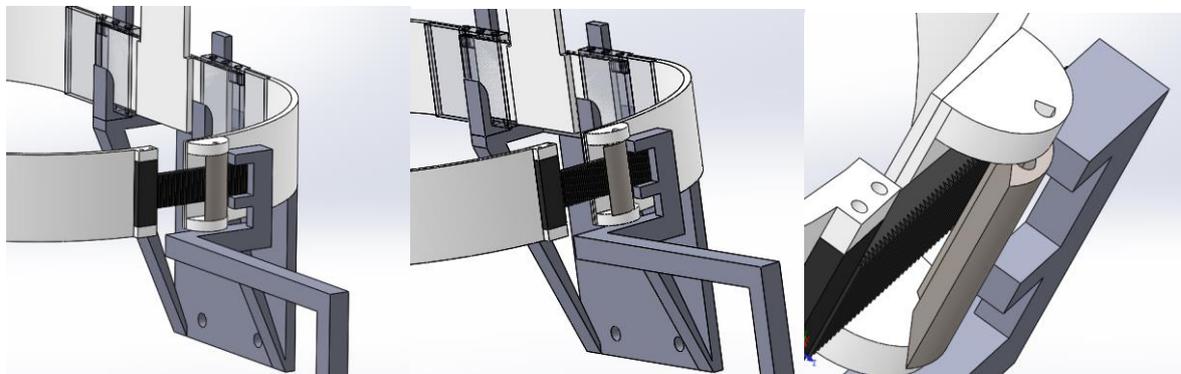


Figura 28: Secuencia de liberación del trinquete de cierre

### 3 - DENOMINACIÓN Y DISEÑO DE LAS PIEZAS

#### 3.1 Explosionado del chaleco:

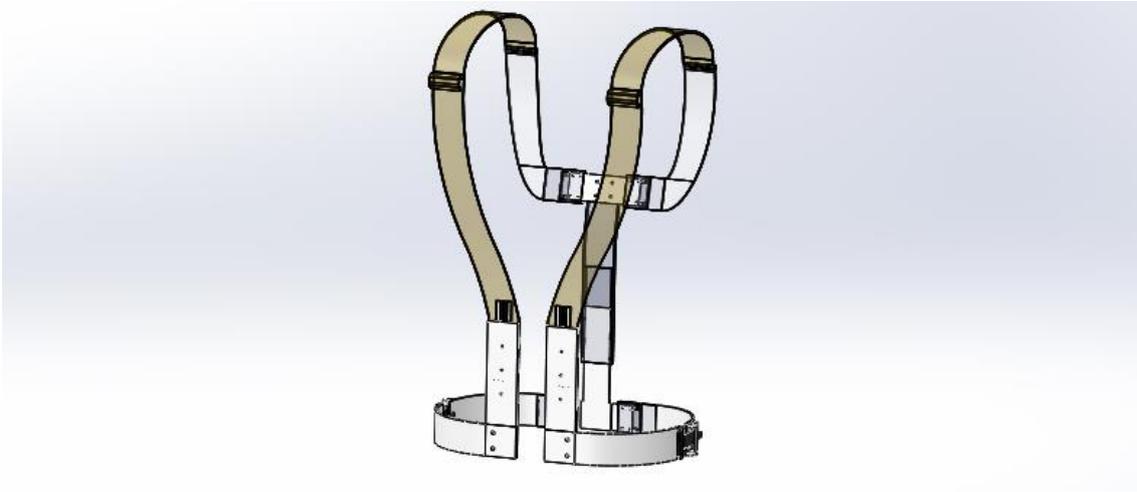


Figura 29: *Explosionado del chaleco, vista contraída*

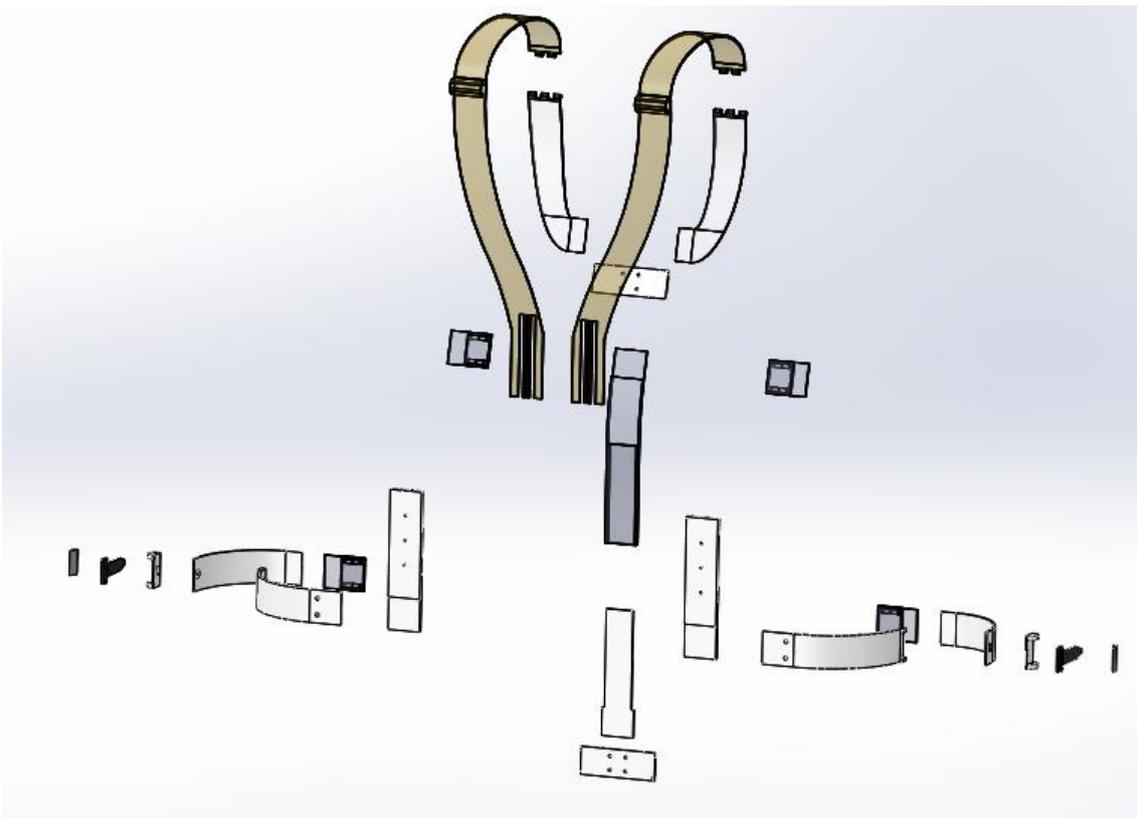


Figura 30: *Explosionado del chaleco, vista expandida*

### 3.2 Ensamblaje trasero del chaleco

La base del ensamblaje está compuesta por una estructura en forma de “I” extensible tanto vertical como horizontalmente. Las piezas que la componen son las siguientes:

- **Pieza A:** El soporte central de la espalda, está dividido en 2 partes para poder ajustar el tamaño según la altura del usuario. Esta pieza se fijará utilizando los orificios que la atraviesan por el nervio central, y fijándolas con tornillos de cabeza plana. La denominación de las piezas, se hará como norma general con “\_1” para las piezas interiores y “\_2” para las exteriores.

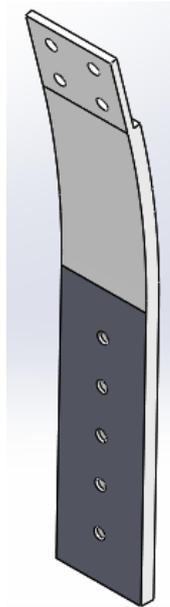


Figura 31: Vista isométrica, PiezaA\_2

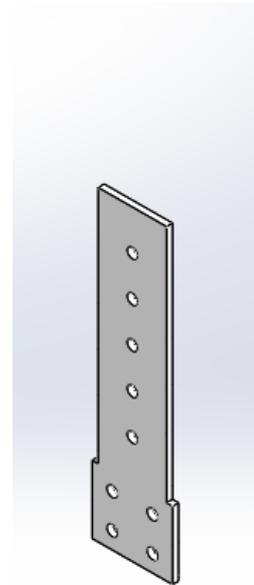


Figura 32: Vista isométrica, PiezaA\_2

**Pieza B:** Las dos piezas horizontales, que dan soporte a las estructuras laterales en la parte superior (para los hombros) y en la parte inferior (para la cintura), son de tamaño estandarizado para poder imprimir 2 veces el mismo diseño. Sobre este componente, se montan en los extremos 2 piezas adicionales que son el nexo de unión con el resto del chaleco y permiten regular la longitud para ajustarse a usuarios más o menos anchos de espalda y cintura. Esta pieza, denominada B\_2, debe imprimirse 4 veces para los 4 extremos de las 2 piezas B\_1.

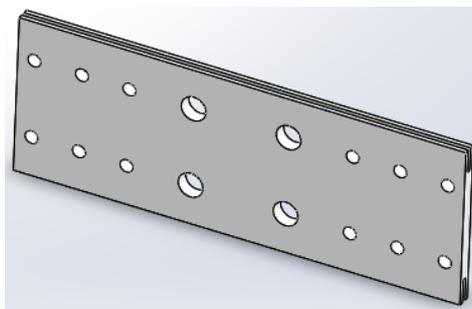


Figura 33: Vista isométrica, Pieza B\_1

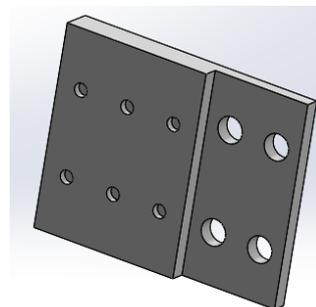


Figura 34: Vista isométrica, Pieza B\_2

- **Pieza C:** Esta pieza, recorre la parte de la espalda donde está situado el omoplato, creando la estructura entre la pieza B\_2 descrita anteriormente y la pieza E. En la parte superior, se ha diseñado la mitad de la bisagra que permitirá la apertura del chaleco. Hay 2 piezas C, una para la parte derecha y otra para la izquierda.

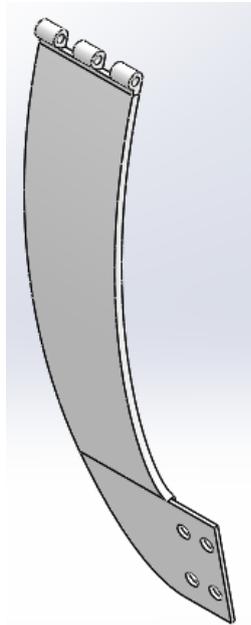


Figura 35: Vista isométrica, PiezaC\_RH

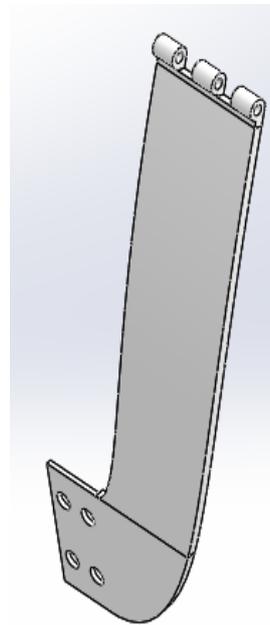


Figura 36: Vista isométrica, PiezaC\_LH

- **Pieza D:** La curvatura que envuelve la cintura por la parte trasera del cuerpo, está formada por las dos “Pieza D”, la derecha y la izquierda. En este caso, se ha conseguido emplear la misma pieza a ambos lados, por lo que bastará con imprimirla 2 veces para poder realizar el ensamblaje. Sobre el extremo de estas piezas se acoplará el cierre milimétrico que fija el chaleco en la posición de cerrado.

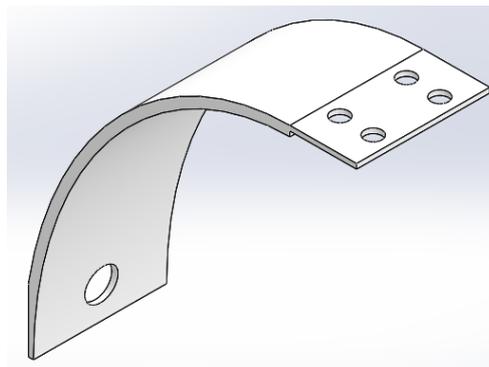


Figura 37: Vista isométrica, PiezaD

### 3.3 Ensamblaje delantero del chaleco

- **Pieza E:** Esta es una de las partes más importantes del chaleco, ya que sobre ella irá acoplado el brazo robótico. Tras muchas propuestas de diseño, se optó por la que se muestra a continuación, pero tras realizar los primeros prototipos podría decidirse volver a cambiar la geometría de alguna parte de esta pieza. Por simetría, se creó la parte izquierda (LH) a partir del diseño de la parte derecha (RH)

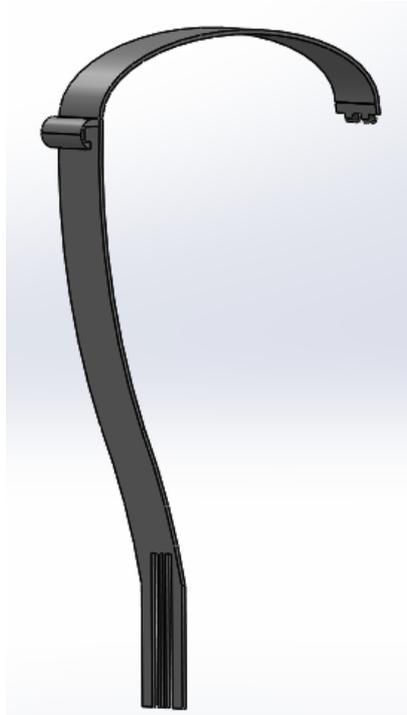


Figura 38: Vista isométrica, PiezaE\_RH



Figura 39: Vista isométrica, PiezaE\_LH

- **Pieza F:** A raíz de la necesidad de que el conjunto fuese extensible, fue necesario diseñar esta pieza que se desliza sobre la parte inferior de la pieza E, expuesta anteriormente. Esta pieza tiene la misma geometría para ambos lados, por lo que simplemente será necesario imprimirla 2 veces para poder realizar el ensamblaje.

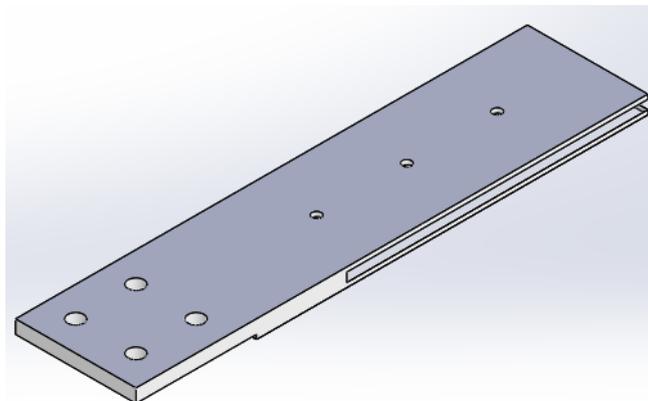


Figura 40: Vista isométrica, PiezaF

- **Pieza G:** Al igual que en la pieza F, la pieza G es similar para ambos lados del chaleco, por lo que bastará con imprimirla 2 veces. Esta pieza forma la parte delantera del “cinturón” que se cierra sobre la cadera del usuario.

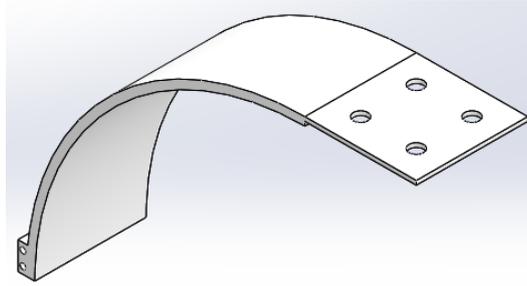


Figura 41: Vista isométrica, PiezaG

### 3.4 Cierre milimétrico

Como se explica anteriormente, ante la necesidad de un sistema sencillo que se pueda cerrar automáticamente y liberar sin usar las extremidades superiores, se diseñó el cierre milimétrico. Este cierre está compuesto por 3 piezas que se muestran a continuación:

- **Cinta milimétrica:** Las cintas, van fijadas a la pieza G en ambos lados del chaleco. Al cerrar el ensamblaje, la propia cinta desplaza el trinquete hacia afuera ajustándose hasta donde necesite el usuario y quedando bloqueado. Esta pieza también debe imprimirse 2 veces. Inicialmente, se planteó realizar la pieza de goma, pero debido a que en los esfuerzos de tracción que sufrirá podría doblarse algún diente abriendo el conjunto, finalmente se decidió imprimirla en plástico ABS como el resto de las piezas.

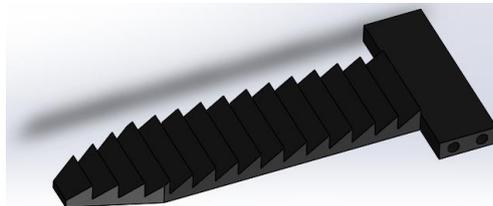


Figura 42: Vista isométrica, Cierre\_milimétrico

- **Soporte Cierre:** Esta pieza con forma de semicilindro partido, sostiene el trinquete para fijar la cinta. Su unión con la pieza D, permite una rotación para hacer coincidir la arista recta del trinquete con los dientes de la cinta. El trinquete irá introducido desde arriba y sujetado con una goma elástica a la T que se puede observar en los extremos. Obviamente, esta pieza también deberá imprimirse 2 veces.

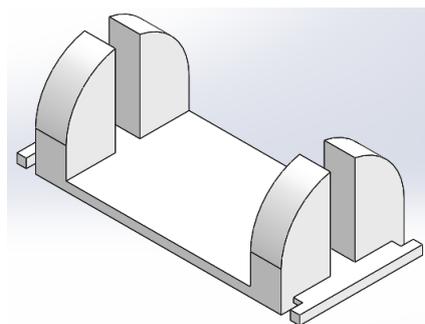


Figura 43: Vista isométrica, Soporte\_cierre

- **Trinquete:** Para bloquear la cinta en el interior del cierre, este trinquete encajará con los dientes de 3 mm de altura por acción de una goma elástica. Sus caras inclinadas de la parte inferior permitirán que la cinta lo desplace hacia arriba para que el chaleco quede fijado, de igual forma que el mecanismo liberador podrá abrirlo para que el mecanismo automatizado levante la parte superior del chaleco. Se necesitarán 1 trinquete para cada cierre, por lo que se imprimirá 2 veces.

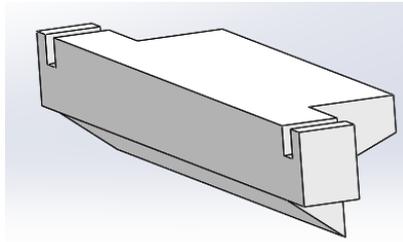
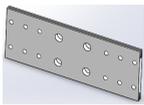


Figura 44: Vista isométrica, Trinquete

### 3.5 Resumen de partes

Para facilitar la tarea de impresión de las piezas y conocer todos los elementos que componen el modelo, se ha elaborado la siguiente tabla resumen. Así, se puede calcular el peso total del conjunto de componentes.

#### Piezas necesarias para el montaje del chaleco:

Función	Pieza	Cantidad	Material	Peso (g)	Imagen
Soporte superior espalda	A_1	1	Plástico ABS	39,3	
Soporte inferior espalda	A_2	1	Plástico ABS	16,4	
Soporte horizontal espalda y cintura (interior)	B_1	2	Plástico ABS	8,4	
Soporte horizontal espalda y cintura (exterior derecha)	B_2	2	Plástico ABS	6,9	

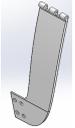
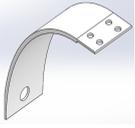
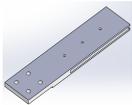
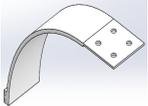
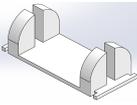
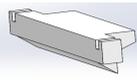
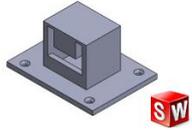
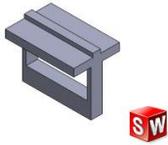
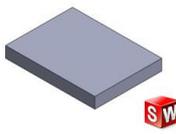
Unión pieza B_2 con pieza E sobre el omoplato derecho	C_RH	1	Plástico ABS	21,51	
Unión pieza B_2 con pieza E sobre el omoplato izquierdo	C_LH	1	Plástico ABS	21,51	
Soporte cintura trasero	D	2	Plástico ABS	17,51	
Tirante rígido derecho	E_RH	1	Plástico ABS	14,75	
Tirante rígido izquierdo	E_LH	1	Plástico ABS	14,75	
Unión pieza E con soporte delantero	F	2	Plástico ABS	31,13	
Soporte por la parte delantera de la cintura	G	2	Plástico ABS	21,85	
Unión del cierre milimétrico para unir los soportes de la cintura	Cinta_milimetrica	2	Plástico ABS	2,61	
Soporte para el trinquete del cierre	Soporte_cierre	2	Plástico ABS	2,95	
Trinquete de bloqueo del cierre	Trinquete	2	Plástico ABS	1,05	
<b>TOTAL</b>		<b>22</b>	<b>Plástico ABS</b>	<b>220,62</b>	

Tabla 2: Resumen de piezas, ensamblaje chaleco

## Piezas necesarias para el mecanismo de apertura inferior

Función	Pieza	Cantidad	Material	Imagen
Soporte del mecanismo de apertura	BaseSuelo	2	Aluminio	
Pedal para abrir el cierre del chaleco utilizando el pie	Pedal	2	Aluminio	
Placa para mantener el pedal en la posición superior de bloqueo (en abierto o cerrado)	PlacaSuelo	2	Aluminio	
Muelle para mantener la placa en la posición de bloqueo. Recomendable utilizar 4 por placa, aunque no ha sido probado en prototipo real	Muelle	8	Aluminio	
Barra exterior para anclar el accionador de apertura del cierre del chaleco	BarraSueloExterior	2	Aluminio	
Barra interior para anclar el accionador de apertura del cierre del chaleco por el lado izquierdo	BarraSueloInteriorIzq	1	Aluminio	
Barra interior para anclar el accionador de apertura del cierre del chaleco por el lado derecho	BarraSueloInteriorDcha	1	Aluminio	

Soporte para la sujeción del chaleco a la pared por la parte inferior	SoportePared	1	Aluminio	
Clips para fijación del chaleco al soporte de la pared descrito anteriormente	ClipsAluminio	2	Aluminio	

Tabla 3: Resumen de piezas, ensamble apertura y soporte

## 4- CALCULOS Y SIMULACIONES SOBRE EL MODELO

### 4.1 Material empleado: Filamento ABS

El plástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), es uno de los más populares para la impresión en 3D. Este plástico opaco es una resina técnica resistente a los golpes con un punto de fusión de 210 °C a 270 °C. Los productos hechos de este plástico se pueden usar a temperaturas de hasta 90 °C, tienen buena durabilidad y, al mismo tiempo, son suficientemente flexibles.

El plástico ABS es fácil de tratar después de la impresión en 3D, las piezas de plástico ABS se pegan y se pintan fácilmente y son solubles en acetona. El plástico ABS en condiciones normales no es peligroso y no es tóxico, sin embargo, los productos finales no se emplean con fines alimenticios (a excepción de productos fríos) ni deben ponerse en contacto con productos que contengan alcohol. Por tanto, el material es apto para la realización del chaleco soporte.

El plástico ABS es un material resistente a los golpes y pertenece a los plásticos de ingeniería. Tiene una mayor resistencia a los golpes en comparación con poliestireno de uso general, poliestireno resistente a los golpes y otros copolímeros de estireno. Los supera en durabilidad mecánica y rigidez. Es resistente al desgaste. Soporta un calentamiento a corto plazo de hasta 90-100 °C. Temperatura máxima de funcionamiento continuo es de 75 - 80 °C. Es resistente a los álcalis, aceites lubricantes, soluciones de sales y ácidos inorgánicos, hidrocarburos, grasas y gasolina. Se disuelve en acetona, éter, benceno, cloruro de etilo, cloruro de etileno, anilina o anisol y no es resistente a la radiación ultravioleta.

