

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA  
INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA BARRA  
FLEXIBLE PARA UN DISPOSITIVO DE  
REHABILITACIÓN DE TORSO.***

**Alumno/Alumna:** Terradillos, López, Ane

**Director/Directora (1):** Campa, Francisco

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** 29, 06, 2018

## ÍNDICE

RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
LABURPENA .....	4
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. CONTEXTO .....	9
3. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	11
4. BENEFICIOS DEL PROYECTO .....	13
4.1 Beneficios técnicos .....	13
4.2 Beneficios sociales .....	13
4.3 Beneficios económicos .....	14
5. ESTADO DEL ARTE .....	15
5.1 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA BLANDA .....	15
5.2 DISPOSITIVOS MÉDICOS PARA REHABILITACIÓN .....	17
6. REQUISITOS .....	20
7. ANÁLISIS DE RIESGOS .....	21
8. DISEÑO DE LA BARRA .....	24
8.1 Diseño en AutoCAD .....	24
9. METODOLOGÍA .....	26
9.1. DESCRIPCIÓN DE TAREAS .....	27
9.2. DIAGRAMA DE GANTT .....	30

9.3. CÁLCULOS .....	31
9.3.1. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ A FLEXIÓN .....	31
9.4 RESULTADOS .....	34
9.4.1 PROTOTIPO DE BARRA.....	34
9.4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	36
9.4.2. COMPARACIÓN CON EL MODELO.....	38
10. DESCARGO DE GASTOS.....	41
11. CONCLUSIONES.....	44
12. REFERENCIAS .....	45
ANEXO I: ENSAYOS .....	47
ANEXO II: PLANOS SOLIDWORKS.....	49

## RESUMEN

En este documento se presenta un proyecto que consiste en el diseño y la fabricación de un conjunto de cuatro barras flexibles para un sistema de rehabilitación del torso. Se utilizará para transmitir los esfuerzos necesarios para la rehabilitación del paciente desde un motor rotativo a un chaleco, que será el encargado de realizar los movimientos que se requieran. Para ello, se diseñará el conjunto en el programa SolidWorks, para su posterior fabricación mediante una impresora 3D. Se comprobará que las cuatro barras permanecen en todo momento paralelas y se realizará unos ensayos sometiendo al conjunto a una deformación de flexión. Más tarde, se comprobará el resultado de estos ensayos comparándolo un modelo matemático de MATLAB.

## ABSTRACT

This document presents a project based on the design and manufacture of a combination of four flexible bars for a chest rehabilitation mechanism. This device will be used to connect and transmit the necessary efforts from a rotating motor to a vest holding the patient which will be making the required movements to improve the rehabilitation process. In order to accomplish this, the parts that need to be manufactured will be designed in SolidWorks for its later 3D printing. Once the prototype is assembled, we will check whether the four bars remain parallel at all times and some tests will be made subjecting the combination of bars to a flexion deformation. Afterwards, the test results will be compared to a mathematical model in MATLAB.

## LABURPENA

Dokumentu honetan gorputz-enborrerako errehabilitazio sistema baterako lau malgu barren multzoen diseinu eta fabrikazioa aurkezten da. Hauek esfortzuak motor birakari batetik txaleko batera transmititzeko erabiliko dira. Txalekoak behar diren

mugimenduak egingo ditu. Hori lortzeko, fabrikatu behar diren piezak Solidworks-en diseinatuko dira gero 3D inprimatzaile batean fabrikatzeko ahal izateko.. Gero, barrak beti paraleloak mantentzen badira konprobatu egingo da eta barrak flexio deformazio batera ezartzen entsegu batzuk egingo dira. Ondoren, entsegu hauen emaitzak konprobatuko egingo dira MATLAB-ean modelo matematikoarekin konparatuz.

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Continuum robot .....	10
Figura 2. Agarrador blando .....	16
Figura 3. Robot inspirado en el movimiento de un pulpo .....	16
Figura 4. Andador multipaso .....	17
Figura 5. Soft-SixthFinger .....	17
Figura 6. Soft robotic glove .....	18
Figura 7. Dispositivo de rehabilitación del hombro .....	18
Figura 8. Soft Exosuits .....	19
Figura 9. Matriz de probabilidad e impacto .....	23
Figura 10. Forma soportes .....	24
Figura 11. Prototipo final .....	25
Figura 12. Listado de tareas con fechas de inicio y fin .....	30
Figura 13. Diagrama de Gantt del proyecto.....	30
Figura 14. Forma soportes acotada.....	31
Figura 16. Prototipo de la barra .....	34
Figura 17. Giro de la barra hacia la izquierda .....	35
Figura 18. Giro de la barra hacia la derecha.....	35
Figura 19. Mesa dinamométrica Kistler y sistema de adquisición de datos.....	36
Figura 20. Unión de la barra a la mesa Kistler .....	37
Figura 21. Resultados del modelo matemático.....	39
Figura 22. Barra enganchada a mesa Kistler .....	47
Figura 23. Montaje de todas las posiciones que alcanza la barra .....	48
Figura 24. Planos soporte inferior .....	49
Figura 25. Planos soporte superior .....	50
Figura 26. Planos pieza intermedia .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultado de ensayos experimentales .....	38
Tabla 2. Partida de horas internas.....	41
Tabla 3. Partida de las amortizaciones. ....	42
Tabla 4. Partida de los gastos de material .....	42
Tabla 5. Descargo total de gastos. ....	43