Las propiedades físicas y mecánicas de los filamentos ABS, son las siguientes, y deberán tenerse en cuenta a la hora de calcular si el modelo diseñado es apto o no para soportar los esfuerzos y el peso del brazo robótico y los componentes necesarios:

- Densidad: 1.02-1.08 g / cm<sup>3</sup>
- Resistencia a la tracción: 35-50 MPa
- Resistencia a la flexión: 50-87 MPa
- Resistencia a la compresión: 46-80 MPa
- Limite elástico: 48 – 60 MPa
- Elongación relativa: 10-25%
- Contracción (durante la fabricación de productos): 0.4-0.7%
- Higroscopicidad: 0.2-0.4%

- Módulo elástico a tensión a 23 °C: 1700-930 MPa
- Tenacidad en el péndulo de Charpy (con muescas): 10-30 kJ/m<sup>2</sup>
- Dureza Brinell: 90-150 MPa
- Resistencia al calor según Martens: 86-96 °C
- Punto de reblandecimiento: 90-105 °C
- Temperatura máxima de operación continua: 75-80 °C
- Rango de temperatura de proceso: 200-260 °C
- Constante dieléctrica a 106Hz: 2.4-5.0
- Tangente del ángulo de pérdida dieléctrica a 106 Hz: (3-7) 10<sup>-4</sup>
- Resistividad volumétrica: 5·10<sup>13</sup> Ohm/m
- Durabilidad eléctrica: 12-15 MV/ m
- Temperatura de autoignición: 395 °C

## 4.2 Análisis estático: Creación en SolidWorks

Para poder realizar un estudio más detallado, se ha calculado por separado la parte frontal y la parte trasera.

Para realizar la simulación en SolidWorks, se deben realizar los siguientes pasos:

- 1- **Aplicar material:** En nuestro modelo, se ha asignado el material “Plástico ABS” a todas las piezas, ya que se todas ellas se fabricarán con impresión 3D empleando filamentos ABS.
- 2- **Asesor de sujeciones:** Se deben definir las restricciones y sujeciones que el modelo tendrá en la realidad. SolidWorks nos permite añadir geometrías fijas en las aristas o caras deseadas, restricciones deslizantes (en las que se restringe el movimiento únicamente en una dirección perpendicular a la superficie seleccionada), bisagras o soportes elásticos.

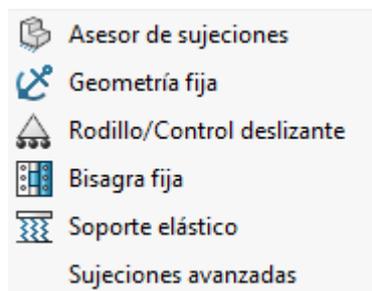


Figura 45: Asesor de sujeciones SolidWorks

- 3- **Asesor de cargas externas:** En este apartado, se deben definir las cargas o sollicitaciones que afectarán a nuestro modelo durante su uso en la vida real. El programa nos permite seleccionar diversos tipos de carga, aunque para simulaciones sencillas bastará con aplicar la carga “Fuerza” en los puntos o superficies deseados.

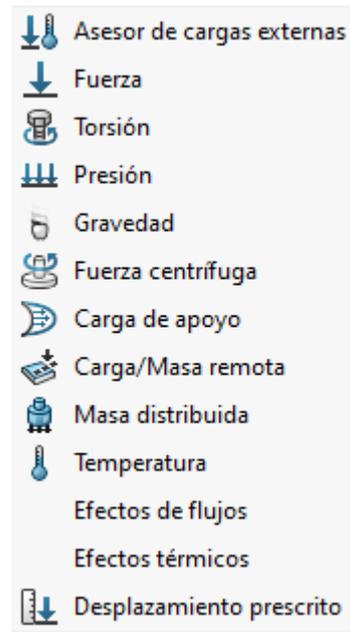


Figura 46: Asesor de cargas SolidWorks

- 4- **Asesor de conexiones:** En caso de que el modelo a simular tenga conexiones específicas como resortes, pernos o rodamientos, se podrá emplear esta herramienta con las opciones que a continuación se muestran en la Figura 46.

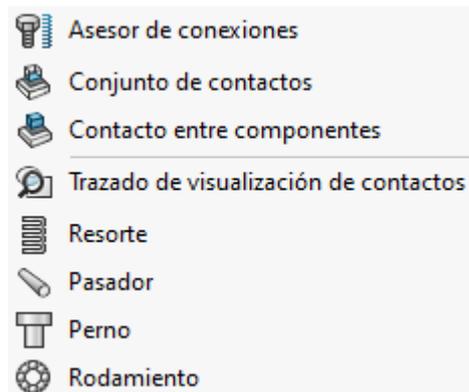


Figura 47: Asesor de conexiones SolidWorks

- 5- **Crear la malla y ejecutar resultados:** SolidWorks te permite mallar todos los sólidos automáticamente, ajustando el tamaño de la malla al seleccionado. También se puede crear la malla de forma manual, eligiendo la forma y tamaño de la malla para cada elemento del ensamblaje. Una vez creada la malla sin conflictos, se ejecutará el análisis para posteriormente analizar los resultados.

Para realizar la comprobación de los esfuerzos generados en el ensamblaje, SolidWorks calcula las tensiones según el criterio de von Mises, los desplazamientos producidos por las cargas y las deformaciones unitarias.

El criterio de máxima tensión de von Mises se basa en la teoría de von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima.

En cuanto a las tensiones principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , la tensión de von Mises se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2}$$

La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. Sin embargo, el software del programa permite utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión.

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{limit}}$$

Para determinar que el modelo diseñado soportará las cargas a las que será sometido con la utilización del brazo robótico, se ha considerado un coeficiente de seguridad de 1,15. Siendo el criterio de comprobación:

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \frac{\sigma_{\text{limit}}}{1.15}$$

El límite elástico es una propiedad dependiente de la temperatura, pero en esta simulación se comparan los valores obtenidos a temperatura ambiente. Una vez obtenida la tensión máxima de von Mises en el punto más crítico, se calcula el factor de seguridad, que es un índice obtenido de un determinado diseño para expresar su resistencia mecánica. El factor de seguridad en una ubicación se calcula a partir de:

$$\text{Factor de seguridad (FDS)} = \sigma_{\text{limit}} / \sigma_{\text{vonMises}}$$

### 4.3 Análisis estático: Sub-ensamblaje delantero

Siguiendo los pasos anteriormente descritos, se calcularon los esfuerzos para determinar si el diseño y el material escogidos, serán capaces de soportar el peso y los movimientos del brazo robótico.

- Sujeciones del modelo:

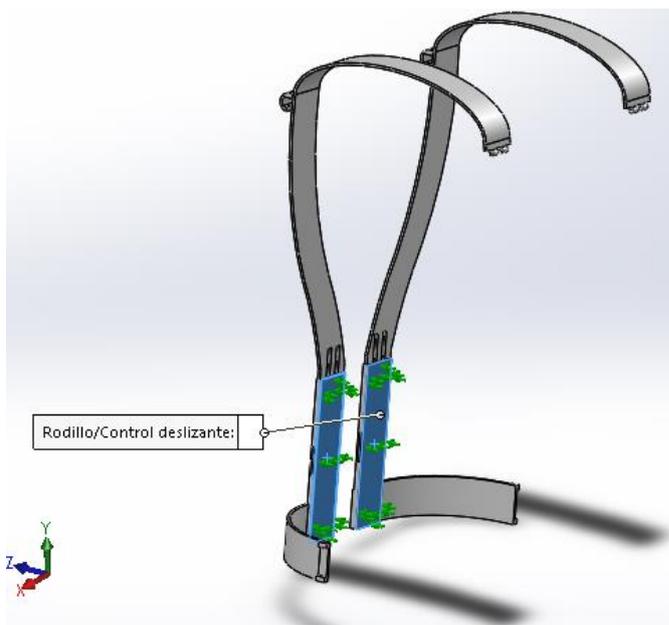


Figura 48: Sub-ensamblaje delantero, apoyo abdominal

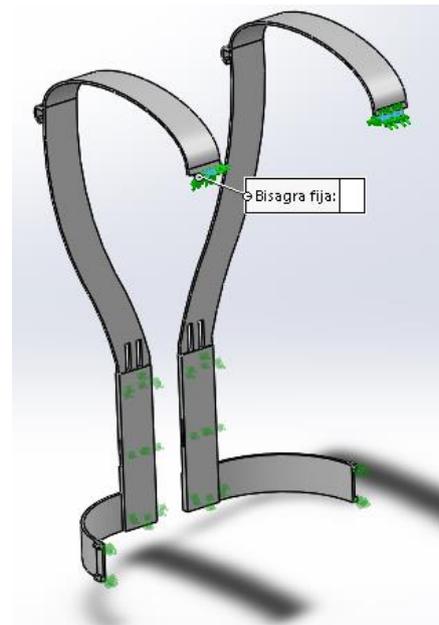


Figura 49: Sub-ensamblaje delantero, bisagras

Como se puede observar en las figuras 47 y 48, se asignó una restricción de bisagra fija en la parte superior, donde el subensamblaje delantero y trasero están unidos por una bisagra.

En la parte inferior, se asignó una restricción de rodillo deslizante para la superficie que apoya sobre la parte inferior del tronco del sujeto que lo lleve puesto, ya que el cuerpo limita el movimiento de estas piezas en el sentido negativo del eje Z (según se aprecia respecto al sistema expresado en la figura 48).

➤ Cargas externas aplicadas:

El peso de todo el brazo robótico en conjunto es de aproximadamente 2Kg. Dado que la carga máxima a levantar es de 1Kg. Por ello, para el análisis estático de tensiones, se tomó en consideración un peso de 3Kg. Obteniendo la fuerza ejercida por este peso:

$$Fuerza = masa (Kg) * aceleración \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Al ser una masa en el espacio, la aceleración vendrá determinada por la propia gravedad 9,8 m/s<sup>2</sup>. Por ello:

$$F = 3 * 9,8 = 29,4 \approx 30N$$



Figura 50: Brazo robótico

Aplicamos un valor de fuerza de 30 N sobre la parte superior del chaleco, donde irá anclado el brazo robótico. Para compensar el peso del brazo en un lado, e intentar equilibrar las masas haciendo que el conjunto sea más cómodo de llevar, la idea es anclar las baterías y controladores en el lado contrario. Por ello, se ha aplicado la carga de 30 N sobre ambos lados, calculando el caso más crítico y equilibrado:

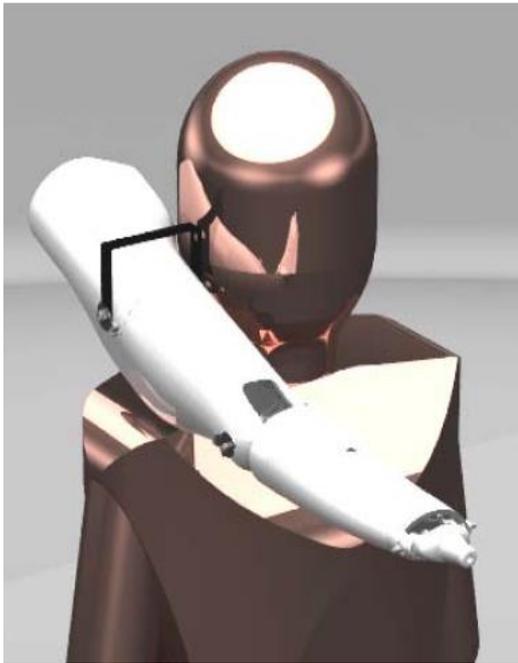


Figura 51: Posición brazo robótico

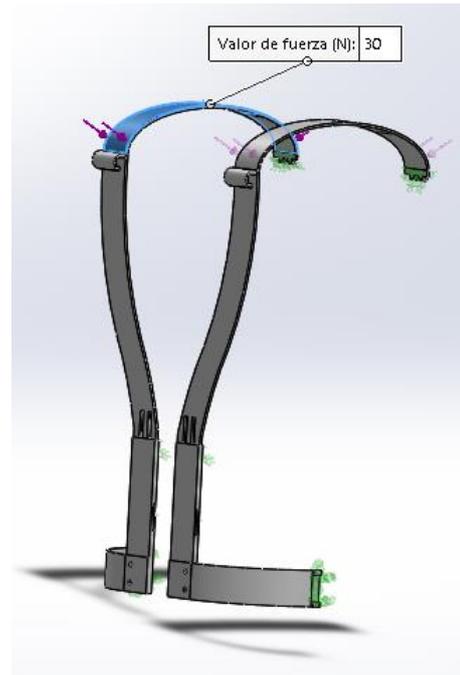


Figura 52: Sub-ensamblaje delantero, fuerza aplicada

➤ **Mallado:**

Para el cálculo de las solicitaciones sobre el modelo, se ha aplicado un mallado triangular de densidad media. Los triángulos trazados tienen una longitud de base de 15mm, ya que es el mínimo espesor que podemos encontrar en la pieza. Para realizar el estudio, se ha seleccionado el modelo como si tuviese “Contacto global” entre todas las piezas que sean coincidentes en algún área. El tipo de contacto escogido ha sido el de “Unión rígida”. El resultado de la malla es el siguiente:

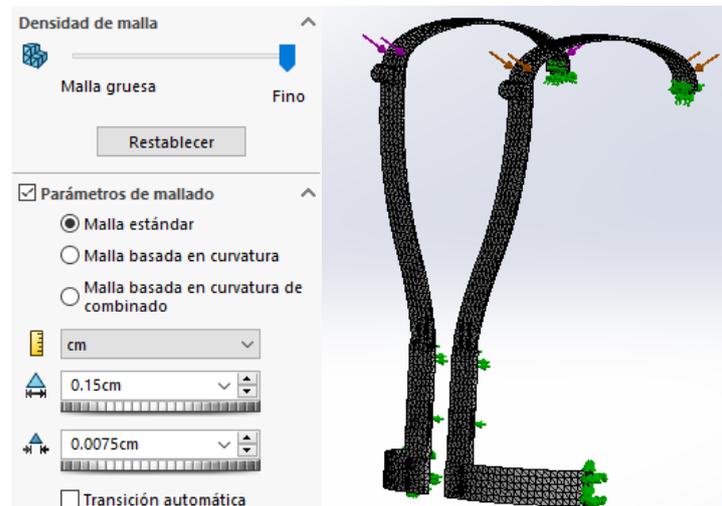


Figura 53: Mallado sub-ensamblaje delantero

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 2 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elemento	0,15 cm
Tolerancia	0,0075 cm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	1335586
Número total de elementos	870415
Cociente máximo de aspecto	18,827
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99,8
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0,000919
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:02:50

Tabla 4: Detalle de malla, sub-ensamblaje delantero

➤ Resultados de tensión obtenidos:

Una vez ejecutado el estudio, pasamos a analizar e interpretar los resultados para elaborar las conclusiones.

En primer lugar, analizaremos la tensión de von Mises obtenida, buscando el punto más crítico y por tanto con mayor tensión calculada.

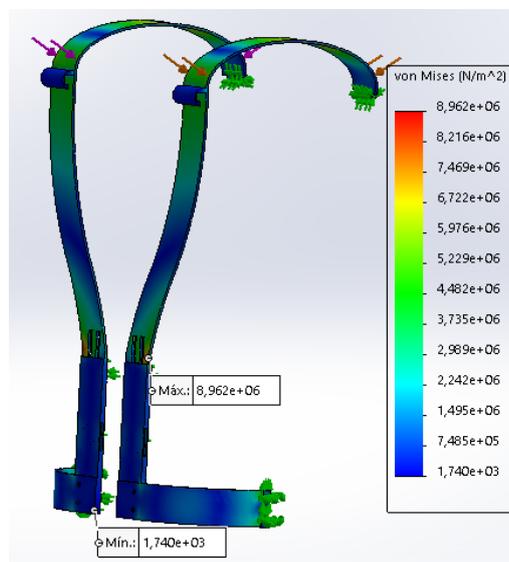


Figura 54: Primer cálculo de tensión, sub-ensamblaje delantero

En este resultado, la tensión está expresada en N/m<sup>2</sup>. Para pasarlo a MPa, bastará con utilizar la equivalencia:

$$1 \text{ MPa} = 1.000.000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Como se puede observar en la Figura 53 anterior, las tensiones calculadas van desde un mínimo de 0,00000174 MPa, hasta un máximo de 8,96 MPa.

Sin embargo, debido a las deformaciones calculadas, detallado en el próximo punto, se decidió aumentar el espesor de los tirantes de 30 mm a 60 mm. Por tanto, ejecutando nuevamente el estudio se observó una tensión de von Mises máxima todavía menor (2,78 MPa):

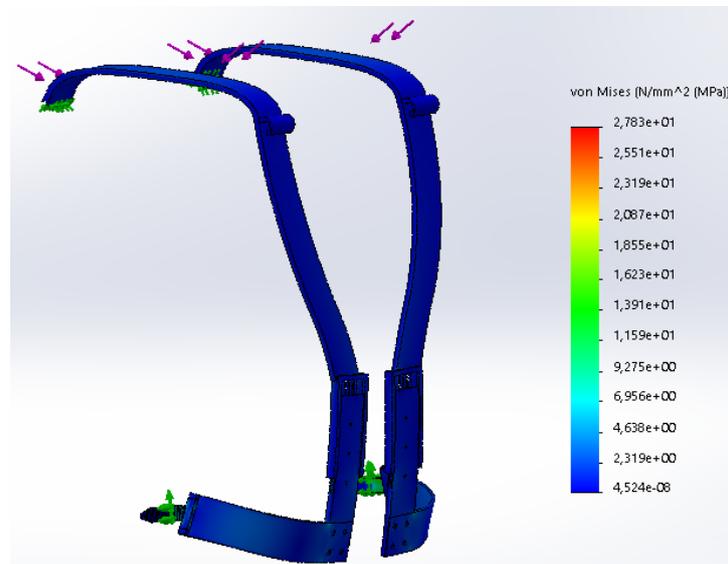


Figura 55: Segundo cálculo de tensión, sub-ensamblaje delantero

El punto más crítico, se encuentra en la unión entre la parte inferior que se sujeta a la cintura y la parte superior. Este punto variará en función de la configuración de longitud que se le dé al chaleco, ya que la altura es regulable.

Observando las características del material aplicado (Plástico ABS), podemos comparar estas tensiones calculadas con sus límites elásticos.

La resistencia a flexión y a compresión varía entre los 46 y los 80 MPa, y el límite elástico del plástico ABS varía entre los 48 y 60 MPa. Para realizar la comprobación del lado más seguro, tomaremos los 48 MPa como límite elástico.

Aplicando un 1,15 de coeficiente de seguridad, obtenemos un límite elástico de:

$$\sigma = \frac{48}{1.15} \text{ MPa} = 42 \text{ MPa}$$

Como podemos observar, el valor máximo de tensión obtenido en el punto más crítico es mucho menor que el límite del material.

$$2,78 \text{ MPa} < 42 \text{ MPa}$$

Por ello, podemos concluir que, siguiendo el modelo estático de cargas, el chaleco será apto para soportar el anclaje del brazo robot sin ningún problema.

Con el resultado obtenido, podemos calcular el factor de seguridad del punto más crítico, que será el resultado de dividir el límite elástico entre la tensión máxima de von Mises obtenida:

$$F = \frac{42}{2,78} = 15$$

➤ Resultados de deformación obtenidos:

Inicialmente, el espesor de los tirantes sobre los que va fijado el brazo era de 30 mm. Aunque los cálculos de tensión estaban por debajo del límite elástico, la deformación obtenida en el caso más crítico era un poco alta, con un valor de 49 mm. Este caso de carga es un supuesto en el que los tirantes no están apoyados sobre la barra de apertura ni hay una persona en su interior que haga de soporte con los hombros, sin embargo, se rediseñó la parte conflictiva aumentando el espesor a 60 mm:

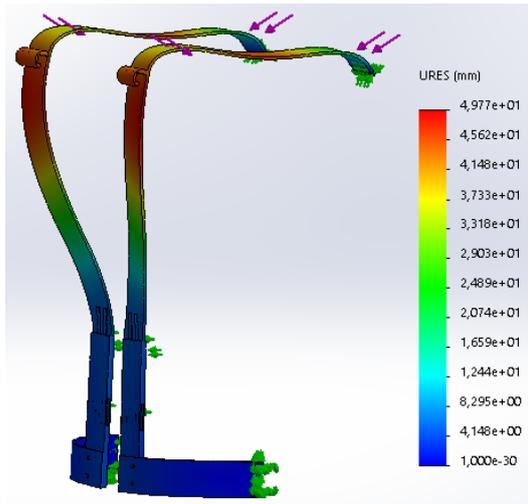


Figura 56: Deformaciones primer estudio

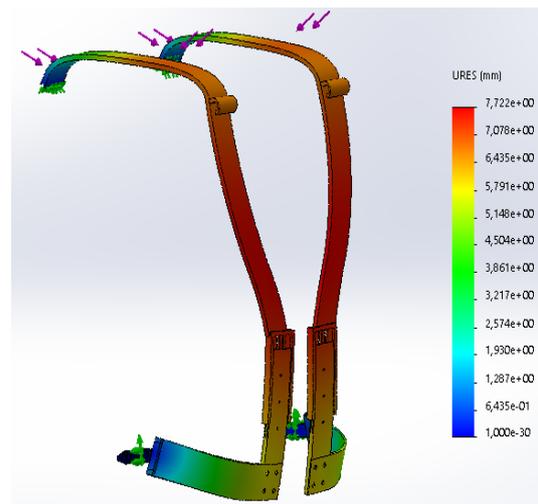


Figura 57: Deformaciones segundo estudio

Con el espesor aumentado a 60 mm, la deformación máxima obtenida se reduce de 49 mm a 7,72 mm.

Se ha de tener en cuenta que esta simulación se ha realizado con un caso extremo en el que el chaleco se dejase sin ningún tipo de soporte con el peso máximo sobre él, ya que, en la realidad, los hombros de la persona que lo lleva o la barra soporte que lo abre actuarán de fijación extra reduciendo tanto la tensión como la deformación. Si se incluye este apoyo del conjunto sobre la barra de apertura por la parte de delante, la deformación máxima se reduce hasta menos de 2 mm:

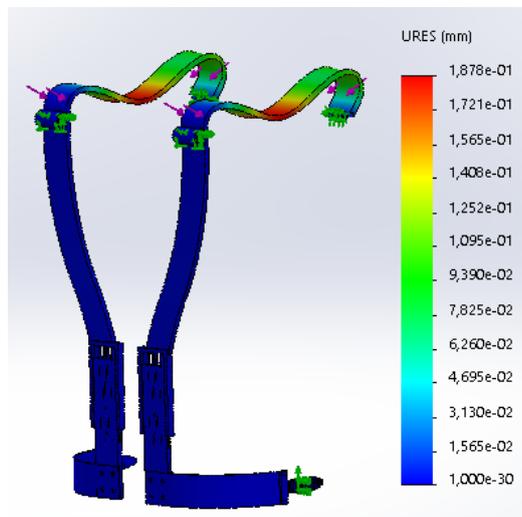


Figura 58: Deformaciones tercer estudio

## 4.4 Análisis estático: Sub-ensamblaje trasero

De igual forma, se realizó un modelo de la parte trasera del ensamblaje, para concluir si sería capaz de soportar los esfuerzos a los que se verá sometido cuando lo utilice el usuario.

- Sujeciones del modelo:

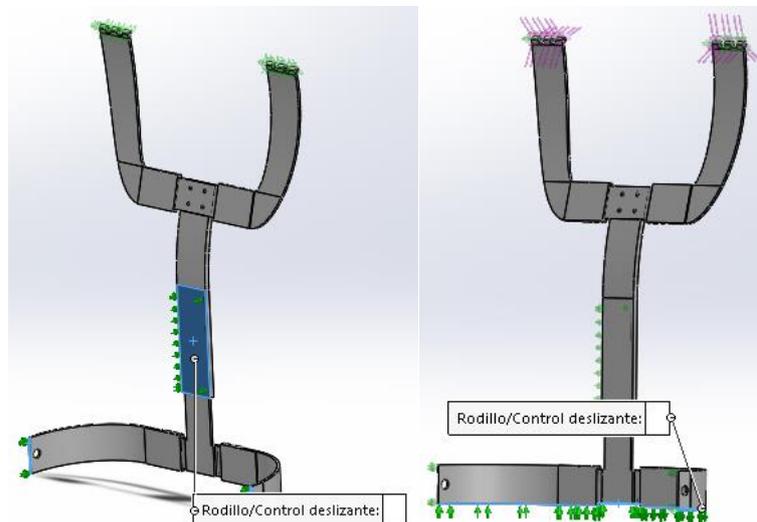


Figura 59: Sujeciones sub-ensamblaje trasero

Al igual que en el modelo delantero, se definieron restricciones de bisagra en la unión entre ambas partes. Para simular el apoyo de la espalda sobre el chaleco, se asignó una restricción de rodillo deslizante.

Por último, simulando el apoyo de la parte inferior del soporte sobre el cuerpo, se colocó otra restricción de rodillo deslizante.

- Cargas externas aplicadas:

Considerando el análisis realizado en la parte delantera, se aplicó una fuerza de 30N sobre ambas bisagras del modelo.

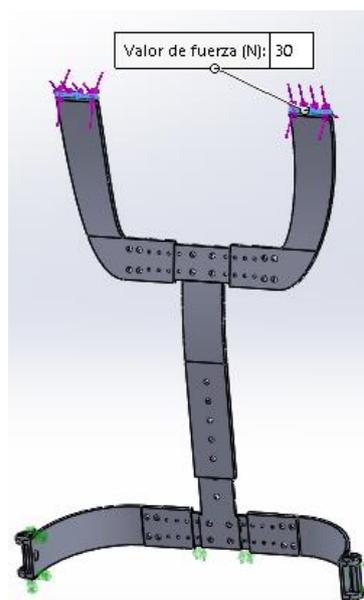


Figura 60: Sujeciones sub-ensamblaje trasero

➤ Mallado:

Al igual que en la parte delantera, se utilizaron elementos triangulares para mallar el objeto. Las características en detalle de la malla son las siguientes:



Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 2 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elemento	0,15 cm
Tolerancia	0,0075 cm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Figura 61: Mallado sub-ensamblaje trasero

Figura 62: Detalles malla sub-ensamblaje trasero

➤ Resultados de tensión obtenidos:

Para este análisis, se obtuvo la siguiente tensión de von Mises, también muy inferior al límite elástico:

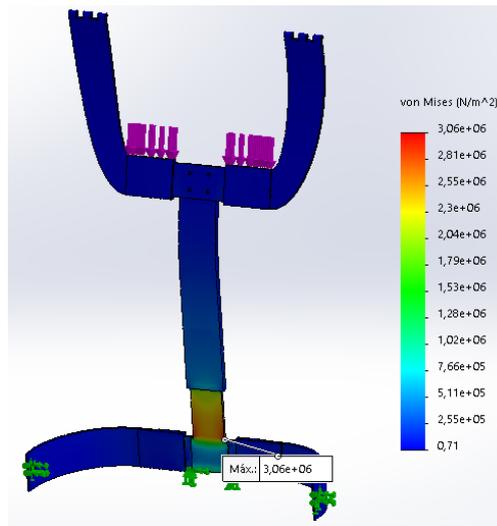


Figura 63: Tensión de von Mises, sub-ensamblaje trasero

Como se puede observar en la Figura 62, las tensiones calculadas van desde un mínimo de  $0,71 \cdot 10^{-6}$  MPa, hasta un máximo 3,06 MPa.

Comprobando la tensión máxima obtenida en el punto más crítico, podemos concluir que el modelo cumple el criterio de límite elástico del plástico ABS, con un coeficiente de seguridad aplicado de 1,15:

$$3,06 \text{ MPa} < 42 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad obtenido en este estudio fue de:

$$F = \frac{42}{3,06} = 13,7$$

➤ Resultados de deformación obtenidos:

Debido a que en esta parte del ensamblaje, la fuerza actúa de forma vertical sobre toda la estructura, la deformación obtenida es mucho menor. Además, hay que tener en cuenta que en la realidad, el modelo está fijado a la parte delantera, que le proporcionará más rigidez y por tanto se deformará menos.

El valor máximo de deformación obtenido ha sido de 2,26 mm.

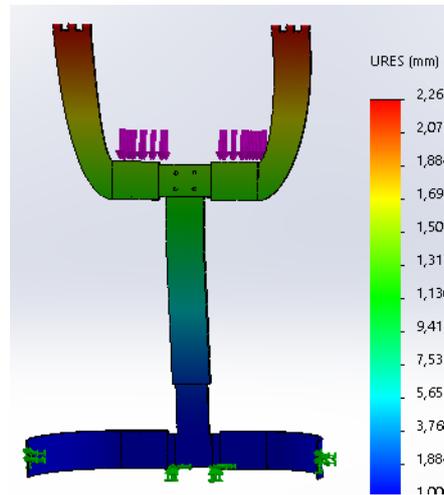


Figura 64: Deformaciones sub-ensamblaje trasero

## 5 - ELECCIÓN DE LA BATERÍA

Las baterías eléctricas son artefactos compuestos por celdas electroquímicas, capaces de convertir la energía química de su interior en energía eléctrica. Las baterías contienen un polo positivo (cátodo) y otro negativo (ánodo), así como electrolitos que permiten el flujo eléctrico hacia el exterior. Dependiendo del tipo de proceso que genere la energía eléctrica en una batería podemos distinguir dos tipos:

- **Primarias:** Aquellas que, una vez producida la reacción, no pueden volver a su estado original, agotando así su capacidad de almacenar corriente eléctrica. En este proyecto, no interesa el uso de este tipo de baterías, ya que se deberían de cambiar completamente cada vez que el paciente utilizase el brazo robótico.
- **Secundarias:** Aquellas que pueden recibir una inyección de energía eléctrica para restaurar su composición química original, pudiendo así ser empleadas numerosas veces antes de agotarse del todo (baterías recargables). A continuación, se estudiarán los distintos tipos de baterías secundarias disponibles en la actualidad, para determinar cuáles de ellas serían las más viables en este proyecto.

Dependiendo de los elementos empleados en su fabricación, existen muchos tipos de baterías:

- **Baterías alcalinas:** Comúnmente desechables, emplean hidróxido de potasio como electrolito, junto con zinc y dióxido de magnesio para suscitar la reacción química que produce energía. Son sumamente estables, pero de corta vida. Por ello, no son de interés en el campo de la robótica.



- **Baterías de ácido-plomo:** Comunes en vehículos y motocicletas, son pilas recargables que poseen dos electrodos de plomo. Durante la carga, el sulfato de plomo en su interior se reduce y deviene plomo metal en el ánodo, mientras en el cátodo se forma óxido de plomo. El proceso se invierte durante la descarga. Estas baterías son muy pesadas, por lo que incrementarían el peso del conjunto aumentando la fatiga del paciente que utilizase el sistema.
- **Baterías de níquel:** De muy bajo coste, pero pésimo rendimiento (por lo que también se descartan para este proyecto. Fueron algunas de las primeras en manufacturarse en la historia. A su vez, dieron origen a nuevas baterías como: Níquel-hierro; Níquel-cadmio; Níquel-hidruro
- **Baterías de iones de litio (Li-ION):** Las baterías más empleadas en la electrónica de pequeño tamaño, como celulares y otros artefactos portátiles. Destacan por su enorme densidad energética, sumados a su liviandad, pequeño tamaño y buen rendimiento, pero poseen una vida máxima de tres años. Además, al sobrecalentarse pueden explotar, ya que sus elementos son inflamables. Este tipo de baterías podrían ser una buena opción para nuestro proyecto, pero como se ha explicado suelen encontrarse en aplicaciones con dispositivos de menor tamaño y consumo eléctrico.
- **Baterías de polímero de litio (LiPo):** Variación de las ordinarias baterías de litio, presentan mejor densidad de energía y mejor tasa de descarga. Son las baterías más utilizadas en aplicaciones que demandan consumos de corriente considerables, ocupando poco espacio y pesos reducidos, como vehículos radio control, drones o aplicaciones de robótica, por lo que será el tipo de batería seleccionado para alimentar nuestro brazo robótico

La mayoría de las baterías LiPo están compuestas por multitud de celdas, con un voltaje nominal por celda de 3.7 V. Dependiendo del número de celdas que compongan la batería, obtendremos un voltaje nominal total distinto, por ejemplo, con una batería de 6 celdas (6S), obtendremos un voltaje nominal de 22.2 V.

Al igual que las baterías de Litio, el uso de estas baterías tanto en carga como en descarga es un poco delicado, ya que, si se calienta en exceso, se sobrecarga o se dañan pueden inflamarse.

Las baterías LiPo están diseñadas para operar entre 3V y 4.2 V. Descargar una batería por debajo de 3 V le causaría una pérdida de rendimiento y posiblemente un daño irreparable. Cargarla a más de 4.2 V puede ser peligroso en incluso ocasionar fuego. Es aconsejable no descargar las LiPo por debajo de 3.5V por motivos de salud de la batería. Por ejemplo, con una batería 3S, cuyo voltaje máximo es 12.6 V, deberías aterrizar antes de que el voltaje llegue a 10.5 V (es decir, 3,5 V por celda).

Otra de las características a tener en cuenta a la hora de elegir una batería LiPo, es la capacidad, medida en miliamperios hora (mAh). Esta capacidad va ligada directamente con el tamaño de la batería, por lo que deberemos escoger una batería lo suficientemente grande para garantizar una durabilidad operativa de nuestro brazo razonable, sin que sea demasiado grande y por tanto pesada.

El C Rating de una batería, nos permite calcular la descarga máxima que se podrá realizar de forma segura. Si este parámetro es demasiado bajo, la batería no será capaz de entregar la corriente que necesiten los motores del brazo, mientras que si es demasiado alto, incrementaremos el peso de la misma de manera innecesaria. La fórmula para el cálculo de la descarga máxima es la siguiente:

$$\text{Máxima descarga (A)} = \text{C Rating} \times \text{Capacidad (Ah)}$$

- **LiHV** es un tipo diferente de batería LiPo. HV significa “high voltage” o alto voltaje. Estas baterías son más densas energéticamente que las LiPo tradicionales y pueden ser cargadas hasta los 4,35 V por celda. Su longevidad por otro lado es controvertida y pierden rendimiento antes que las LiPo normales, por lo que se descarta su uso en este proyecto.
- **Conclusión:** Debido a su pequeño tamaño y gran capacidad de almacenaje, además de su gran capacidad para descargar mucha energía en un instante, se eligieron las baterías LiPo para este proyecto.

## 5.1 Tabla comparativa de baterías

A continuación, se muestran las distintas opciones que se han barajado para alimentar el brazo robótico. Las capacidades de todas ellas varían entre los 3.300 mAh y los 5.000 mAh:

	Marca	Precio	Voltaje	Capacidad	C Rate	Conector	Dimensiones	Peso neto	Vendedor	Comentarios
<b>Opcion 1</b>	Youme Power	85,99 € (2UDS) 43 € (1UDS)	22.2 V	3300 mAh	50 c	Deans T	137*45*45 mm	1.026 g (2 UDS) 513 g (1UDS)	Amazon	
<b>Opcion 2</b>	HRB	94,76 € (2UDS) 47,38 € (1UDS)	22.2 V	3300 mAh	60 c	Deans T pulg	135*42*45 mm	934 g (2 UDS) 467 g (1UDS)	Amazon	
<b>Opcion 3</b>	HRB	101,99 € (2UDS) 51 € (1UDS)	22.2 V	4000 mAh	60 c	Deans T	155*25*48 mm	1.180 g (2 UDS) 590 g (1UDS)	Amazon	
<b>Opcion 4</b>	HRB	118 € (2UDS) 58,99 € (1UDS)	18,5 V	5000 mAh	50 c	Enchufe XT90	155*48*40 mm	1.242 g (2 UDS) 621 g (1UDS)	Amazon	

Tabla 5: Comparativa de baterías

- **Conclusión:** Debido a su mayor capacidad, precio similar y cumplimiento de características necesarias para el correcto aporte de corriente (detallado en próximos apartados), se ha seleccionado la Opción 4.

## 6 - SISTEMAS DE CARGA PARA BATERÍAS LIPO

A continuación, se explican los **tipos de carga** que se pueden emplear para baterías LiPo:

### 1- Carga balanceada

El cargador monitoriza el voltaje de cada celda y las puede cargar individualmente intentando mantener el mismo voltaje en todas las celdas. Este es el método recomendado y más seguro para cargar una batería LiPo, ya que, si no se monitoriza el voltaje de cada celda, es muy probable que algunas de ellas acaben por debajo de los 4,2 V (no estén completamente cargadas).

### 2- Carga directa (carga rápida)

La batería se carga a través de la línea principal y el cargador no verifica el voltaje de cada celda. Esto es normalmente más rápido, pero puede producir que las cargas de las distintas celdas no estén equilibradas y que la batería no se cargue al 100 %.

### 3- Carga de almacenaje

El cargador carga todas las celdas a la carga de almacenaje, que es entre 3.80 y 3.85 V.

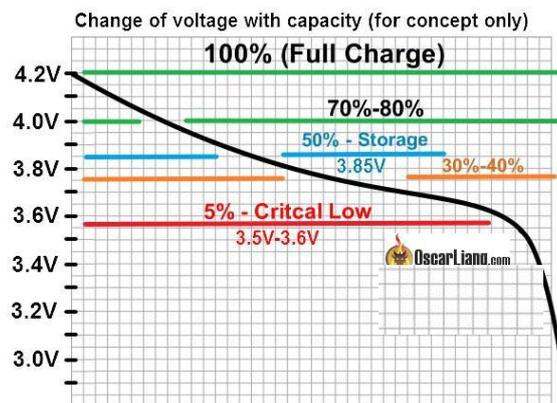


Figura 65: Carga de almacenaje

- **Conclusión:** Para aumentar el rendimiento y durabilidad de las baterías empleadas, en este proyecto se ha optado por la carga balanceada. Además, al necesitar 2 baterías se realizará una carga en paralelo que se explica a continuación.

## 6.1 Tabla comparativa de cargadores

	Marca	Precio	Características	Vendedor	Comentarios																								
Opción 1	Keenstone	48,99 €	Keenstone Cargador Balance10A AC 100W Cargador Equilibrio para LiPo/Li-ion/LiFe/LiHV Bateria(1-6S), NiMH/NiCd(1-15S), XT60 y Fuente de Alimentación		<p>Voltage Range Applicable</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Supported Battery Packs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NiMH</td> <td>NiCd</td> <td>1.2V to 18V</td> <td>1S-15S</td> </tr> <tr> <td>LiPO</td> <td>Li-ion</td> <td>3.7V to 22.2V</td> <td>1S-6S</td> </tr> <tr> <td>LiFePO4</td> <td></td> <td>3.2V to 19.2V</td> <td>1S-6S</td> </tr> <tr> <td>LiHV</td> <td></td> <td>3.85V to 23.1V</td> <td>1S-6S</td> </tr> <tr> <td>PB</td> <td></td> <td>2-24V</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Supported Battery Packs				NiMH	NiCd	1.2V to 18V	1S-15S	LiPO	Li-ion	3.7V to 22.2V	1S-6S	LiFePO4		3.2V to 19.2V	1S-6S	LiHV		3.85V to 23.1V	1S-6S	PB		2-24V	
Supported Battery Packs																													
NiMH	NiCd	1.2V to 18V	1S-15S																										
LiPO	Li-ion	3.7V to 22.2V	1S-6S																										
LiFePO4		3.2V to 19.2V	1S-6S																										
LiHV		3.85V to 23.1V	1S-6S																										
PB		2-24V																											
Opción 2	Haisito	69,99 €	<p>Input Voltage:AC 100-240V, DC 11-18V Charger Power:AC/DC Input 150W Charge Current:0.1-10A Discharge Current:0.1-2A LiFe/Li-ion:1-6 Cells LiPo/LiHV:1-6 Cells NiCd/NiMH:1-15Cells Pb:2-20V Smart Battery:I II III</p>		Manual de instrucciones muy completo																								
Opción 3	ZHITING	79,99 €	<p>Capacidad de carga de 2 baterías diferentes simultáneamente LiPo 1-6 celdas *2 Tensión de batería PB: 2 - 20V *2 Corriente de carga 0.1 - 10 A *2 Potencia de carga DC 120W*2= 240W</p>		Límite de corriente de carga, capacidad y sensibilidad. Detección de temperatura máxima																								

Tabla 6: Comparativa de cargadores

- **Conclusión:** Por solo 20 € de diferencia, se ha optado por la opción 3, capaz de cargar cada batería de forma individual. De esta forma, podremos monitorizar cada batería por separado y se elimina el potencial riesgo de iniciar una carga en paralelo con voltajes distintos en cada una de las baterías (lo cual podría dañarlas e incluso provocar un incendio).

## 7 - CARGA DE BATERÍAS LIPO EN PARALELO

Para poder minimizar el tiempo de carga, se deberá realizar en paralelo. Se recomienda que, para evitar complicaciones durante la carga, ambas baterías coincidan en la misma capacidad y clasificación C. En nuestro caso, las baterías son idénticas y de la misma marca, por lo que en este aspecto no habrá ningún problema.

Además, para cargar baterías LiPo en paralelo se debe hacer conectando sólo baterías con el mismo número de celdas.

Al igual que el agua cuando conectamos 2 vasos con distintos volúmenes de agua, cuando se conectan 2 baterías la carga se nivela entre ellas. Esto podría generar que si pasa demasiada corriente por los cables mientras la carga se nivela, se calentasen los cables, la placa o la propia batería, generando un potencial riesgo de que se quemen. Por ello, se deberá asegurar que las baterías se descargan de forma similar, reduciendo considerablemente el riesgo de incendio durante la carga.

La **corriente de carga** de una batería LiPo se puede calcular siguiendo la fórmula que se expone a continuación:

$$I = 1C \times \text{Capacidad}$$

Se recomienda cargar las baterías a 1C, aunque se puede configurar en función de las especificaciones de los fabricantes de las mismas.

Ha de tenerse en cuenta, que al cargar múltiples baterías conectadas en paralelo se deben sumar las capacidades de todas ellas. Por ello la corriente de carga que deberíamos emplear si se utilizan dos baterías de 4.000 mAh conectadas en paralelo, se deberá configurar el terminal de carga con el siguiente amperaje:

$$\text{Capacidad} = 4.000 + 4.000 = 8.000 \text{ mAh}$$

$$I = 1C \times 8 \text{ Ah} = 8 \text{ A}$$

Hoy en día, los cargadores inteligentes pueden ajustar automáticamente la corriente de carga, dependiendo de la potencia máxima del cargador y el voltaje de la batería.

Sin embargo, si tu cargador no tiene esta característica, es posible que quieras calcular manualmente la corriente de carga segura antes de conectar las baterías.

Esto se puede hacer de manera sencilla siguiendo la fórmula:

$$I = \frac{P}{V}$$

Despejando la fórmula, podemos calcular la potencia que requerirá la carga de 2 baterías de 4.00 mAh en paralelo, a 24 V. Conociendo la  $I = 8 \text{ A}$  calculada anteriormente:

$$P = I \times V = 8 \text{ A} \times 24 \text{ V} = 192 \text{ W}$$

Para poder cargar 2 baterías LiPo en paralelo, se necesita una placa de carga paralela. La conexión es bastante sencilla, simplemente hay que asegurarse de que los conectores de nuestra batería corresponden con los de la placa.

Hay placas como la Figura 65 que se muestra a continuación que no llevan incorporados fusibles de protección, por lo que un aspecto importante es adquirir una placa que sí que los lleve. Así, tendremos un elemento de protección extra que podrá evitar que las baterías se dañen o incluso se incendien si hay un cortocircuito.



Figura 66: Placa de carga paralela sin fusibles

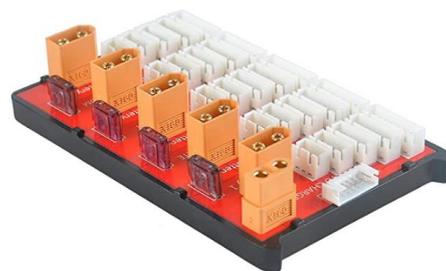


Figura 67: Placa de carga paralela con fusibles

## 7.1 Conexión en paralelo de baterías LiPo

Para conectar las baterías al cargador, se deberán conectar los terminales positivos y negativos en paralelo (uniendo positivo con positivo y negativo con negativo) y enchufarlos a la salida de corriente de nuestro cargador.

Los cables de balanceo se deberán conectar en las entradas de la placa, para monitorizar cada una de las celdas de la batería, asegurando una carga balanceada y segura.

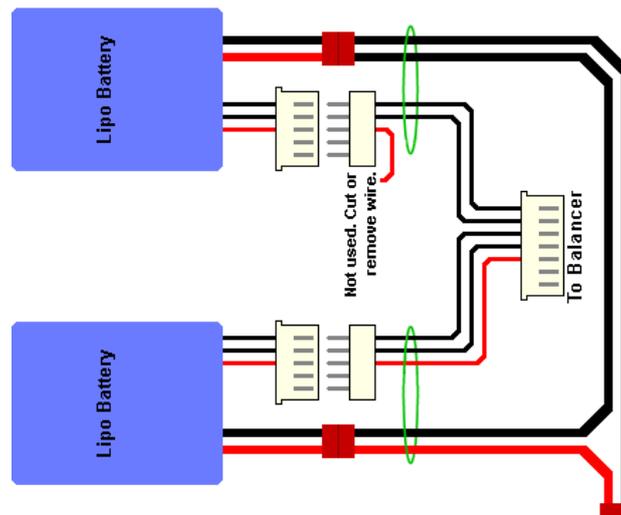


Figura 68: Esquema de carga en paralelo

➤ AJUSTE Y CONFIGURACION: CONSEJOS

- Agrupar las baterías con un rango de carga de 0.05 V. Al tratarse de una descarga en paralelo, nuestras baterías mantendrán el mismo nivel de carga en todo momento
- Amperaje: (Nº de baterías \* 1C) – 0.1A
- Voltaje: configurar este campo en función de las celdas que tenga (2 – 4S)
- TVC (Voltaje Terminal): Establecer en 4.18V

## 7.2 Consumo eléctrico del brazo

Para poder seleccionar la batería que se necesita, se ha empleado el análisis realizado sobre una tarea común para determinar el consumo de cada articulación y poder calcular el tiempo de uso que proporcionará la batería en función de su capacidad.

Para calcular el consumo de los motores, se puede dividir el par demandado al motor en cada movimiento entre la constante de par de dicho motor. Esto viene determinado por la fórmula:

$$Par_{Motor} = Km * I$$

Despejando la intensidad:

$$I = \frac{Par_{Motor}}{Km}$$

Una vez calculada la intensidad, podremos conocer la duración de la batería:

$$Tiempo\ operativo\ (h) = \frac{Capacidad\ de\ la\ batería\ (Ah)}{I\ consumida\ por\ los\ motores\ (A)}$$

Según las simulaciones de par ejercido por cada uno de los motores durante una tarea común, como es la de beber agua durante 12 segundos, se ha calculado el consumo para las 2 posibilidades de diseño, con 4 y 5 grados de libertad (y montando motores con y sin Harmonic Drive).