## 1. INTRODUCCIÓN

La robótica ha sido uno de los inventos más importantes del siglo XX. Supuso un gran avance en el sector industrial al poder automatizar y agilizar los procesos de montaje. Son muchos los beneficios que ésta ha aportado en distintos ámbitos de la sociedad, desde actividades de montaje, agricultura, construcción a ayudas a discapacitados en el ámbito de la sanidad.

A lo largo de los años el concepto de robot ha ido avanzando creando unos nuevos formatos de éstos capaces de realizar tareas que no están al alcance de las extremidades rígidas de los robots tradicionales, los llamados “soft” robots. También se ha investigado para que estos robots estén basados en estructuras y deformaciones continuas, “continuum robots”. Estos tienen una estructura diferente a los tradicionales con enlaces rígidos unidos por articulaciones con un número determinado de grados de libertad. Cuando el número de grados de libertad tiende a infinito se aproxima a un “continuum” robot.

Los robots rígidos presentan una serie de limitaciones importantes.

- Se mueven gracias a articulaciones y extremidades siguiendo una serie de instrucciones concretas debiendo saber dónde están sus extremidades en todo momento. Es decir, son muy precisos para áreas controladas pero no en espacios impredecibles. Por consiguiente, sus aplicaciones están limitadas.
- Los robots clásicos no pueden trabajar con elementos de propiedades cambiantes.
- Su uso alrededor de personas puede resultar peligroso.

Por ello, surge la idea de los softrobots en la investigación militar, por las limitaciones que representaban los robots rígidos en esta área. Se necesitaban robots que no debiesen saber dónde están sus extremidades en cada momento sino que reaccionen al entorno en el que se encuentran y que hiciesen frente a las limitaciones presentes en los robots

tradicionales.

Para llevar a cabo su diseño se basó en el hecho de que si un robot tiene que interactuar con el mundo real debe resolver los mismos problemas que los animales inspirándose, así, en el movimiento de los tentáculos de un pulpo, de las serpientes, etc.

La robótica blanda resulta ideal para trabajar con personas y es, por ello, que está teniendo un gran éxito en el ámbito de la sanidad como apoyo a personas con discapacidades físicas. Las técnicas tradicionales de fisioterapia conllevan la realización de ejercicios manuales y son, por esta razón, muy exigentes en cuanto al tiempo de dedicación de estos profesionales. Es por ello que durante los últimos años se ha comenzado la investigación respecto a un tipo distinto de rehabilitación llevada a cabo mediante dispositivos mecánicos.

Por lo tanto, la asistencia médica que estos proporcionan ofrece beneficios para los fisioterapeutas en tareas específicas y repetitivas ya que reducen así la carga física de éstos. Asimismo, otro servicio importante que ofrece es la recopilación de los datos cuantitativos de cada terapia para evaluar así los progresos de los pacientes y optimizar las sesiones de fisioterapia.

## 2. CONTEXTO

Este proyecto se ha realizado en el departamento de ingeniería mecánica en la Escuela de Ingeniería de Bilbao concretamente en el ámbito de diseño y fabricación de un producto. Se ha realizado asistiendo a un doctorando que realizaba su tesis doctoral sobre un dispositivo de rehabilitación para el torso.

Para ello se han diseñado unas barras flexibles, conjunto clasificado como un soft y continuum robot, que aportara a nuestro dispositivo de rehabilitación una estructura ligera, con baja inercia en el movimiento, con infinitos grados de libertad y una gran seguridad a la hora de trabajar alrededor de personas. Estas propiedades son las que hacen que el tipo de robot elegido sea el indicado y no uno rígido.