### 7.3 Modelo de 4 grados de libertad en tarea "beber agua"

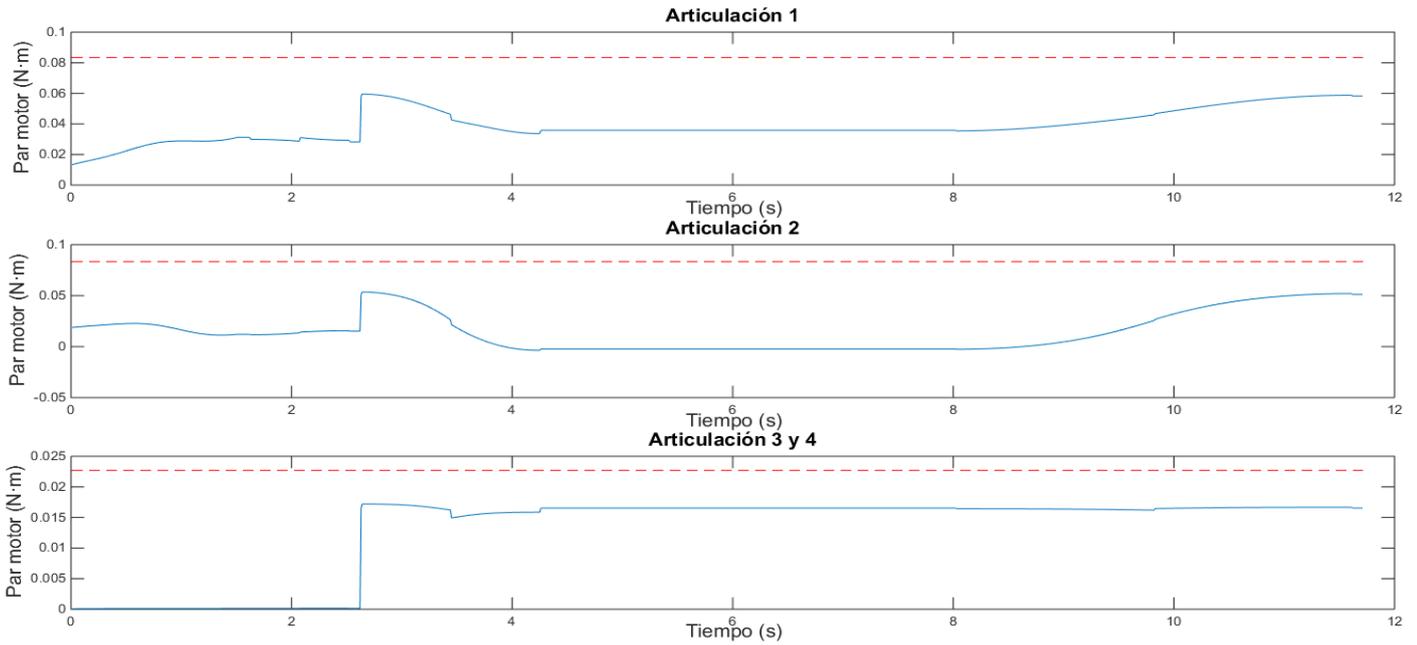


Gráfico 1: Modelo 4 g.d.l en tarea "Beber agua"

VALORES NOMINALES 4 d.o.f	SIN HARMONIC DRIVE		CON HARMONIC DRIVE		Articulacion 3 y 4
	Articulacion 1	Articulacion 2	Articulacion 1 Harmonic Drive	Articulacion 2 Harmonic Drive	
<b>Motricidad</b>	EC 45 flat (50W) conjuntamente con el reductor GP42 C de reduccion 126	EC 45 flat (50W) y reductor GP 42 B de reduccion 81	EC 60 flat (100W) y Harmonic Drive	EC 60 flat (100W) y H.D.	Ecmax 22 (25W) con reductor GP 22 HP de reduccion 104
<b>Instante 0 - 2 s</b>	0,020	0,020	0,020	0,020	0,000
<b>Instante 2 - 4 s</b>	0,050	0,030	0,050	0,030	0,017
<b>Instante 4 - 6 s</b>	0,040	0,010	0,040	0,010	0,020
<b>Instante 6 - 8 s</b>	0,040	0,010	0,040	0,010	0,020
<b>Instante 8 - 10 s</b>	0,050	0,025	0,050	0,025	0,020
<b>Instante 10 - 12 s</b>	0,060	0,050	0,060	0,050	0,020
<b>Par medio (Nm) (motor)</b>	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02
<b>Km (mNm/A)</b>	33,50	33,50	53,40	53,40	9,10
<b>I demandada (A)</b>	<b>1,29</b>	<b>0,72</b>	<b>0,81</b>	<b>0,45</b>	<b>1,78</b>
<b>Tiempo total (12 s)</b>	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

Total <b>sin</b> Harmonic Drive (A)	<b>3,79</b>
Total <b>con</b> Harmonic Drive (A)	<b>3,04</b>

Tabla 7: Valores nominales de par 4 g.d.l

Como se puede observar, el sistema Harmonic Drive reducirá 0,75 A el consumo de corriente eléctrica.

## 7.4 Modelo de 5 grados de libertad en tarea "beber agua"

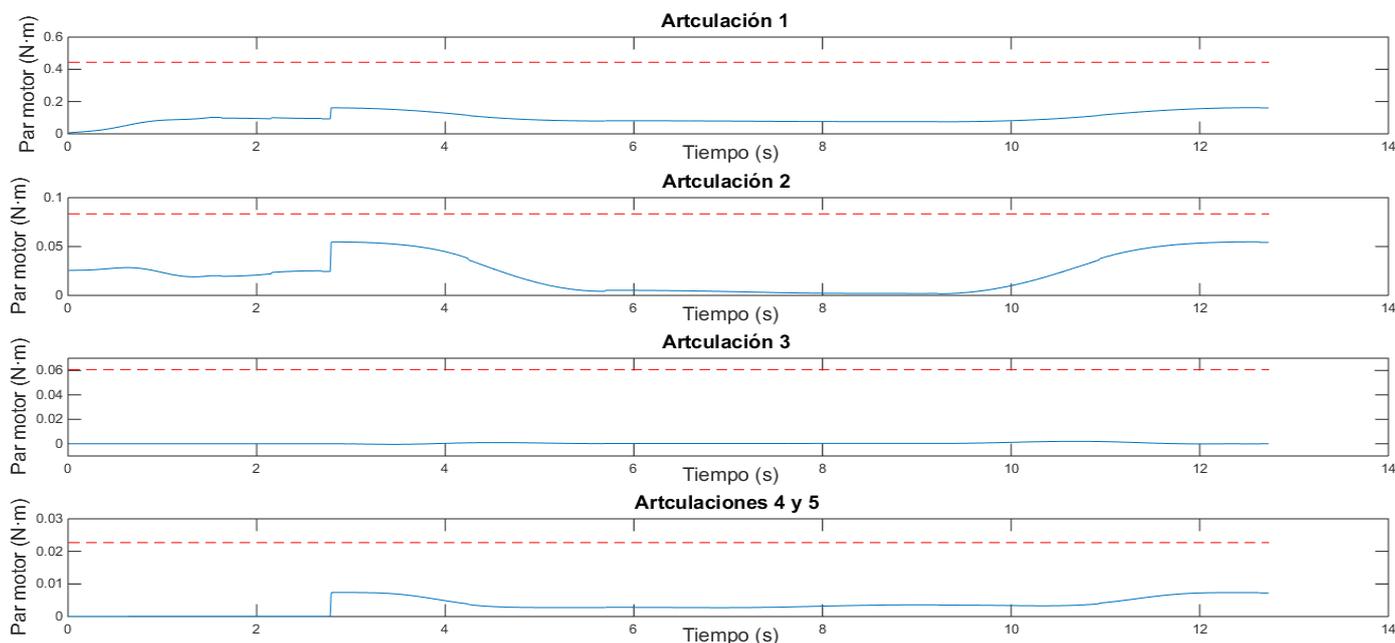


Gráfico 2: Modelo 5 g.d.l en tarea "Beber agua"

VALORES NOMINALES 5 d.o.f	SIN HARMONIC DRIVE		CON HARMONIC DRIVE		Articulacion 3	Articulacion 4 y 5
	Articulacion 1	Articulacion 2	Articulacion 1 Harmonic Drive	Articulacion 2 Harmonic Drive		
<b>Motricidad</b>	EC 45 flat (50W) conjuntamente con el reductor GP42 C de reduccion 126	EC 45 flat (50W) y reductor GP 42 B de reduccion 81	EC 60 flat (100W) y Harmonic Drive	EC 60 flat (100W) y H.D.	Ecmax 22 (25W) con reductor GP 22 HP de reduccion 104	Ecmax 30 (60W) con reductor GP 32 C de reduccion 411
<b>Instante 0 - 2 s</b>	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0
<b>Instante 2 - 4 s</b>	0,02	0,05	0,02	0,05	0,00	0,0055
<b>Instante 4 - 6 s</b>	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,003
<b>Instante 6 - 8 s</b>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,003
<b>Instante 8 - 10 s</b>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,003
<b>Instante 10 - 12 s</b>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01	0,005
<b>Par medio (Nm) (motor)</b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00325
<b>Km (mNm/A)</b>	33,50	33,50	53,40	53,40	9,10	60,70
<b>I demandada (A)</b>	<b>0,47</b>	<b>0,62</b>	<b>0,30</b>	<b>0,39</b>	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>
<b>Tiempo total (12 s)</b>	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12

Total <b>sin</b> Harmonic Drive (A)	<b>1,24</b>
Total <b>con</b> Harmonic Drive (A)	<b>0,83</b>

Tabla 8: Valores nominales de par 5 g.d.l

El consumo eléctrico con este modelo será menor que con el de 4 d.o.f. En este caso, el Harmonic Drive reduce el consumo de corriente eléctrica en 0,4 A.

## 7.5 Modelo de 4 y 5 grados de libertad con valores máximos de par

VALORES MÁXIMOS	SIN HARMONIC DRIVE		CON HARMONIC DRIVE		Articulacion 3 y 4	Articulacion 5
	Articulacion 1	Articulacion 2	Articulacion 1 Harmonic Drive	Articulacion 2 Harmonic Drive		
<b>Motricidad</b>	EC 45 flat (50W) conjuntamente con el reductor GP42 C de reducción 126	EC 45 flat (50W) y reductor GP 42 B de reducción 81	EC 60 flat (100W) y Harmonic Drive	EC 60 flat (100W) y H.D.	Ecmax 22 (25W) con reductor GP 22 HP de reducción 104	Ecmax 30 (60W) con reductor GP 32 C de reducción 411
<b>Par max (Nm) (motor + reductor)</b>	15	15	6	6	3	3
<b>Reduccion</b>	126	81	70	70	104	411
<b>Km (mNm/A)</b>	33,5	33,5	53,4	53,4	9,1	9,1
<b>I max (A) (demandada a la batería)</b>	3,55	5,53	1,61	1,61	3,17	0,80
<b>pagina pdf</b>	150	167	152	167	100	

Modelo 4 d.o.f	
Total <b>sin</b> Harmonic Drive (A)	<b>12,25</b>
Total <b>con</b> Harmonic Drive (A)	<b>6,38</b>

Modelo 5 d.o.f	
Total <b>sin</b> Harmonic Drive (A)	<b>13,05</b>
Total <b>con</b> Harmonic Drive (A)	<b>7,18</b>

Tabla 9: Valores de par máximos

Como se puede observar, en los instantes de tiempo en los que se trabaje a máximo par, el Harmonic Drive es capaz de reducir hasta el 50% del consumo de corriente eléctrica para el modelo de 4 d.o.f y aproximadamente un 45% para el modelo de 5 d.o.f

## 8 - VERIFICACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE CONSUMO

### 8.1 Criterio de duración de la batería

Con los modelos presentados, se podrán calcular la duración del brazo robótico en funcionamiento, teniendo en cuenta el consumo medio observado durante la tarea de beber agua:

$$\text{Duración (h)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (Ah)}}{\text{Consumo medio (A)}}$$

	Capacidad (Ah)	Duración (horas)			
		Modelo 4 d.o.f		Modelo 5 d.o.f	
		Sin H.D.	Con H.D.	Sin H.D.	Con H.D.
Opción 1	6,6	1,74	2,17	4,29	5,79
Opción 2	6,6	1,74	2,17	4,29	5,79
Opción 3	8	2,11	2,63	5,19	7,02
Opción 4	10	2,64	3,29	6,49	8,77

Tabla 10: Duración de las baterías

## 8.2 Criterio de C Rate

Como se explica anteriormente, la descarga máxima que podrá entregar una batería depende del parámetro C y la capacidad de la misma. Para estudiar el caso más desfavorable, se ha calculado el consumo máximo que podrá demandar el brazo si se diese un instante en el que tuviese que vencer el par máximo en cada uno de los motores:

VALORES MÁXIMOS	SIN HARMONIC DRIVE		CON HARMONIC DRIVE		Articulacion 3 y 4	Articulacion 5
	Articulacion 1	Articulacion 2	Articulacion 1 Harmonic Drive	Articulacion 2 Harmonic Drive		
<b>Motricidad</b>	EC 45 flat (50W) conjuntamente con el reductor GP42 C de reducción 126	EC 45 flat (50W) y reductor GP 42 B de reducción 81	EC 60 flat (100W) y Harmonic Drive	EC 60 flat (100W) y H.D.	Ecmx 22 (25W) con reductor GP 22 HP de reducción 104	Ecmx 30 (60W) con reductor GP 32 C de reducción 411
<b>Par max (Nm) (motor + reductor)</b>	15	15	6	6	3	3
<b>Reduccion</b>	126	81	70	70	104	411
<b>Km (mNm/A)</b>	33,5	33,5	53,4	53,4	9,1	9,1
<b>I max (A) (demandada a la batería)</b>	3,55	5,53	1,61	1,61	3,17	0,80
<b>pagina pdf</b>	150	167	152	167	100	

Modelo 4 d.o.f	
Total sin Harmonic Drive (A)	12,25
Total con Harmonic Drive (A)	6,38

Modelo 5 d.o.f	
Total sin Harmonic Drive (A)	13,05
Total con Harmonic Drive (A)	7,18

Tabla 11: Valores máximos de consumo de corriente

Calculamos la descarga máxima que es capaz de soportar la batería con menor C Rate y menor capacidad, la opción 1 de 3300 mAh y C 50:

$$\text{Máxima descarga (A)} = C \text{ Rating} \times \text{Capacidad (Ah)}$$

$$\text{Máxima descarga (A)} = 50 \times 3,3 = 165 \text{ A}$$

Como podemos observar, debido a la gran capacidad de las baterías LiPo para descargar grandes corrientes en tiempos reducidos, la batería será capaz de entregar 165 A en un instante determinado, frente a los 15,42 A de demanda que se han calculado sobre el modelo de 5 d. o. f sin Harmonic Drive.

- **Conclusión:** todas las baterías estudiadas serán capaces de cubrir la demanda máxima de corriente en los momentos más críticos. Teniendo en cuenta que las características son similares, y el precio total no tiene una gran diferencia entre los distintos modelos analizados, se ha elegido la opción 4. Estas baterías solo añaden 60 g al conjunto (sumando el peso de ambas) respecto a la opción anterior con 1000 mAh menos. Por ello el robot diseñado con 5 grados de libertad y empleando el sistema Harmonic drive será capaz de trabajar realizando tareas básicas durante 8,77 horas (cálculo basado en la tarea de beber agua ininterrumpidamente).

## 9 - TABLA COMPARATIVA DE CÁMARAS

	Marca	Precio	Características	Vendedor	Comentarios	Imagen
<b>Opción 1</b>	Módulo de Cámara Raspberry Pi (G)	31,19 €	Módulo de Cámara Raspberry Pi (G) c/ Lente Ojo de Pez Admite todas las revisiones de la RPi Tiene una lente ojo de pez, que ofrece un campo de visión más amplio Cuenta con un sensor OV5647 de 5 megapíxeles	Waveshare	Necesita este cable específico: Cable para Cámara Raspberry Pi Zero V1.3 (15cm)	
<b>Opción 2</b>	Módulo de Cámara a Color de 13MP Arducam IMX135 MIPI para Raspberry Pi	55,49 €	Módulo de Cámara a Color de 13MP Arducam IMX135 MIPI Está diseñada para Raspberry Pi 3/3B+/4 Cuenta con una lente de enfoque motorizada programable Se basa en un sensor de imagen Sony IMX135 de 1/3 de pulgada Equipa un obturador electrónico con un tiempo de integración variable	ArduCAM	Directa a interfaz CSI-2 de Rpi sin hardware adicional	
<b>Opción 3</b>	Módulo de Cámara con Montura de Baja Distorsión Arducam IMX219 M12 para Raspberry Pi	44,39 €	Módulo de Cámara con Montura de Baja Distorsión Arducam IMX219 M12 para Raspberry Pi Diseñada para Raspberry Pi Cuenta con una lente de cámara con montura de baja distorsión Diseñado principalmente para NVIDIA Jetson Nano Ofrece lente de distorsión muy baja (<3%) Incluye cable de extensión del sensor y lente gran angular de 8MP	Waveshare	NO es compatible con Raspberry Pi 3B/B+	
<b>Opción 4</b>	GeekPi 5MP 1080p Módulo de cámara para Raspberry Pi 4 Modelo B	19,99 €	Foco ajustable: se puede ajustar manualmente de acuerdo con la distancia del objeto. Sensor OV5647 de 5 megapíxeles: se puede conectar un LED infrarrojo y/o un LED de flash de relleno. LED infrarrojo de 2 piezas: admite la visión nocturna y la función de grabación de vid	GeekPi	Infrarojo diurna y nocturna. 5 MP. Hardware de conexión incluido.	
<b>Opción 5</b>	Longrunner for Raspberry Pi 4 Camera Cámara Module de automático de corte por infrarrojos Visión	28,99 €	Tamaño CCD: 1/4 pulgada Apertura (F): 1.8 Longitud focal: 3.6 mm (ajustable) Campo de visión: 72 grados Resolución de sensor preferida: 1080p Dimensión: 1.42 pulgadas x1.04 pulgadas x0.94 pulgadas 4 orificios para tornillos que se utilizan para una posición fija Soporta una salida de potencia de 3.3V Soporta la conexión de infrarrojos LED o flash LED	Longrunner	Hardware incluido. Gran angular. Cambio automático de modo diurno a nocturno. 3 sensores.  Buenas reseñas	

Tabla 12: Comparativa de cámaras de visión

- **Conclusión:** Por su capacidad de cambio de modo diurno a nocturno automáticamente, su precio intermedio y las reseñas de otras clientes leídas en varios foros, se ha elegido la opción 5, la Raspberry Pi4 con visión por infrarrojos. En este proyecto no se va a entrar más en detalle en la aplicación de la visión, por lo que se deja abierto como sugerencia, pero se podrá elegir otro equipo en caso de encontrar un modelo que se ajustase mejor a los requisitos del programa empleado.

## 10 - ANTECEDENTES PARA EL SISTEMA DE VISIÓN: TRIANGULACIÓN DE IMAGEN

Debido a que, en el uso del brazo robótico, será necesario el reconocimiento de espacios 3D para poder interactuar con los objetos, se ha investigado a sobre de la metodología a emplear para poder solucionarlo empleando cámaras 2D.

Empleando la triangulación, podemos ser capaces de determinar un punto en el espacio de 3D a través de dos o más proyecciones de ese punto en diferentes imágenes. La triangulación, a veces denominada reconstrucción, se resuelve conociendo la intersección de las proyecciones de un punto 3D en varias imágenes. Estas proyecciones, se denominan "Puntos correspondientes". Utilizando una serie de formulaciones algebraicas podemos ser capaces de resolver ese punto 3D.

En un caso ideal de geometría epipolar (visión en estéreo captada por 2 cámaras desde posiciones distintas), un punto 3D  $x$  se proyecta sobre dos imágenes de la cámara a través de líneas rectas (en verde) que se cruzan con el punto focal de cada cámara,  $O_1$  y  $O_2$ . Los puntos resultantes de esta imagen son  $y_1$  y  $y_2$ . En la Figura 68, podemos encontrar la representación gráfica de este concepto:

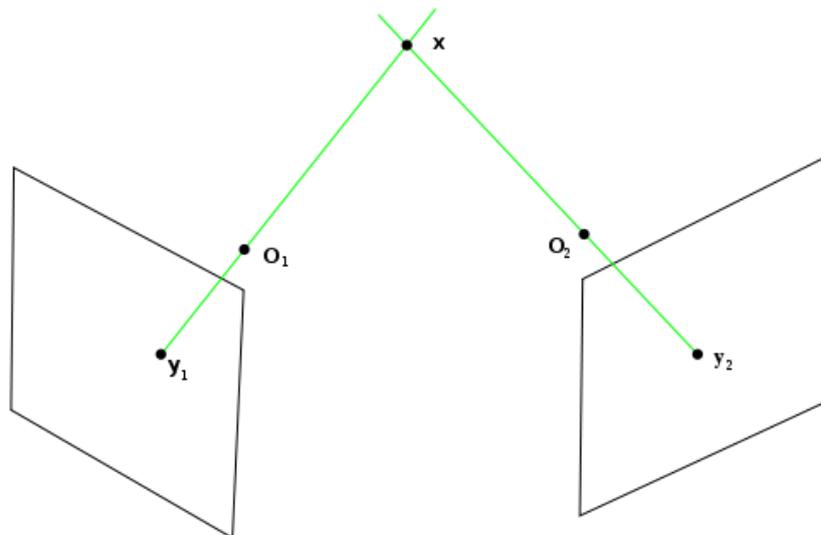


Figura 69: Geometría epipolar, caso ideal

Utilizando álgebra básica lineal, esa intersección  $x$  puede determinarse de una manera directa.

En la realidad, las cámaras presentan ruidos y distorsiones, generando puntos de imagen arbitrarios que aumentan la complejidad de la triangulación:

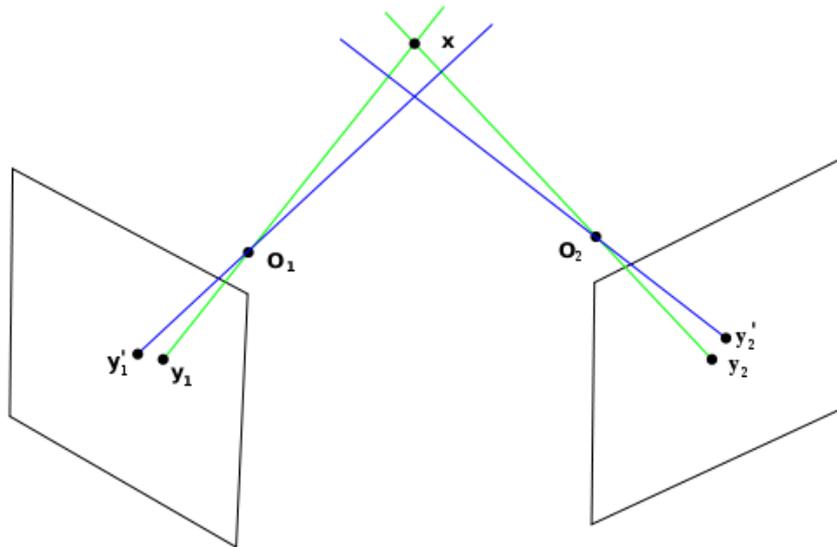


Figura 70: Geometría epipolar, caso real

Estas proyecciones  $y_1'$  y  $y_2'$ , se deben tener en cuenta en la triangulación ya que se cruzan en el espacio 3D, pero no intersectan con el punto  $x$ .

En este proyecto, no se va a entrar más en detalle en el estudio del programa de visión, pero se deberán conocer las matrices de las cámaras, así como su distorsión geométrica para poder determinar las ecuaciones que generarán los puntos 3D necesarios para interactuar con el entorno, a través de las dos cámaras 2D.

Siguiendo el concepto básico de triangulación aquí descrito, se realiza la propuesta de colocar una de las cámaras sobre la parte delantera del tirante izquierdo del chaleco, y la otra en la parte inferior derecha. Así, se podrán determinar las proyecciones de los puntos necesarios del espacio 3D.

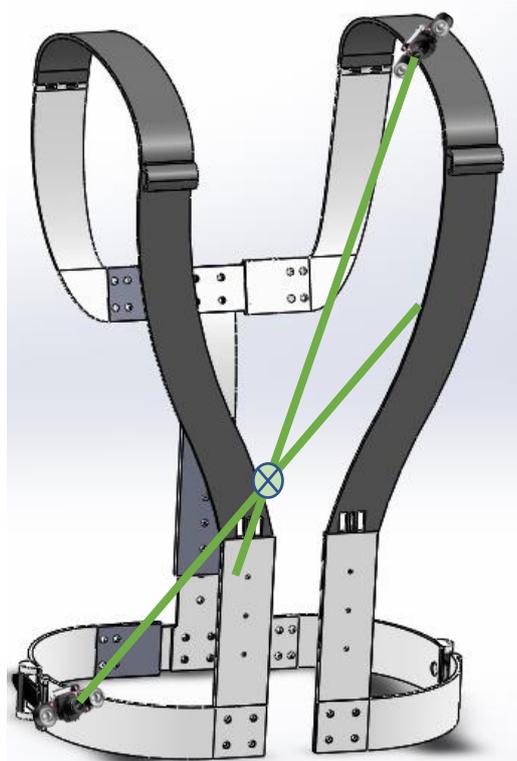


Figura 71: Propuesta de ubicación de cámaras

Al tratarse del mismo conjunto mecánico en la parte delantera, las dos cámaras estarán siempre en la misma posición, evitando desajustes en la visión.

Para colocar las cámaras sobre el chaleco, se podrá replicar o adquirir el soporte JUN\_Electronic. Este soporte, favorece la refrigeración de la cámara evitando fallos por sobrecalentamiento:



Figura 72: Soporte para cámaras

Además, tanto la inserción de la cámara como la fijación al chaleco, será muy fácil de llevar a cabo. Para fijarlo al chaleco, se emplearán los 2 agujeros inferiores del soporte, atornillando directamente contra el plástico impreso del modelo. El ensamblaje de la cámara con el soporte es tan sencillo como colocar la cámara en su interior y fijar la parte trasera con los 4 tornillos que vienen incluidos:

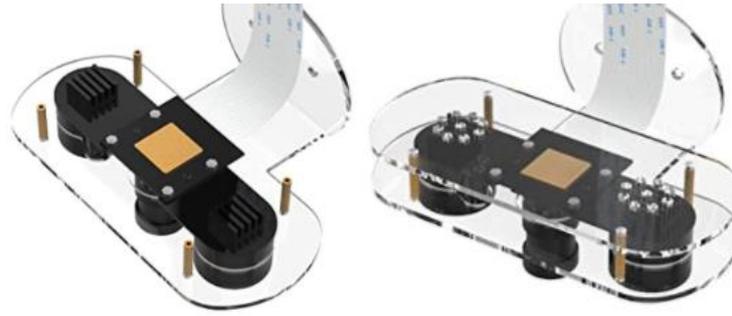


Figura 73: Ensamblaje de soporte cámaras

## 11 - COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Para poder controlar los motores del brazo articulado, se deberán montar sobre el chaleco los siguientes componentes:

- **ESCON Module 50/5 A 4-Q Servocontroller:** Este módulo servocontrolador de tamaño reducido y 12 g de peso total, será el encargado de accionar los motores. Su capacidad de control es para motores de hasta 250W, pudiendo utilizarse tanto en motores CC con escobillas como motores EC sin escobillas. Sus dimensiones son 43,2 mm x 31,8 mm x 12,7 mm, y su ubicación será sobre el tirante del brazo contrario al que lleve anclado el robot.



Figura 74: ESCON Module 50/5 A 4-Q Servocontroller

- **RaspberryPi 4: Model B 4GB:** este modelo de raspberry escogido para el proyecto, es un modelo de bajo consumo y sin ventilador, por lo que es muy silenciosa y usa mucha menos energía que otros controladores de sus mismas características. Este modelo viene equipado con Gigabit Ethernet, con redes inalámbricas integradas y Bluetooth. Además, el modelo B es capaz de decodificar vídeo de 4K, beneficiándose de un almacenamiento más rápido a través de USB 3.0. Este Raspberry es la primera que admite dos pantallas a la vez, aunque esta característica no es de gran relevancia para el funcionamiento del brazo, facilitará la visualización y configuración a la persona que la configure. La conexión USB ha sido mejorada, ya que viene con dos puertos USB 2 y otros dos puertos USB 3, que pueden transferir datos hasta diez veces más rápido.

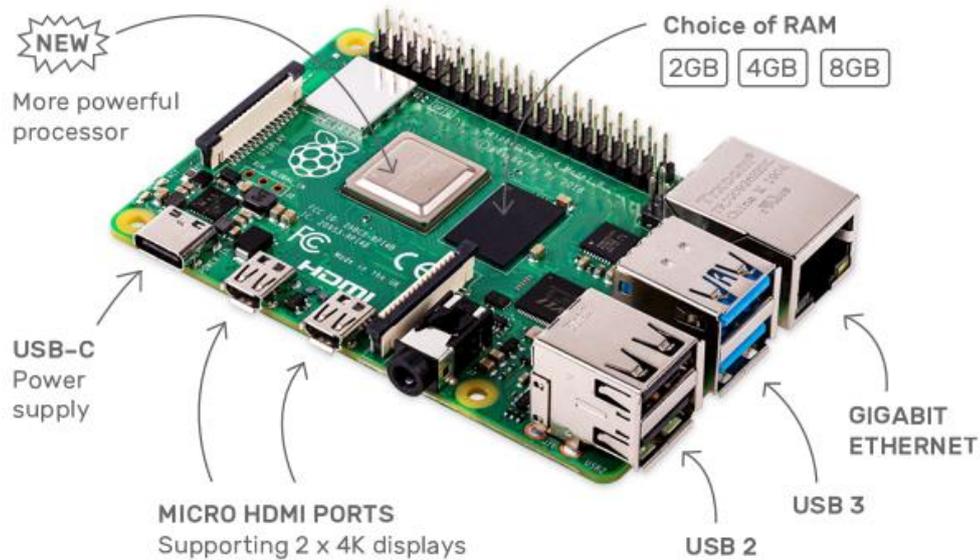


Figura 75: Puertos Raspberry Pi4

## 12 - IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS

Lamentablemente, debido a la situación actual en la que los laboratorios de la universidad han permanecido cerrados, no hemos tenido acceso a las impresoras 3D con capacidad para imprimir grandes piezas. Sin embargo, gracias a la colaboración de la asociación cultural turolense “Caballeros Santiaguistas de la Encomienda de San Marcos de Teruel”, que me han prestado su impresora, se han podido realizar prototipos a escala 1:2 para ajustar e ir corrigiendo errores en el diseño.

La impresora utilizada, ha sido una Creality CR-10S, con las siguientes características:

- Volumen de impresión 300 x 300 x 300 x 300 x 400 mm (1 cabezal)
- Máxima precisión: 10 micras
- Velocidad de impresión: 60 - 100 mm/s
- Diámetro de la boquilla: 0,4 mm (sustituible por 0,2 mm / 0,3 mm)
- Conectividad: USB / Tarjeta SD
- Compatibilidad de SO: Windows / Mac OS / Linux
- Materiales: PLA / ABS / TPU / Fibra de carbono reforzada / Cobre / Relleno de madera
- Diámetro 1,75 mm
- Tecnología: FDM (deposición de filamentos)

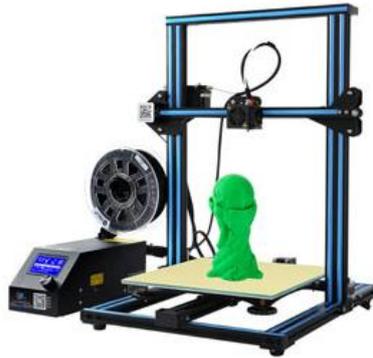


Figura 76: Creality CR-10S

Con el objetivo de transmitir los conocimientos que ha sido necesario adquirir para realizar la impresión de las piezas, se expone a continuación el proceso de impresión seguido para realizar los prototipos. Con ello, los alumnos que sigan trabajando en el proyecto podrán seguir las mismas pautas para imprimir los prototipos y piezas necesarias continuando con la elaboración del prototipo completo final.

## 12.1 Preparación de archivos

Las impresoras 3D, utilizan el formato “.gcode” para llevar a cabo la impresión de las piezas. Dentro de los archivos en este formato se recogen tanto la geometría de la pieza como los parámetros necesarios para la impresión.

Para la conversión de nuestros archivos “.prt o .sldprt”, generados por defecto al diseñar piezas en SolidWorks, debemos guardar primero las piezas con la extensión “.stl”. Estos archivos en “.stl” son mapas binarios de bits, que se convertirán posteriormente en el “.gcode” empleando un programa específico para ello.

En el desarrollo de este proyecto, se ha empleado el programa Ultimaker Cura versión 4.7.0, software gratuito con posibilidad de selección de idioma en Español. Para descargar el programa, consultar el link de la bibliografía. Una vez instalado, debemos instalarlo y abrirlo para poder convertir las piezas.

Procedimiento y parametrización de las piezas:

- 1- Seleccionar la impresora que vamos a utilizar. El programa tiene tanto la opción de agregarla automáticamente utilizando la IP o desde una nube de datos, como la de hacerlo manualmente seleccionando marca y modelo de la misma.
- 2- Abrir la pieza a imprimir. Pulsando el icono de carpeta, situado en la parte superior izquierda de la interfaz del programa, abriremos el archivo deseado.
- 3- Escoger el material de impresión y el diámetro de la boquilla (Nozzle Size)

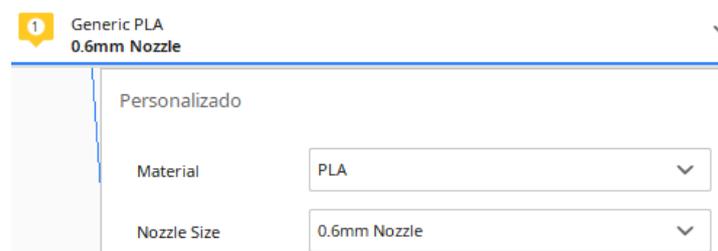


Figura 77: Parámetros de impresión 1

- 4- Parametrización de la impresión. Según la geometría y características de la pieza, se pueden variar los parámetros que a continuación se muestran para obtener mejores resultados. La configuración “estándar” que se ha introducido para imprimir los primeros prototipos, ha sido la siguiente:

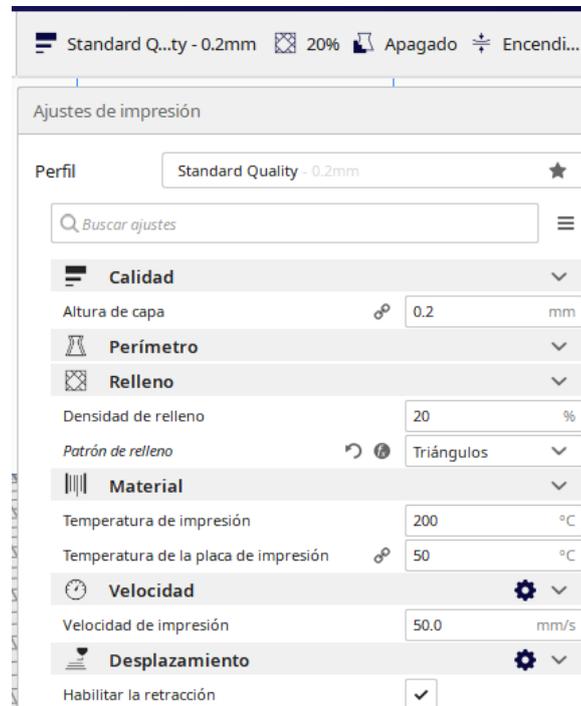


Figura 78: Parámetros de impresión 2

Por defecto, el programa habilita la retracción, que permite que la impresora tire del filamento hacia atrás cuando se desplaza de un punto a otro sin aportar material, asegurando que no cae plástico fundido en zonas no deseadas. El resto de los parámetros coinciden con la configuración deseada, excepto el patrón de relleno que se ha elegido en triángulos para favorecer la solidez y resistencia de la pieza. También se ha configurado la adherencia de la placa de impresión, escogiendo el tipo “Borde”, que facilitará despegarla sin que sufra daños.

- 5- Configurar la posición de la pieza, para favorecer la impresión. En la parte izquierda de la interfaz, podemos rotar, trasladar y aumentar o reducir la escala, para poder ajustar las dimensiones de la pieza al área de impresión disponible. También, debemos colocar las piezas en la posición que más favorezca a la impresora para no generar defectos y hacer cordones continuos que aumenten la capacidad estructural de las impresiones.
- 6- Una vez configurado todo, presionaremos el botón “Segmentación”, y guardaremos el documento creado en una microSD, para posteriormente insertarlo en la impresora.

## 12.2 Configuración de la impresora y funcionamiento

La impresora Creality CR-10S tiene una pantalla con un botón ruleta, que nos permite navegar por las opciones disponibles. Su configuración y puesta en marcha es relativamente sencilla, teniendo la opción de imprimir utilizando una microSD o por conexión USB.

- 1- Introducir el filamento. Presionando la pestaña que hay situada a la entrada del filamento, deberemos introducirlo hasta que haga tope con el extrusor de salida. Es recomendable cortar la punta del filamento de forma biselada antes de introducirlo
- 2- Calibrar la altura de la cama. Para nivelar la altura de la superficie sobre la que se realizará la impresión, denominada “cama”, navegaremos por la interfaz de la impresora, pulsando la ruleta y accediendo a: Prepare => Bed Auto Leveling => next step

Una vez situada la impresora en su posición sobre la primera esquina, utilizaremos 1 folio (ya que el espesor a calibrar es de 1 mm) y ajustaremos la distancia entre el extrusor y la cama con la ruleta situada debajo de esta hasta que podamos pasar el folio y que éste roce un poco. Una vez ajustada esta esquina, presionaremos de nuevo “next step” y la impresora llevará el extrusor a la siguiente esquina.

Realizaremos este ajuste en las 4 esquinas y en el centro. Atención, hay que asegurar que el extrusor no roce con la cama en ninguno de los 5 puntos, ya que podríamos rayarla y dañarla si empezamos a imprimir.

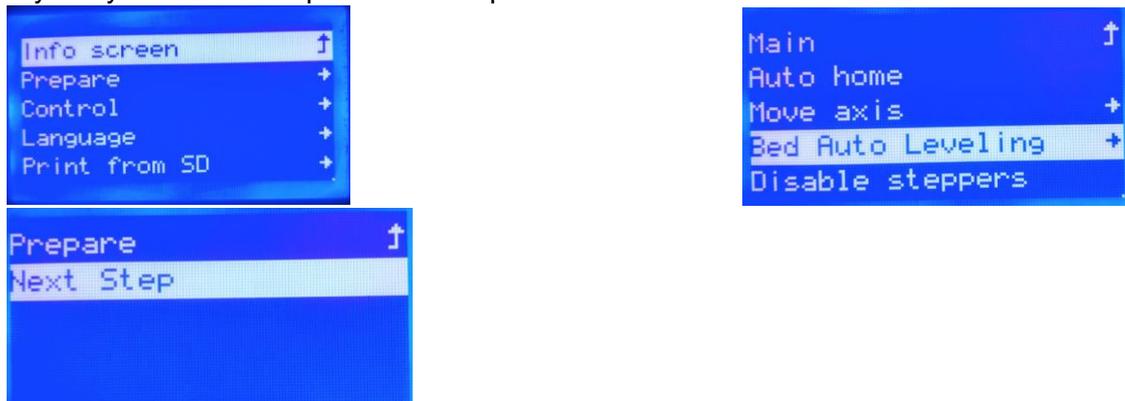


Figura 79: Calibración de la impresora

- 3- Precalentar la impresora. Este modelo tiene dos opciones de precalentamiento, para imprimir con filamento PLA y con ABS (Preheat PLA y Preheat ABS). Esto es opcional realizarlo, pero es bastante útil para que vaya llegando a la temperatura mientras preparamos los archivos de impresión.



Figura 80: Precalentamiento de la impresora

- 4- Una vez pasado el hilo y calibrado la impresora, pasaremos a realizar la impresión. Para ello, accederemos al menú y a “Print from SD”, buscaremos y seleccionaremos el archivo creado y comenzará la impresión. Cuando lanzamos la orden de imprimir,

la cama comienza a calentarse hasta la temperatura que hayamos predefinido en el “.gcode”, es en se momento cuando debemos aplicar laca (yo he utilizado la de fijación fuerte de la marca Nelly) para impresión sobre ella, que nos asegurará que el plástico se adhiera y las piezas salgan correctamente.

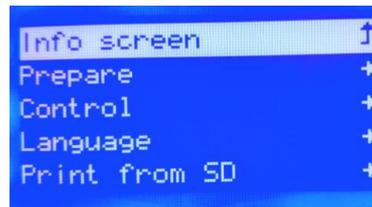


Figura 81: Imprimir desde SD



Figura 82: Laca empleada

Debido al escaso tiempo del que se disponía la impresora, se decidió unir las piezas en conjuntos sólidos para ahorrar tiempo, imprimiendo el prototipo a escala 1:2. Aquí, se muestra como se ha reducido el subensamblaje trasero al 50%, empleando el Ultimaker Cura:

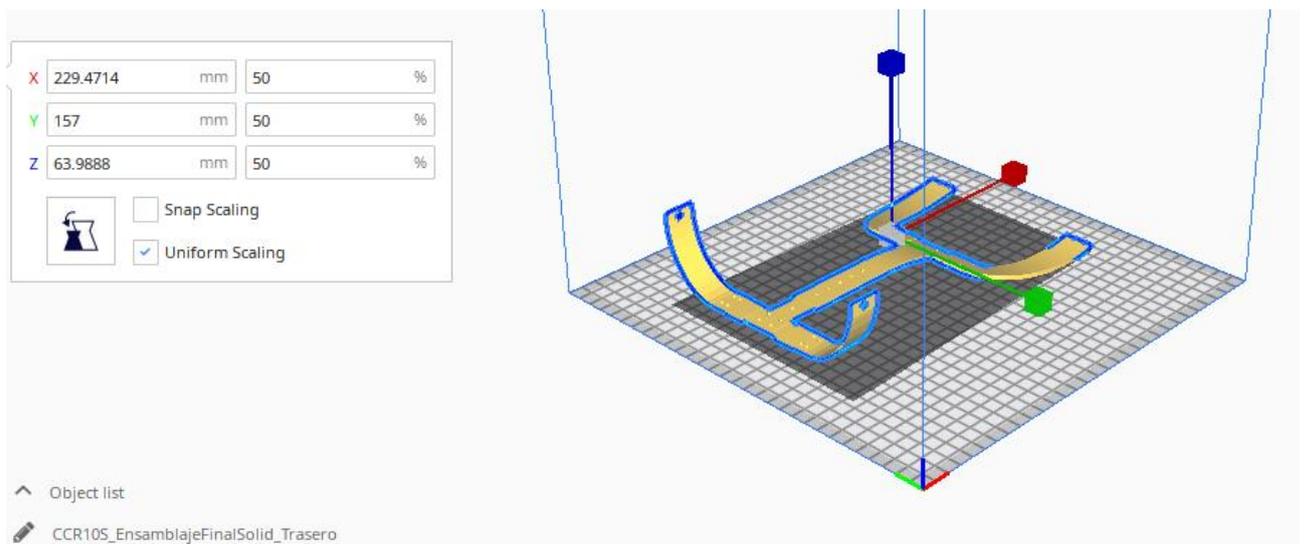


Figura 83: Pieza en Ultimaker Cura

## 13 - MEJORAS Y CORRECCIONES APLICADAS TRAS LA IMPRESIÓN

### 13.1 Zonas con espesor reducido

Debido a los taladros realizados verticalmente en las piezas B\_1 y B\_2, para poder ajustar el ancho de las partes superior e inferior, el espesor de la pieza se veía reducido generando posibles puntos críticos en la pieza. Aunque en el modelo de cargas estáticas el conjunto del chaleco cumplía, al imprimir el prototipo a escala 1:2 este espesor se vio tan reducido que la pieza quedó muy débil y se rompió al intentar montarlo.



Figura 84: Impresión de PiezaB\_1 NOK

Por ello, se decidió cambiar la posición de los agujeros de ajuste de tamaño, pasando a atravesar una gran sección de la pieza verticalmente a realizarlo solo por el espesor de esta en sentido horizontal:

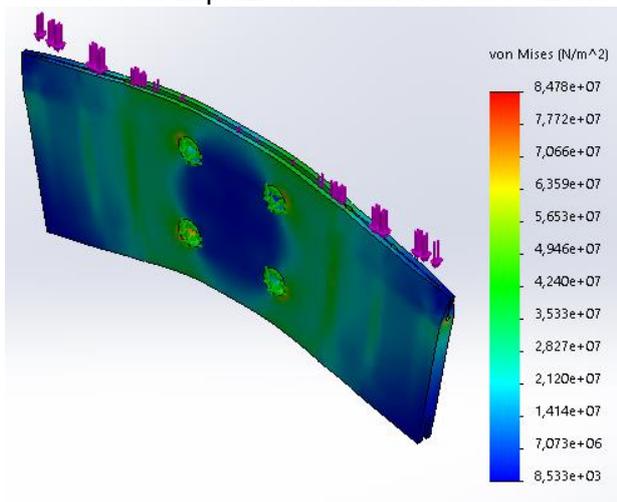


Figura 85: Simulación PiezaB\_1 NOK

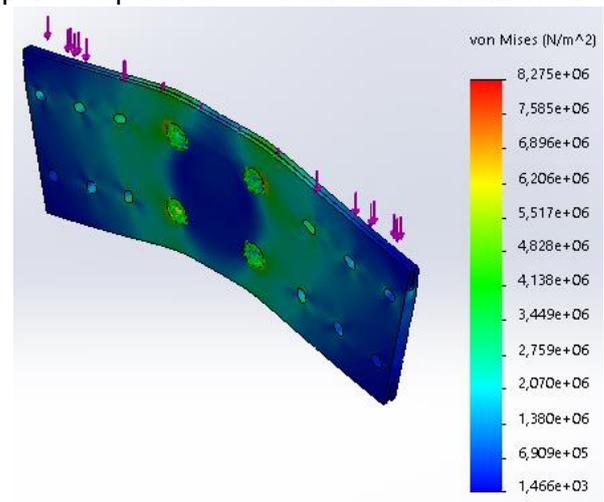


Figura 86: Simulación PiezaB\_1 rediseñada

Como se puede observar en las imágenes expuestas, aplicando una fuerza sobre toda la superficie superior de la pieza, el punto más crítico reduce su tensión 10 veces. Pasando de  $8,4e+07$  N/m<sup>2</sup> a  $8,25e+06$  N/m<sup>2</sup>. Con esta simulación, se puede comprobar como el posible defecto observado en la impresión se ha corregido.

### 13.2 Cierre Milimétrico

En primer lugar, se decidió imprimir el sistema diseñado para cerrar el chaleco, para poder comprobar su funcionamiento. Esta impresión se realizó a escala 1:1, observando que la precisión de la impresora no era capaz de reproducir los dientes de la cinta. Esto genera un potencial riesgo de que el cierre no sea eficaz.



Figura 87: Cierre milimétrico, primer diseño

Para solucionarlo, se rediseñaron los dientes dándoles más altura (de 1mm a 4mm) y anchura (de 1 mm a 3mm):

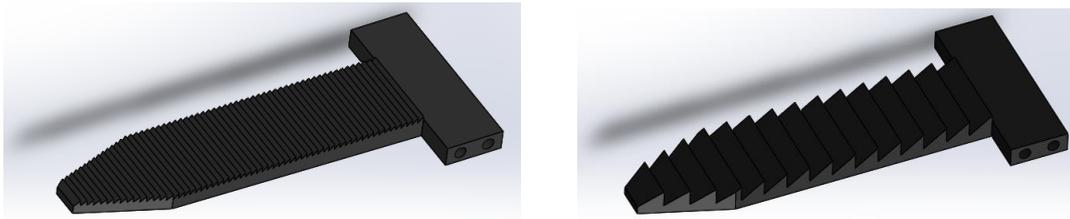


Figura 88: Rediseño de cinta milimétrica

Además, se comprobó que la solución propuesta de insertar un taco de goma flexible para que el trinquete presionase sobre la cinta era muy poco robusta y con posibilidad de perder el agarre a largo plazo. Por ello, se volvió a definir la geometría tanto del soporte como del propio trinquete, cambiando de un taco de goma a una goma elástica para realizar la función de mantenerlo cerrado. Una vez finalizado se volvió a imprimir y se comprobó su correcto funcionamiento.

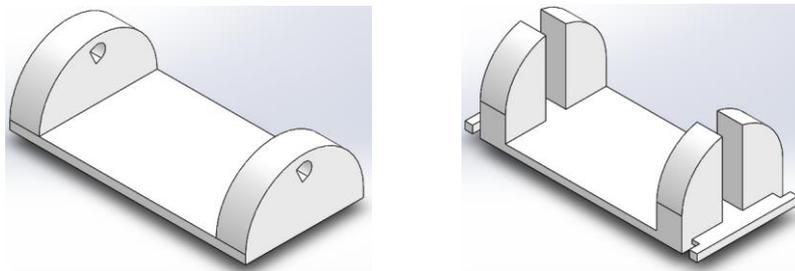


Figura 89: Rediseño del soporte del cierre

Tras estas dos modificaciones, este fue el resultado de la pieza obtenida:



Figura 90: Cierre milimétrico, diseño final



## 14 - PROGRAMA PARA APERTURA DEL CHALECO

Como se comenta en el apartado 1, será necesario un controlador con un accionador que se pueda manejar por control de voz o utilizando los pies.

Para comprobar el funcionamiento del mecanismo, con la impresión a escala 1:2, se programó una secuencia con un Arduino UNO y un Joystick como controlador. De esta forma, el usuario puede empujar el Joystick hacia delante y hacia detrás para hacer subir y bajar la barra que abre el conjunto.

A continuación, se muestra el programa:

```
#include <Stepper.h>

#define STEPS 32

#define IN1 11
#define IN2 10
#define IN3 9
#define IN4 8

Stepper stepper(STEPS,IN1,IN2,IN3,IN4); // Definición del motor y de los pins de control

#define joystick A0

void setup() { }

void loop() {
  int val = analogRead (joystick);

  if((val>500) && (val < 523)) // Cuando el joystick permanece en el centro, los valores van en
  torno a los 512 bits. Por encima girará en un sentido y por debajo en otro
  {
    // Utilizando la función digitalWrite(#PIN, ESTADO); se asigna la condición lógica "LOW" =
    0V o "HIGH" = VCC
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    digitalWrite(IN3, LOW);
    digitalWrite(IN4, LOW);
  }
  else
  {
```

```
while (val >= 523)
{
  int speed_=map(val,523,1023,5,500);// mapea los valores de velocidad en función de los
valores recibidos del joystick
  stepper.setSpeed(speed_); //velocidad del motor
  stepper.step(1);//giro del motor
  val =analogRead(joystick);
}
while (val<=500)
{
  int speed_=map(val,500,0,5,500);
  stepper.setSpeed(speed_);
  stepper.step(-1);
  val=analogRead(joystick);
}
}
```

Para controlar el motor paso a paso, se debe utilizar un módulo de control. En este caso, se ha empleado el ULN2003APG. El esquema de conexión utilizado será el siguiente:

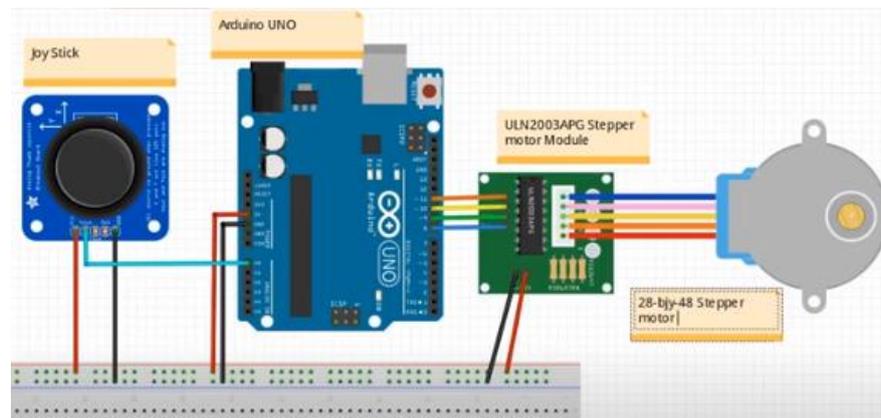


Figura 91: Esquema de conexión, automatismo de apertura con Arduino

Dado que solo se utiliza el eje Y del Joystick, bastará con conectar el cable que transmite su señal al Arduino y la fase y el neutro a la board.

En este caso, se han empleado las salidas 8, 9, 10 y 11 para enviar las señales a los devanados del motor paso a paso. Bastará con cablear estos pines al módulo de control del Stepper y este módulo al motor con el conector que llevan instalada por defecto.

Para finalizar, se conectarán la fase y el neutro del Arduino y el módulo de control del Stepper a la board.

## PRESUPUESTO

A continuación, se detallan los costes para la realización del proyecto. El precio de las piezas incluye el tiempo destinado a la impresión, el alquiler de los equipos y el material empleado.

La estimación de las horas se ha disgregado en horas destinadas tanto a la preparación del proyecto en la primera fase de búsqueda de información y definición de los sistemas que se iban a diseñar e implementar como al propio diseño de las piezas y componentes con el software utilizado, el SolidWorks 2019 premium.

Objeto	Unidades	Coste/ Ud. €	Coste total
Pieza A_1	1	14,62 €	14,62 €
Pieza A_2	1	5,87 €	5,87 €
Pieza B_1	2	5,45 €	10,90 €
Pieza B_2_RH	1	5,45 €	5,45 €
Pieza B_2_LH	1	5,45 €	5,45 €
Pieza C_RH	1	7,70 €	7,70 €
Pieza C_LH	1	7,70 €	7,70 €
Pieza D	2	6,26 €	12,52 €
Pieza E_RH	1	5,49 €	5,49 €
Pieza E_LH	1	5,49 €	5,49 €
Pieza F	2	11,14 €	22,28 €
Pieza G	2	7,81 €	15,62 €
Pieza Cinta_milimetrica	1	5,45 €	5,45 €
Pieza Soporte_cierre	1	5,45 €	5,45 €
Trinquete	1	5,45 €	5,45 €
Pieza Bulon_cierre	1	5,45 €	5,45 €
Recopilación de información (h)	15	35,00 €	525,00 €
Diseño de piezas (h)	40	35,00 €	1.400,00 €
Programación Arduino (h)	3	35,00 €	105,00 €
Filamento ABS para impresión 3D (kg)	1	25,00 €	25,00 €
Montaje de prototipo (h)	1	35,00 €	35,00 €
BaseSuelo	2	50,00 €	100,00 €
Pedal	2	45,00 €	90,00 €
PlacaSuelo	2	15,00 €	30,00 €
Muelle	8	1,50 €	12,00 €
BarraSueloExterior	2	20,00 €	40,00 €
BarraSueloInteriorIzq	1	20,00 €	20,00 €
BarraSueloInteriorDcha	1	20,00 €	20,00 €
SoportePared	1	45,00 €	45,00 €
ClipsAluminio	2	10,00 €	20,00 €
Barras superiores para apertura	3	15,00 €	45,00 €
SolidWorks 2019 (versión estudiante)	1	- €	- €
Arduino	1	- €	- €
Ultimaker Cura	1	- €	- €
<b>TOTAL (IVA incluido)</b>	<b>106</b>		<b>2.652,89 €</b>

Tabla 13: Presupuesto



## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Mediante el estudio y resolución de todos los problemas encontrados, se ha podido diseñar este chaleco que servirá como soporte para el brazo robótico previamente diseñado. Además, sobre él se podrá acoplar tanto el sistema de alimentación como el sistema de visión y control del brazo robótico.

Con el diseño de este chaleco-soporte, se ha dado un gran paso para poder concluir el proyecto que servirá para mejorar la vida de personas con discapacidades en las extremidades superiores. En concreto, para el chico valenciano para el que se está diseñando el primer prototipo completo.

Durante la realización del proyecto, han surgido diversos problemas y retos que se han ido resolviendo, empleando herramientas como el “brainstorming” y la simulación asistida por ordenador. La impresión del prototipo, aunque se haya tenido que realizar a escala, ha servido para comprobar la geometría y correcto funcionamiento de las piezas diseñadas en CAD, además de marcar algunos aspectos de diseño que se han mejorado posteriormente.



## BIBLIOGRAFÍA

Microgamma. Soportes y material para fotografía, medidas estándar de chalecos. Consulta en marzo de 2020. Disponible en web: <https://www.microgamma.es/blog/index.php/2017/12/chaleco-multibolsillos-fotografos-escoger/medidas-ch/>

Prometec. Tienda online de electrónica especializada en drones. Consulta en abril de 2020. Disponible en web: <https://www.prometec.net/elegir-bateria-lipo/>

3D Laboratorio. Página web para compra de impresoras y materiales de impresión, con especificaciones sobre los materiales y modelos 3D a imprimir. Consulta en julio de 2020. Disponible en web: <https://3dlaboratorio.es/plastic-abs.htm#:~:text=El%20pl%C3%A1stico%20ABS%20es%20un,en%20durabilidad%20mec%C3%A1nica%20y%20rigidez.>

SolidWorks. Ayuda sobre la aplicación de criterios de máxima tensión y cortadura. Consulta en Agosto de 2020. Disponible en web: [http://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/r\\_Maximum\\_von\\_Mises\\_Stress\\_Criterion.htm](http://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm)

Baterías Li-Po. Tipos de carga para baterías Li-Po y recomendaciones para llevarlas a cabo. Consulta en febrero de 2020. Disponible en web: <https://www.midronedecarreras.com/bateria-lipo/como-cargar-en-paralelo-baterias-lipo/#:~:text=Cargar%20las%20bater%C3%ADas%20en%20paralelo,una%20bater%C3%ADa%20con%20el%20cargador.&text=Estas%20placas%20te%20permiten%20conectar%20y%20cargar%20m%C3%BAltiples%20bater%C3%ADas%20LiPo%20simult%C3%A1neamente.>

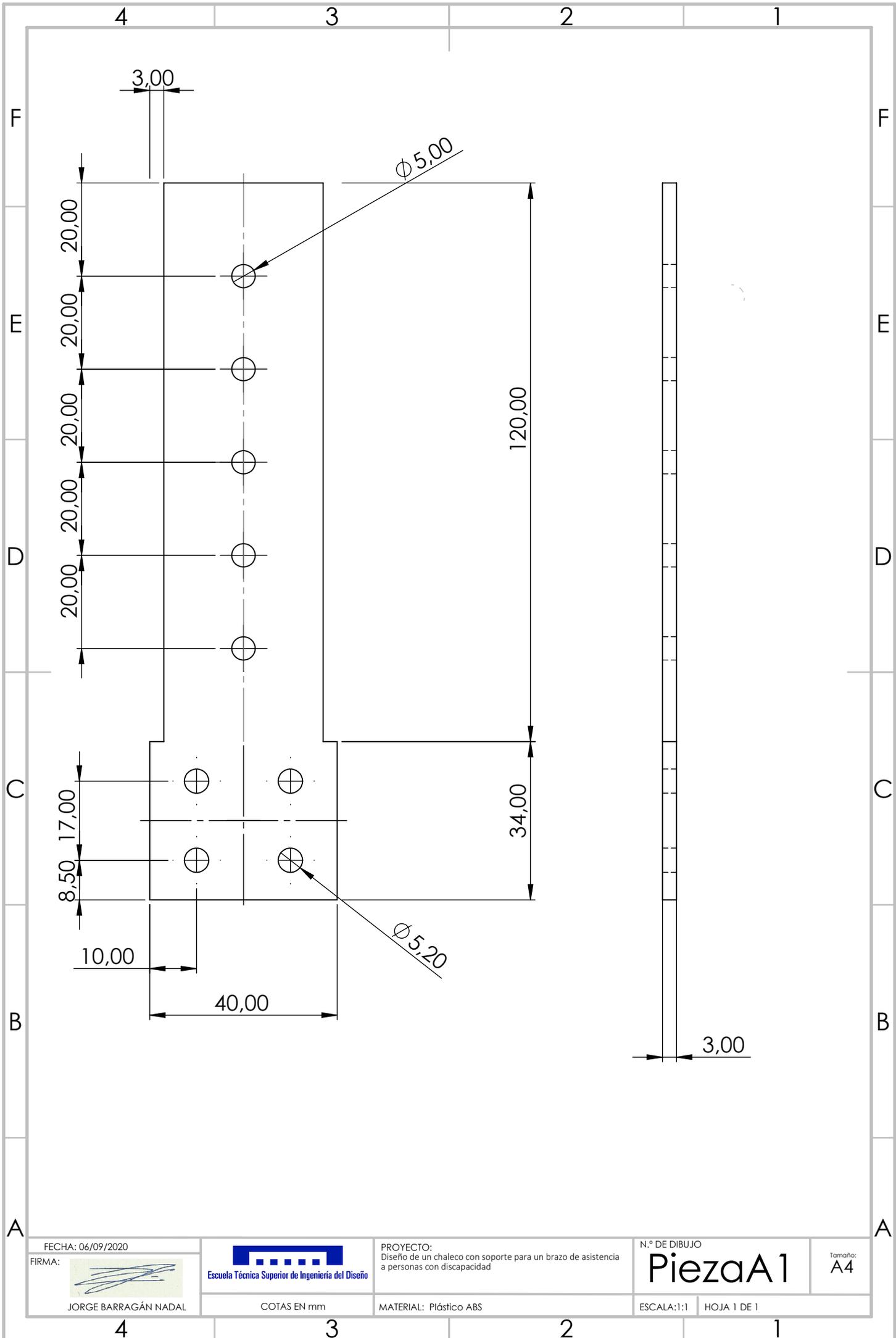
Comparativas baterías. Distintos tipos de batería existentes en el mercado y características de las mismas. Consulta en junio de 2020. Disponible en web: [http://robots-argentina.com.ar/Energia\\_baterias.htm](http://robots-argentina.com.ar/Energia_baterias.htm)

Raspberry. Módulos de cámara para Raspberry. Consulta en junio 2020: <https://www.robotshop.com/es/es>

Ultimaker Cura 4.7.0. Descarga del software empleado para convertir los archivos de las piezas de ".stl" a ".gcode", necesario para la impresión en 3D de las mismas. Consulta en agosto de 2020. Software gratuito disponible en web: <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>



## APÉNDICE: PLANOS



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

**PiezaA1**

Tamaño:  
**A4**

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:1

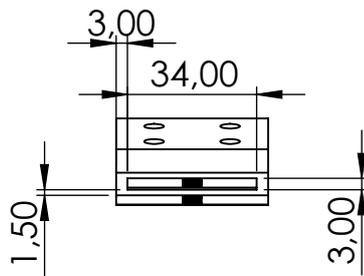
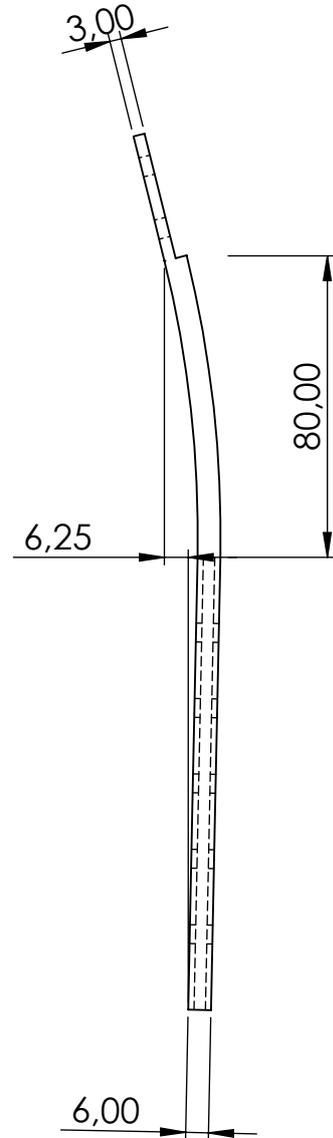
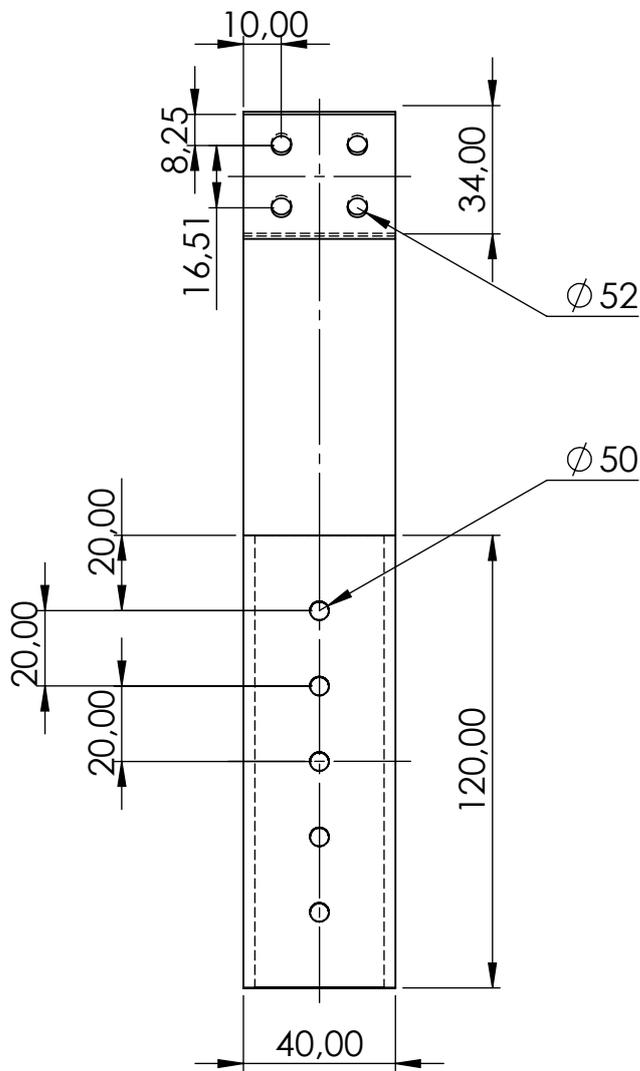
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

COTAS EN mm

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad

MATERIAL: Plástico ABS

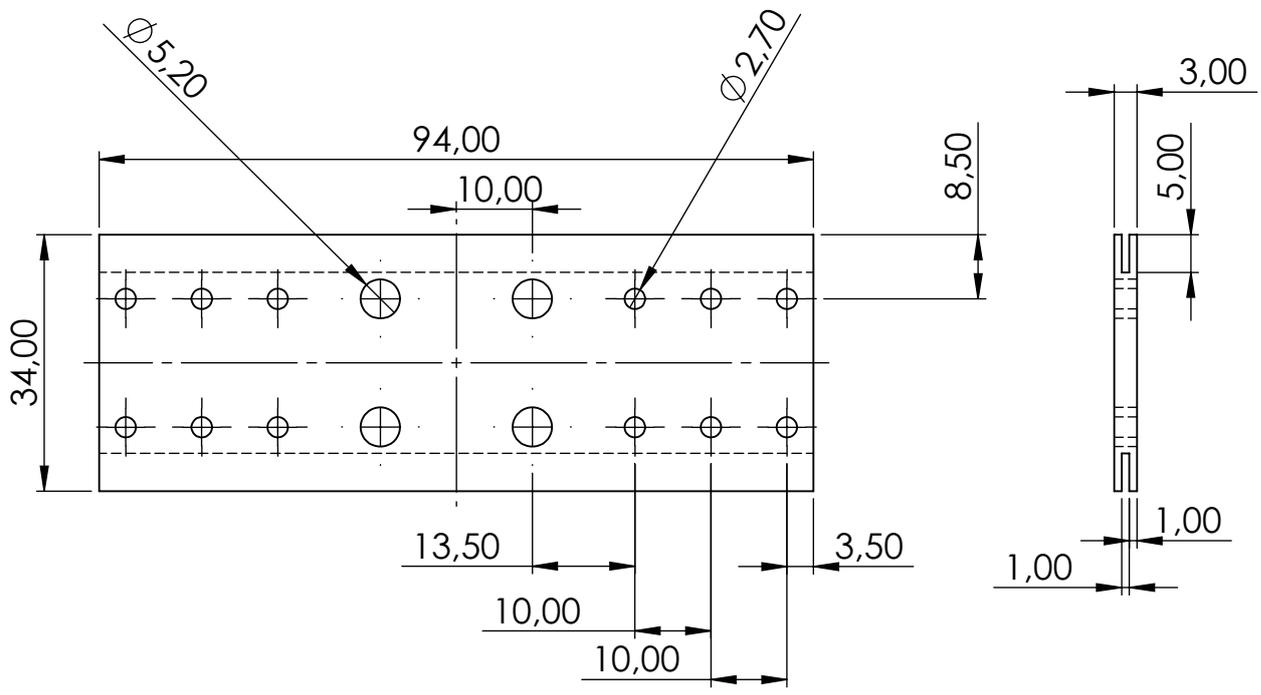
N.º DE DIBUJO

PiezaA\_2

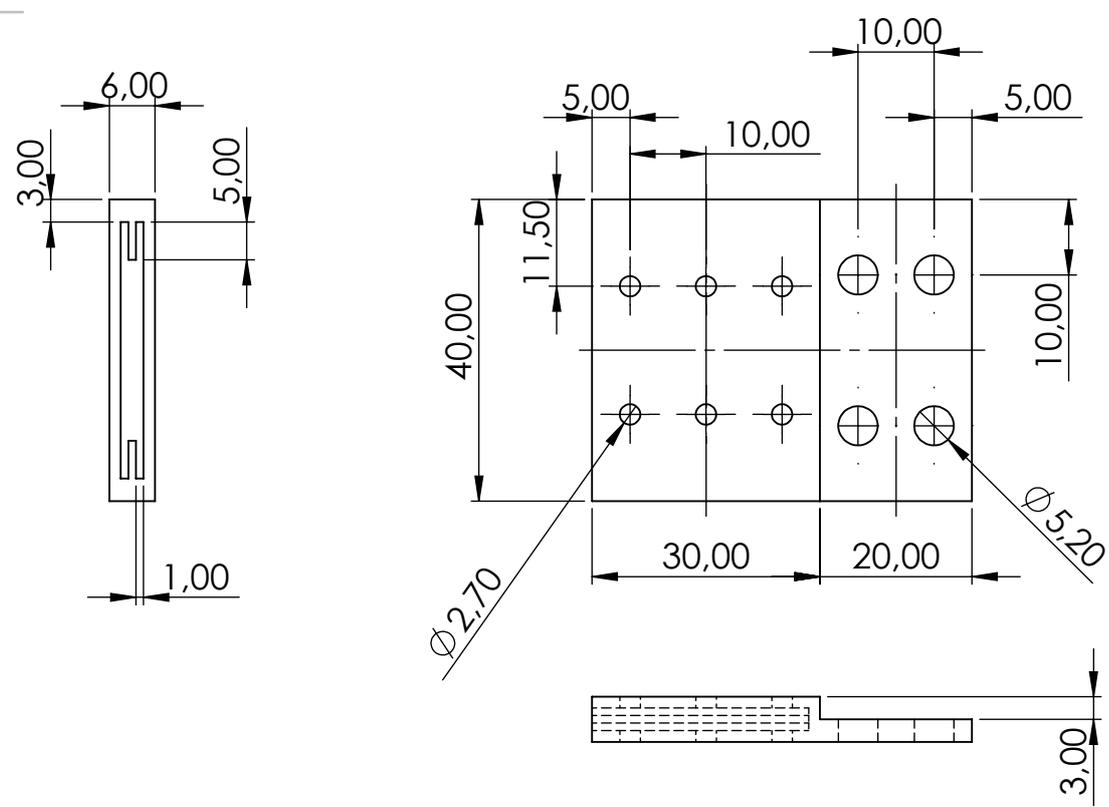
Tamaño:  
A4

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



Pieza del subconjunto B\_2



FECHA: 06/09/2020  
 FIRMA:   
 JORGE BARRAGÁN NADAL



PROYECTO:  
 Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad  
 MATERIAL: Plástico ABS

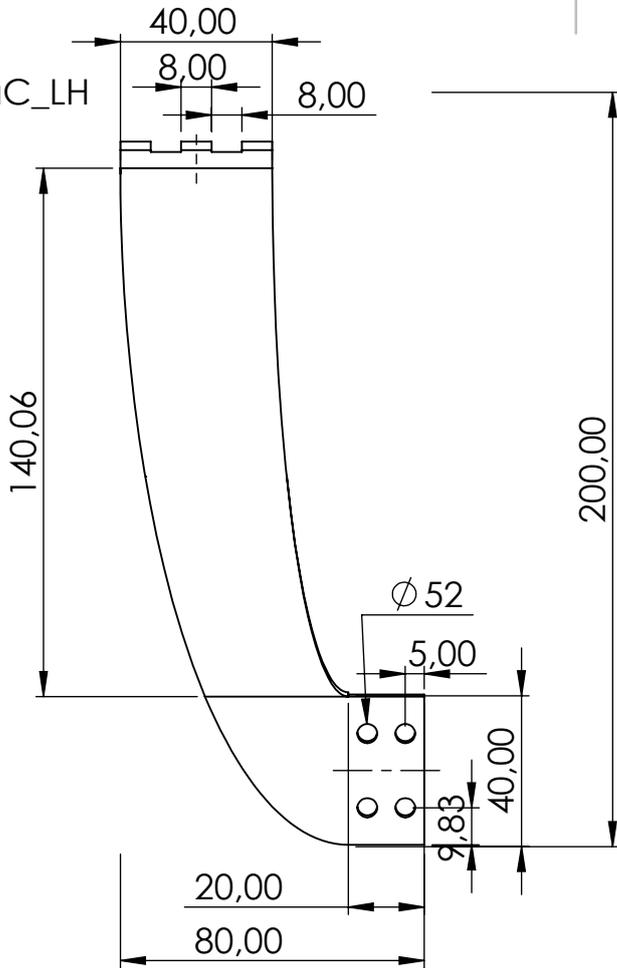
N.º DE DIBUJO  
**Pieza B**

Tamaño:  
 A4

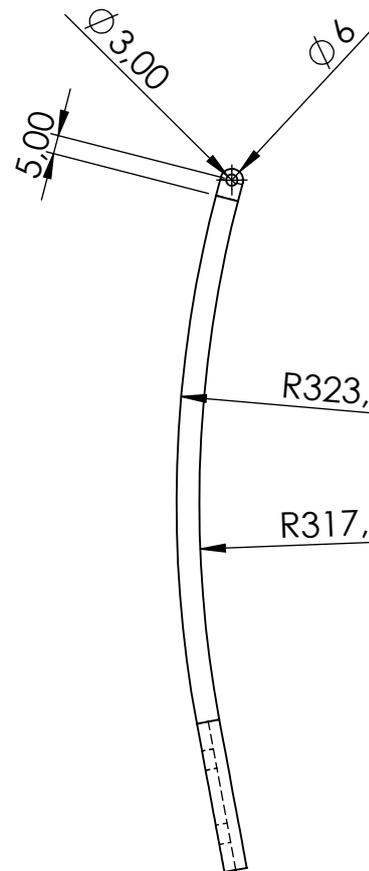
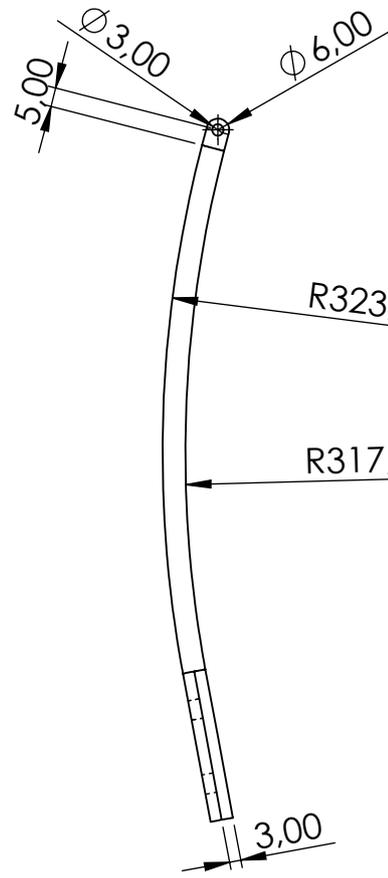
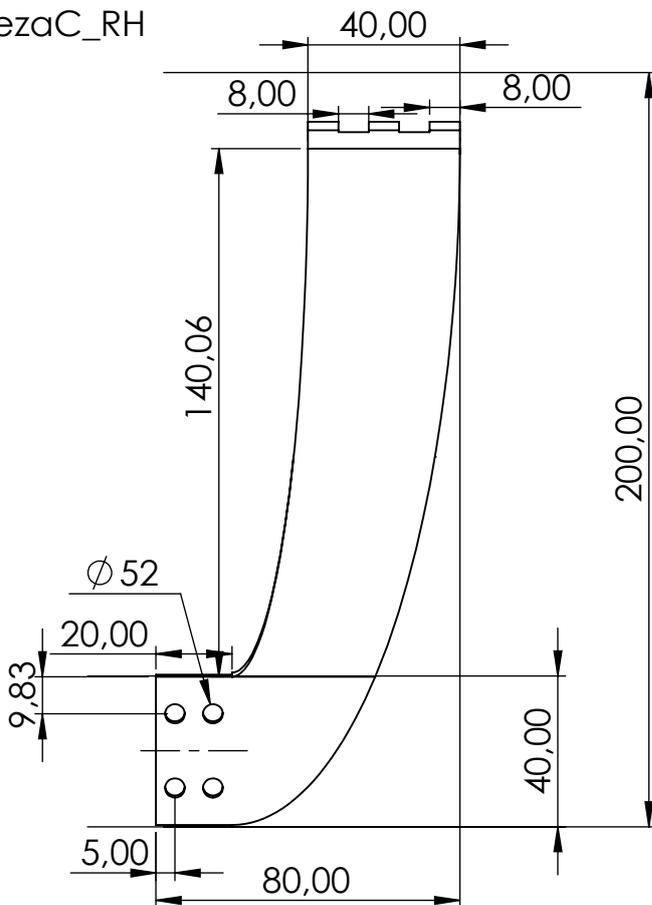
COTAS EN mm

ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 1

PiezaC\_LH



PiezaC\_RH



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



COTAS EN mm

PROYECTO: Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad

MATERIAL: Plástico ABS

N.º DE DIBUJO

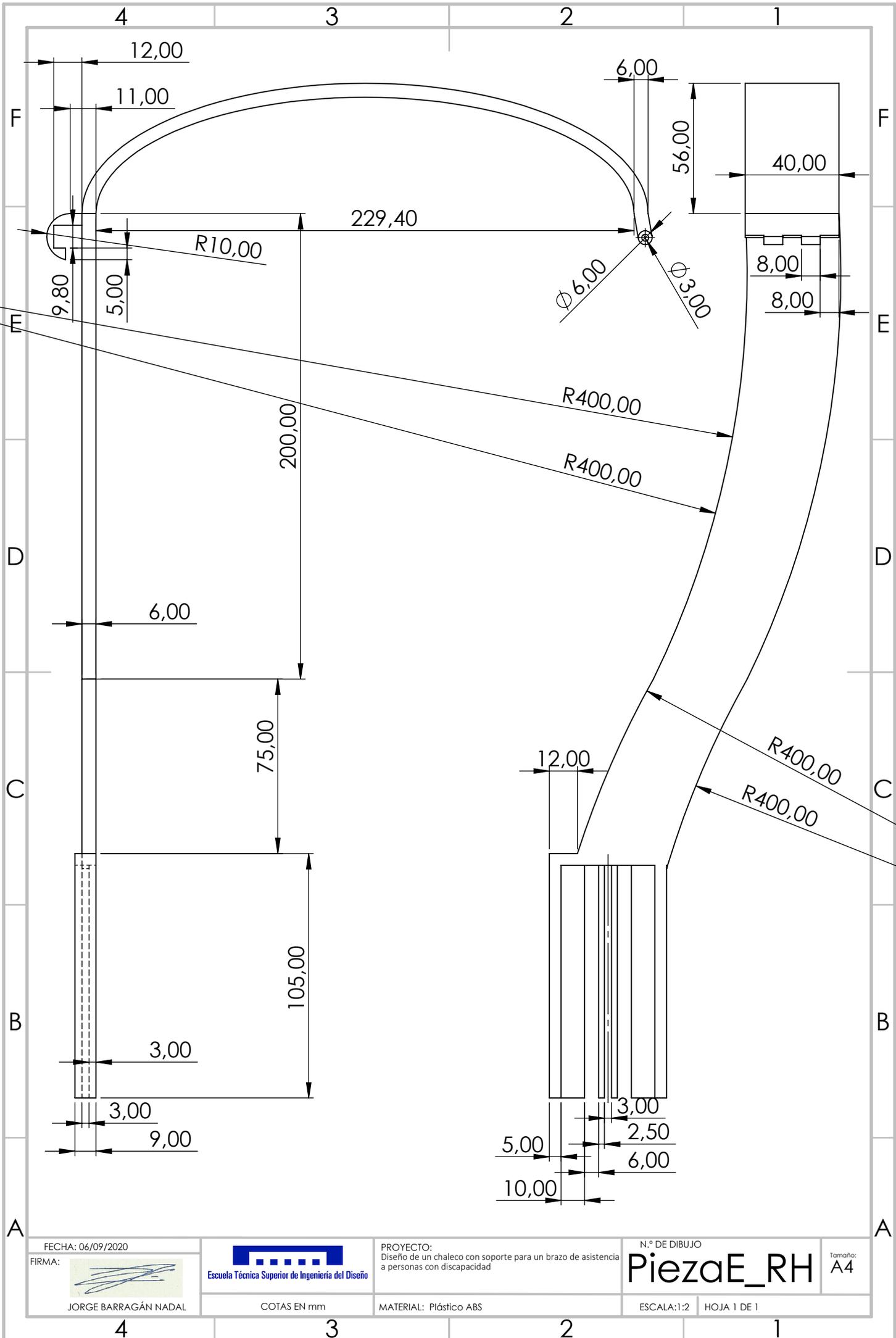
PiezaC

Tamaño: A4

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1





FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

*[Signature]*

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO: Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

PiezaE\_RH

Tamaño: A4

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:2

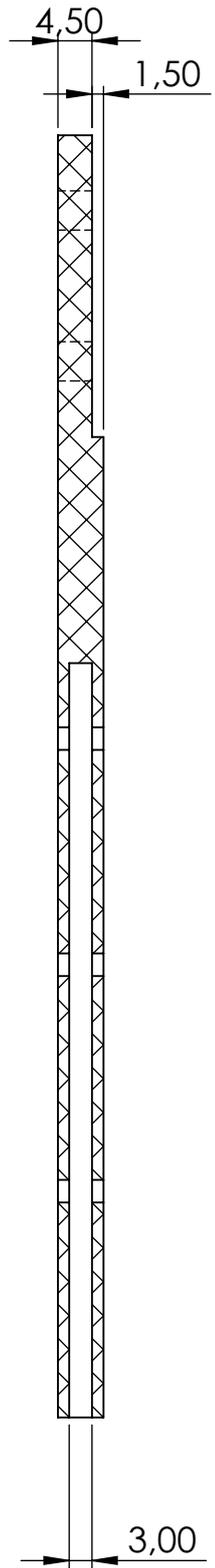
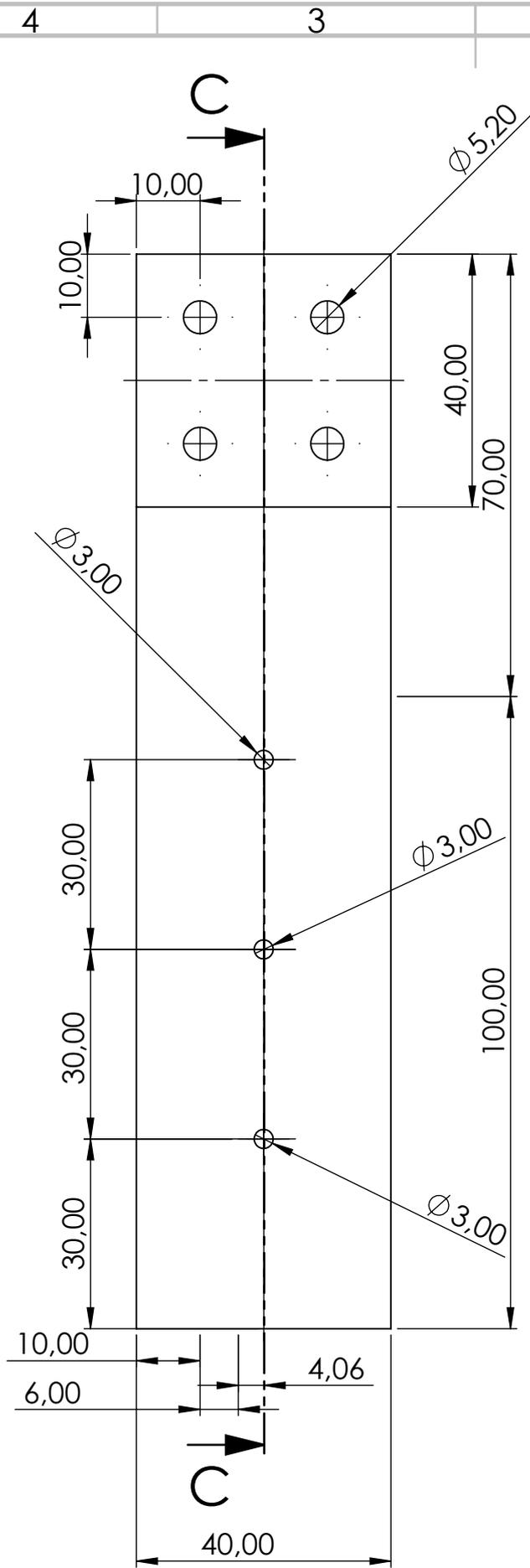
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



SECCIÓN C-C  
 ESCALA 1 : 1

FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
 Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

PiezaF

Tamaño:  
 A4

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:1

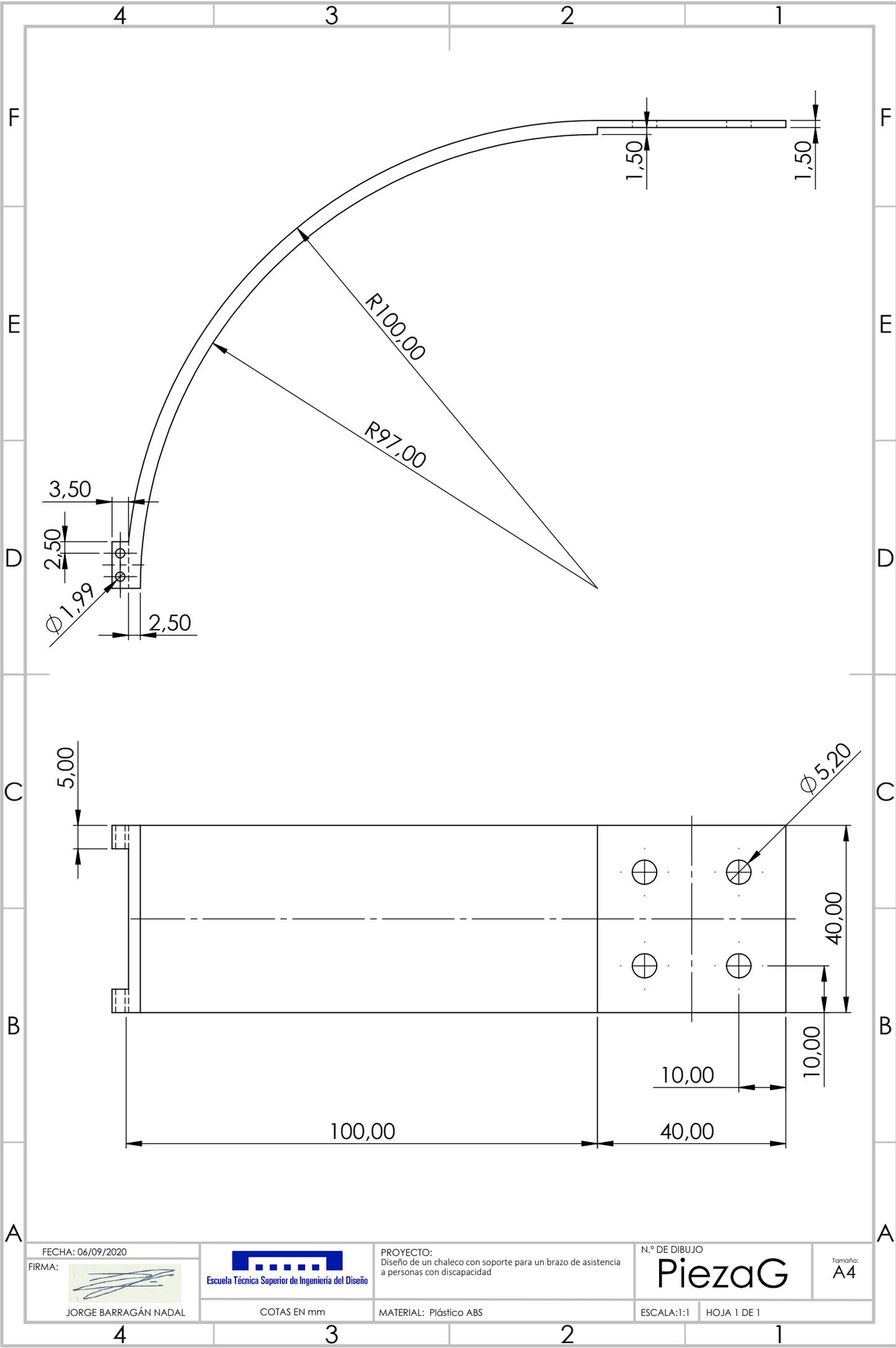
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

PiezaG

Tamaño:  
A4

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

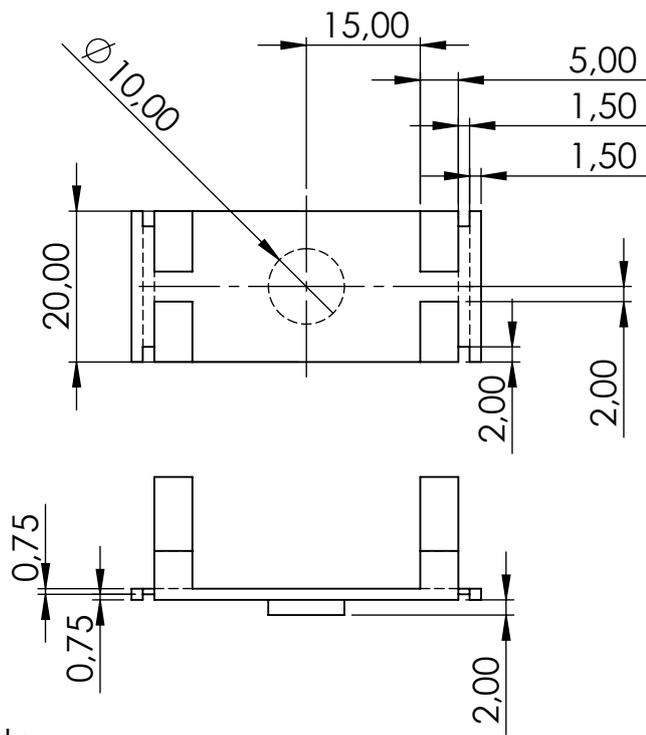
4

3

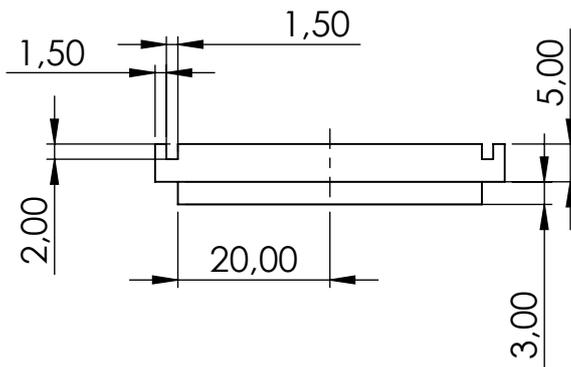
2

1

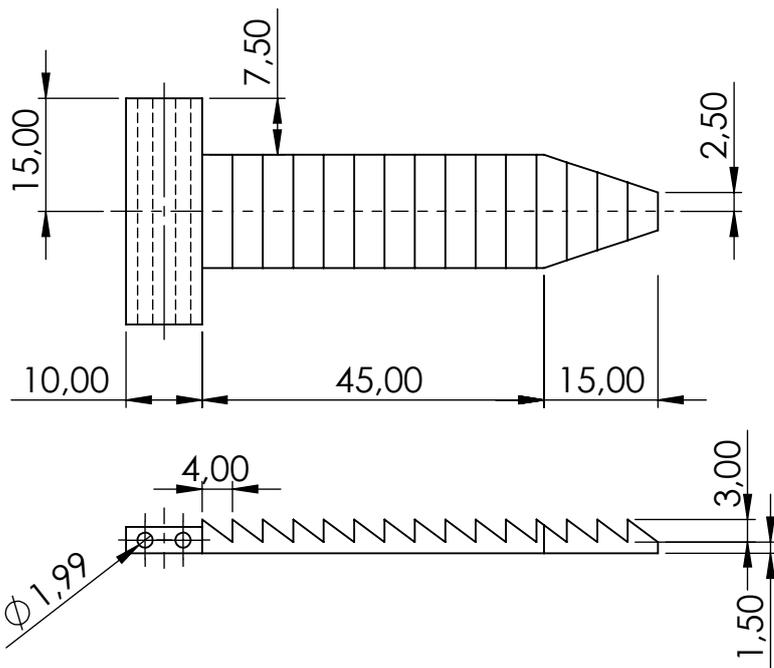
Cierre\_milimetrico



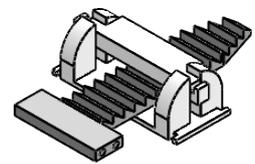
Trinquete



Cinta\_milimetrica



Conjunto Cierre



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



COTAS EN mm

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

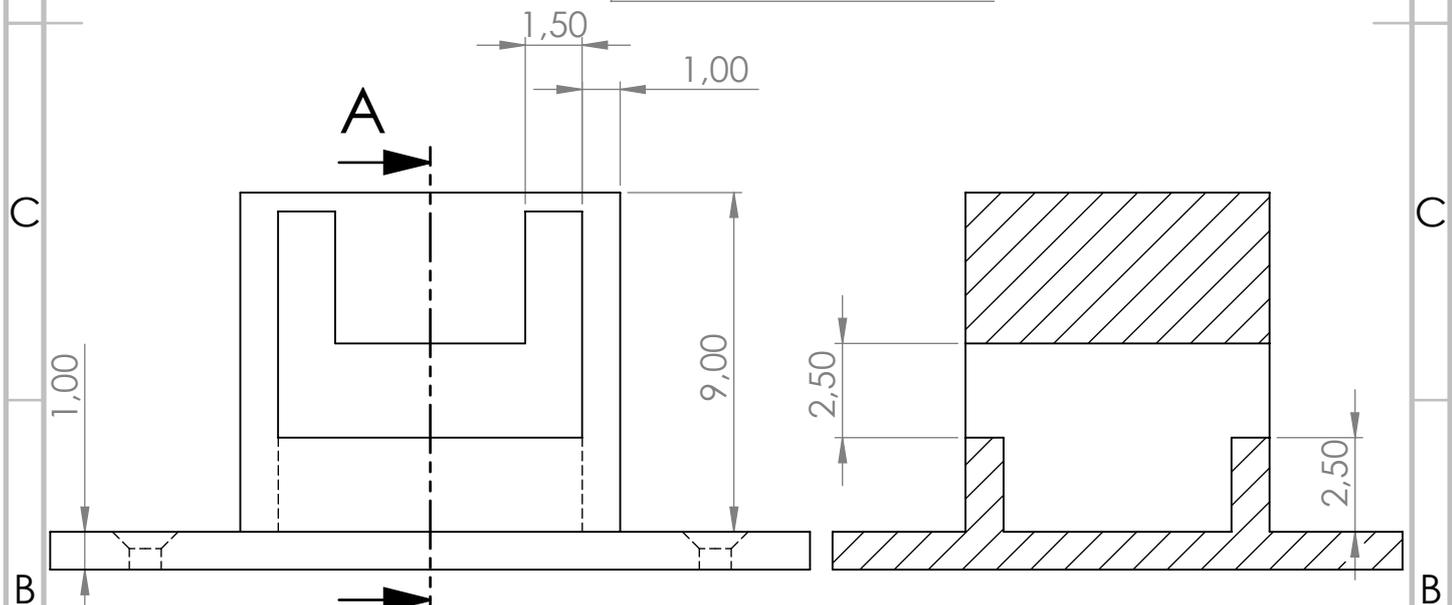
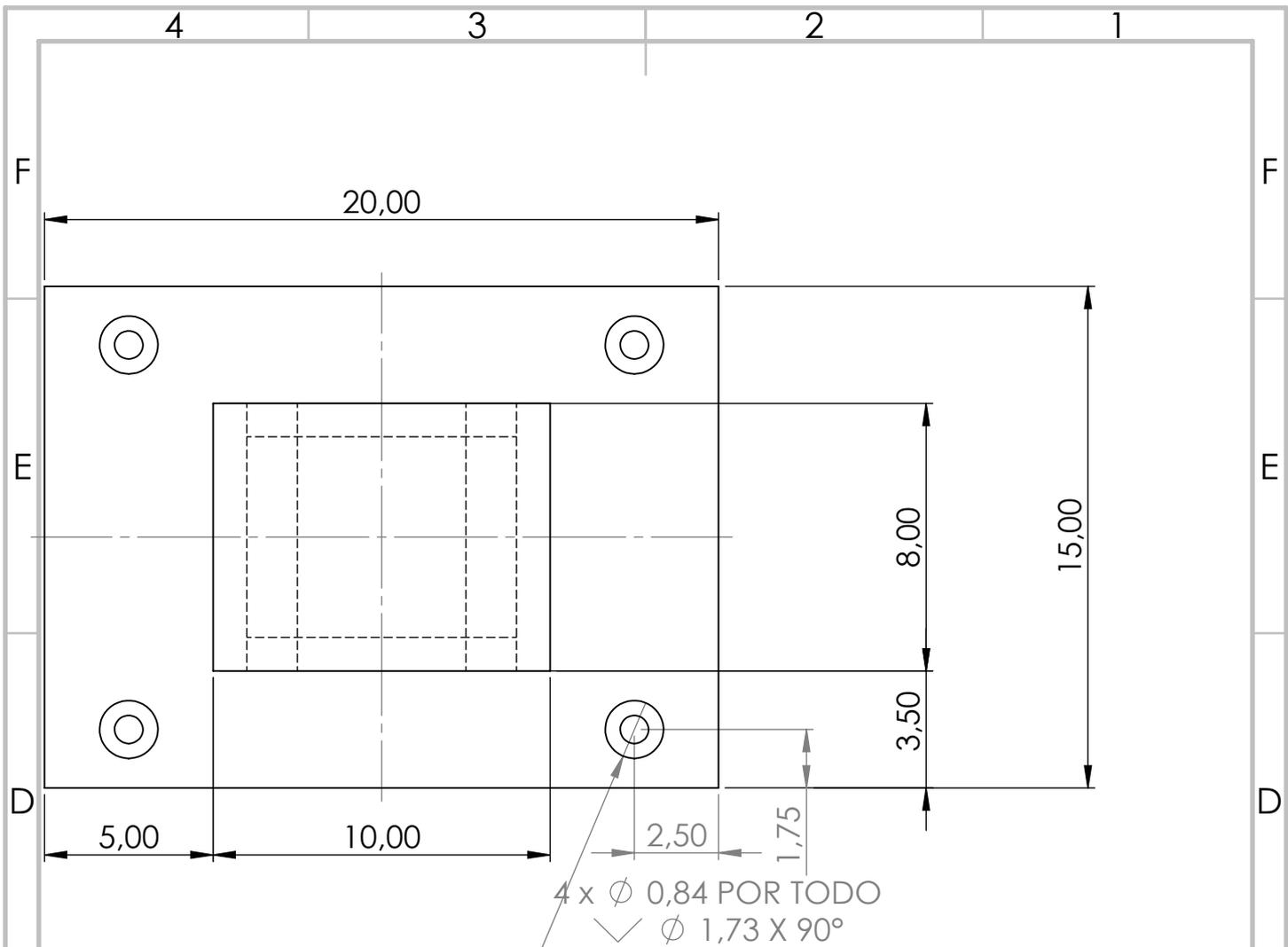
MATERIAL: Plástico ABS

N.º DE DIBUJO

Cierre

Tamaño:  
A4

ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 1



**SECCIÓN A-A**  
 ESCALA 1 : 2

FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
 Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
 a personas con discapacidad

MATERIAL: Plástico ABS

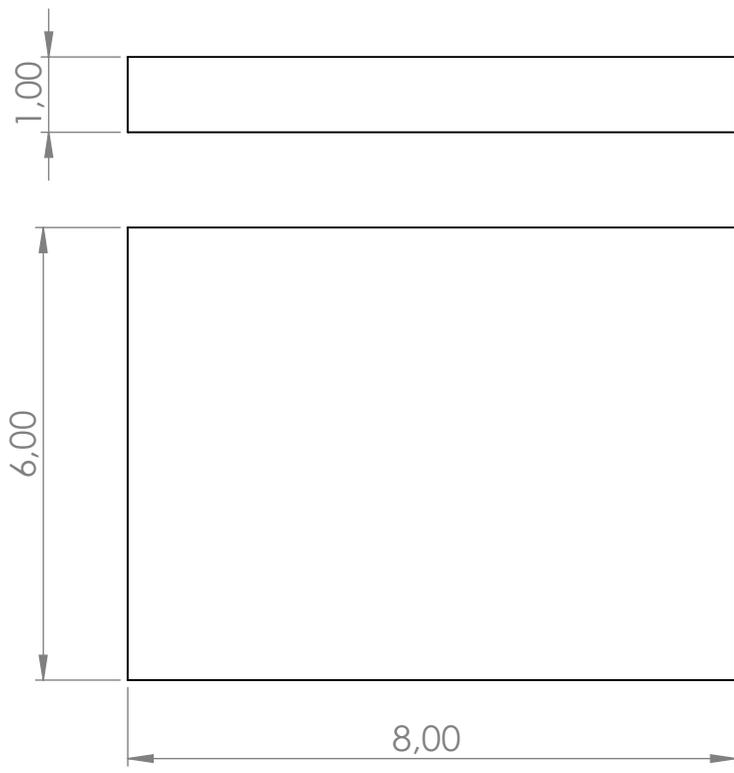
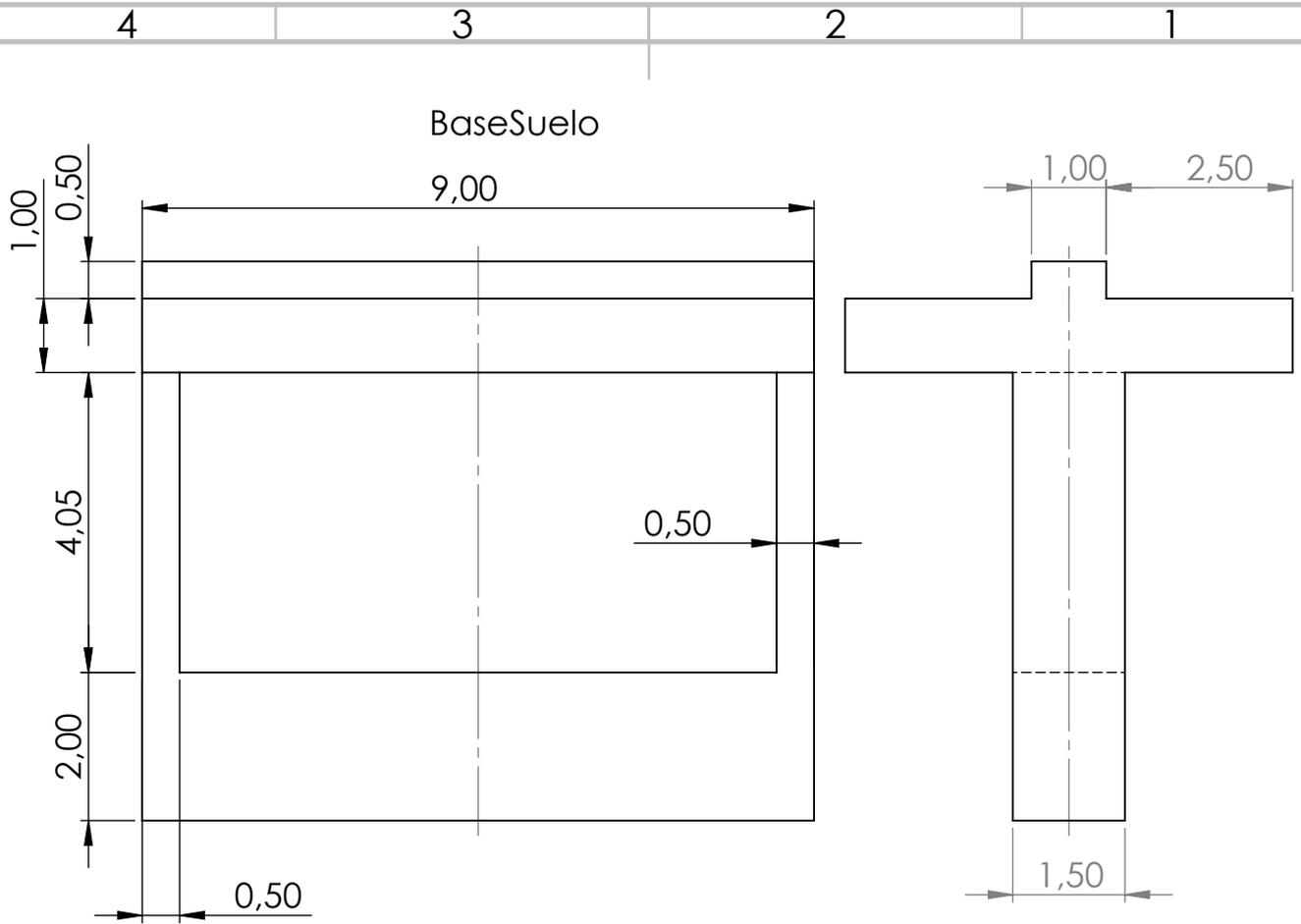
N.º DE DIBUJO

**BaseSuelo**

Tamaño:  
**A4**

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

Base + Placa

Tamaño:  
A4

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:1

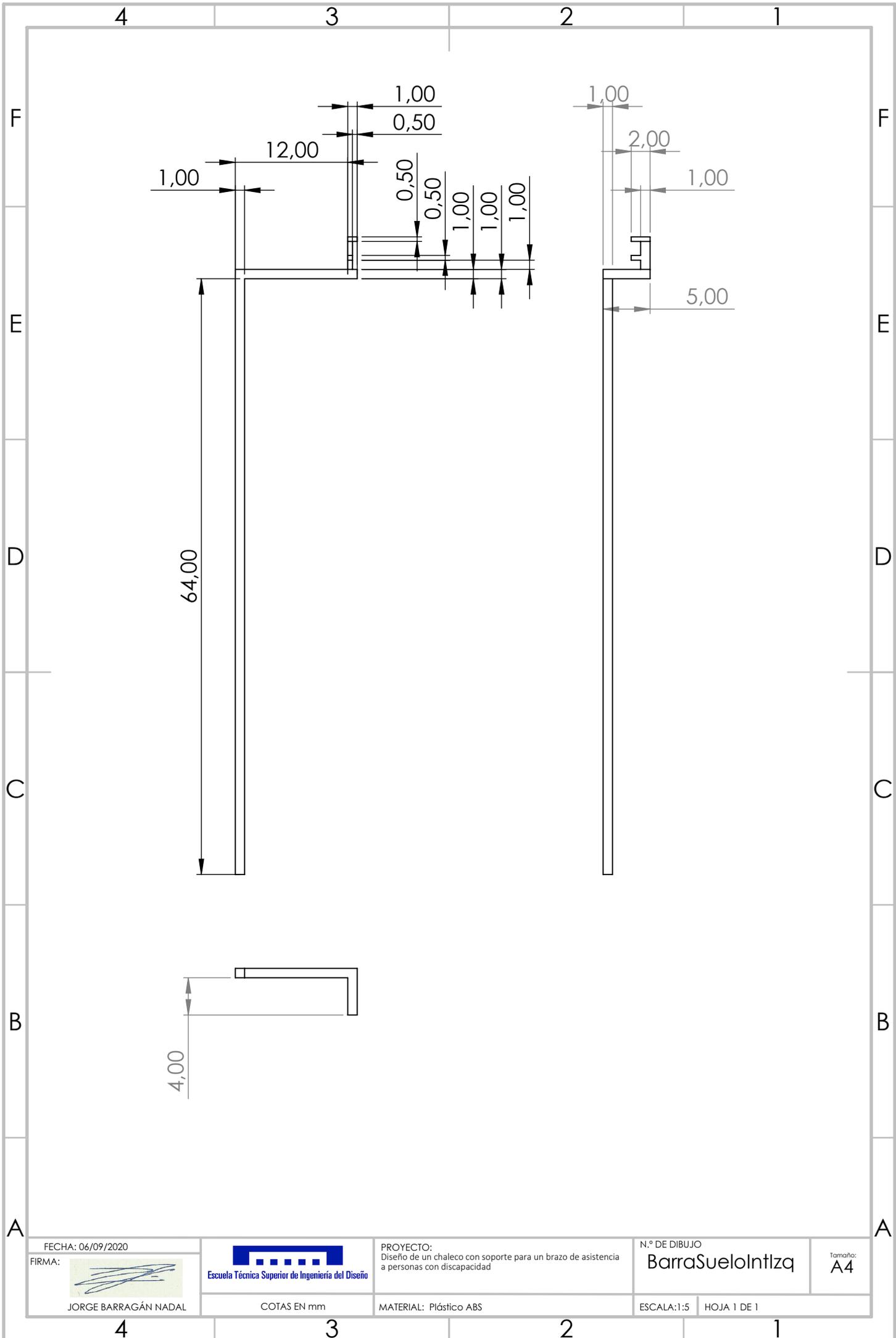
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

BarraSueloIntlzq

Tamaño:  
A4

COTAS EN mm

MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA: 1:5

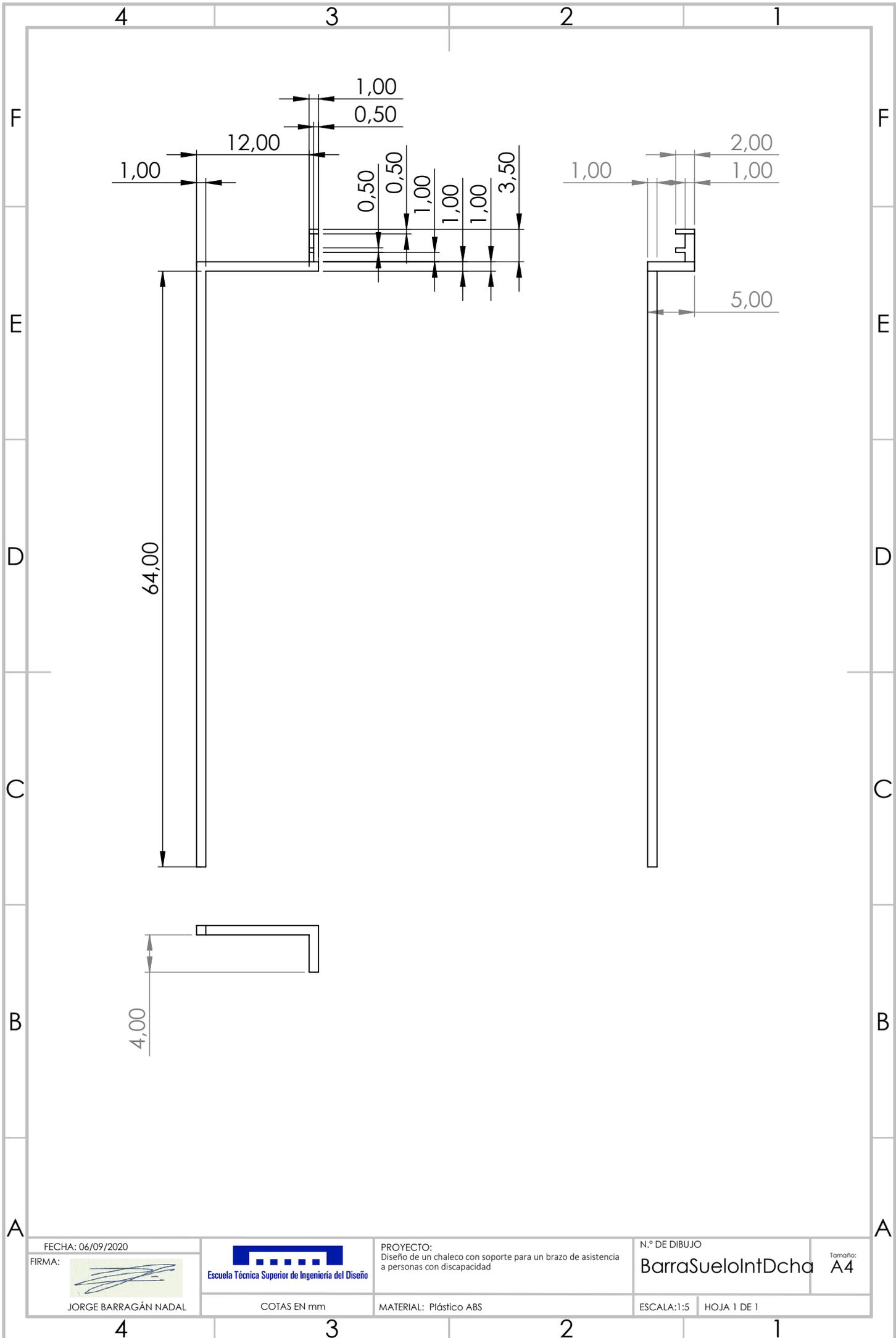
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

COTAS EN mm

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia a personas con discapacidad

MATERIAL: Plástico ABS

N.º DE DIBUJO

BarraSueloIntDcha

Tamaño:

A4

ESCALA:1:5

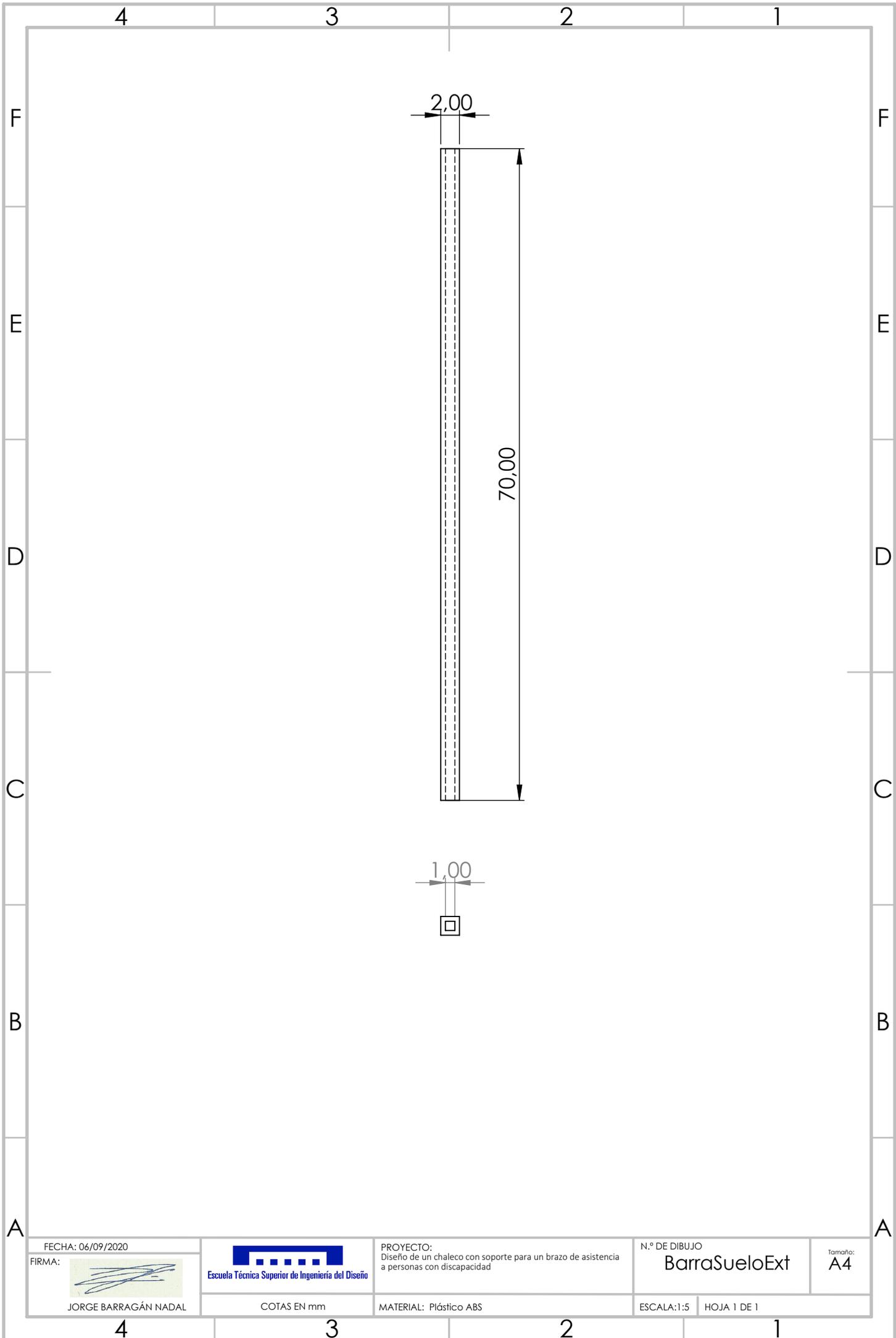
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



FECHA: 06/09/2020

FIRMA:

JORGE BARRAGÁN NADAL



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROYECTO:  
Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO

BarraSueloExt

Tamaño:  
A4

COTAS EN mm

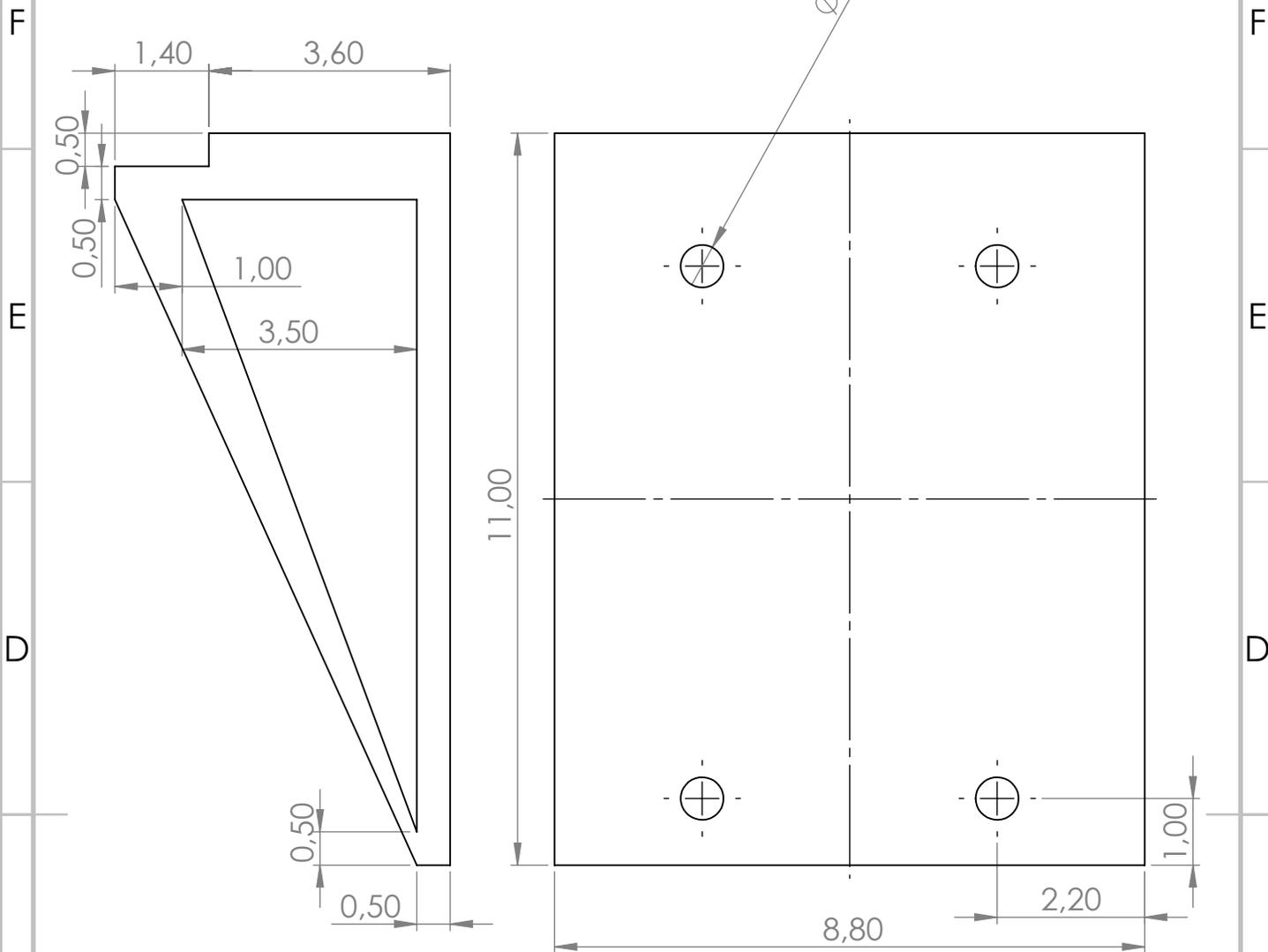
MATERIAL: Plástico ABS

ESCALA:1:5

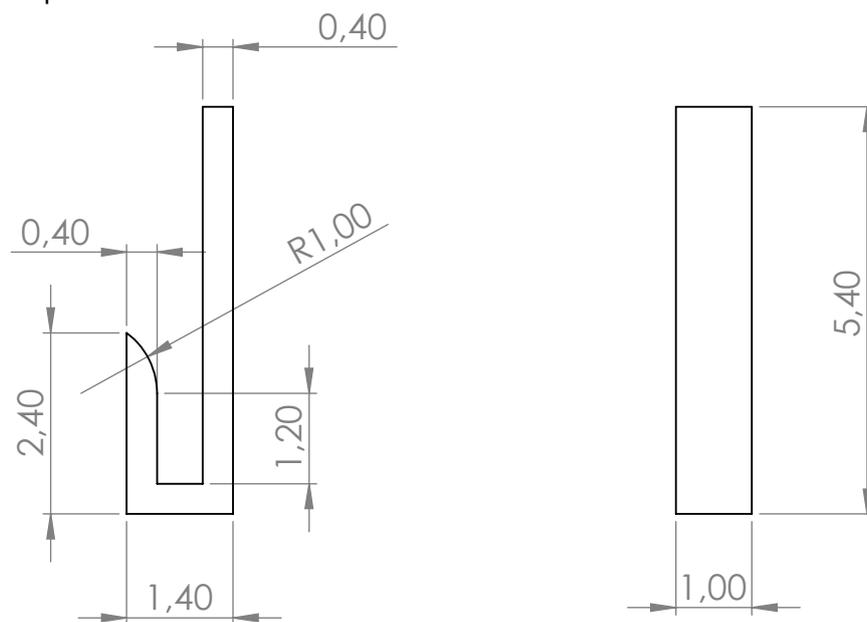
HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

### SoportePared



### Clip



A B C D E F

FECHA: 06/09/2020  
 FIRMA:   
 JORGE BARRAGÁN NADAL



PROYECTO:  
 Diseño de un chaleco con soporte para un brazo de asistencia  
 a personas con discapacidad

N.º DE DIBUJO  
**SoportePared**

Tamaño:  
**A4**

COTAS EN mm MATERIAL: Plástico ABS ESCALA: 1:2 HOJA 1 DE 1

4 3 2 1