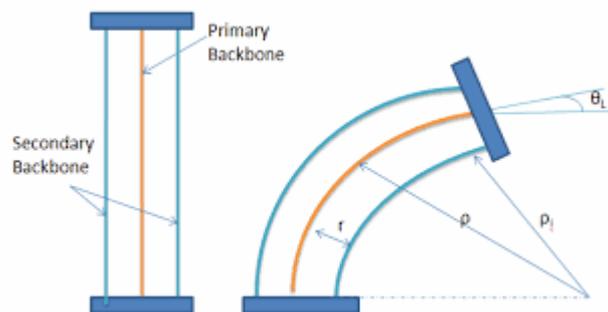


Figura 1. Continuum robot

Asimismo, el dominio de la salud en el ámbito de la ingeniería y más precisamente en el de la robótica tendrá una demanda increíble en los próximos años. Según expertos, la utilización de sistemas robóticos en terapias con enfermos que han sufrido algún daño neurológico aporta avances a su rehabilitación y la mejora notablemente ayudando a la recuperación de la movilidad. Es por ello, que aunque se ha avanzado en este ámbito con el diseño de robots blandos para extremidades como el brazo, las piernas, la mano, la muñeca, etc. se sigue investigando profundamente en el tema.

### 3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El principal objetivo de este trabajo es diseñar una barra flexible compuesta por varias barras en paralelo para transmitir esfuerzos desde un motor rotativo a un chaleco en un dispositivo de rehabilitación para el torso para pacientes afectados neurológicamente. El motivo de que se utilicen varias barras en paralelo es que se pretenden poder ajustar mediante diseño la rigidez global de la barra jugando con el número de barras en paralelo y su disposición, lo cual proporciona más posibilidades que si se utiliza una única barra, donde las únicas variables de diseño son la sección y el material. Además, se pretende que las barras permanezcan paralelas y trabajando a flexión predominantemente. El motor rotativo transmitirá unos esfuerzos predeterminados a través de este conjunto de barras al chaleco que moverá al paciente para así ayudarle a recrear los movimientos que había perdido.

Para la realización de este diseño se deberán llevar a cabo los siguientes objetivos intermedios:

- Diseño conceptual de la barra, donde se define su funcionamiento. Se define cuantas barras utilizaremos, como se dispondrán, qué tipo de uniones utilizaremos. En nuestro caso serán, cuatro barras en paralelo que irán unidas a un elemento terminal inferior en el que irán pegadas con cola, y solamente la barra central se unirá al elemento terminal superior, dejando al resto deslizar por sus respectivos agujeros. Asimismo, se define la utilización de unos elementos separadores que asegurarán el paralelismo de las barras, donde al igual que en el soporte superior, la central irá pegada y el resto deslizarán. Por último, se definirá mediante un boceto como serán los soportes y los elementos separadores.



- Diseño en CAD de la barra final a partir de un boceto previo, definiendo las dimensiones definitivas, el número de elementos que componen la barra y especificando el proceso de fabricación de cada componente de la barra así como el ensamblaje final.
- . Fabricación y montaje de un prototipo de barra, donde los elementos terminales de la barra y los separadores intermedios se fabricarán mediante impresión 3D, que se unirán a las barras en los contactos definidos en la tarea de diseño conceptual de la barra mediante pegado con cola. El material utilizado para la impresión es en este caso ABS+.
- Realización de ensayos de validación de la barra diseñada con el objetivo de comprobar su correcto funcionamiento tratando de detectar posibles imperfecciones o aspectos a mejorar como puede ser la existencia de rozamiento excesivo en determinados contactos, problemas de recuperación de la forma inicial cuando se libera la carga aplicada en el extremo de la barra, etc. Para ello, se aplicarán una serie de cargas en el extremo con la barra en voladizo en posición vertical y se medirán los esfuerzos en el apoyo mediante una mesa dinamométrica comparando así los resultados con los de un modelo desarrollado por un doctorando del departamento de ingeniería mecánica.

Se considerará que el objetivo se ha logrado cuando el prototipo se someta a pruebas de validación comprobando que el conjunto se mueve manteniendo el paralelismo de todas sus barras, cuando se realicen ensayos sometiendo al conjunto a flexión y se hayan comprobado los resultados de estas pruebas con el modelo matemático creado en MATLAB.

## 4. BENEFICIOS DEL PROYECTO

Los beneficios del trabajo los podemos encuadrar en 3 categorías: técnicos, sociales y económicos.

### 4.1 Beneficios técnicos

Los beneficios técnicos de este trabajo se basan en la creación de una barra suficientemente rígida para poder transmitir los esfuerzos que se quieren y a la vez flexible para generar el movimiento necesario. Para que esto se pueda llevar a cabo una solución es realizar un montaje de cuatro barras en paralelo. Así, aumentaríamos el momento de inercia segundo o de área, el cual cuantifica la resistencia de una sección a girar como consecuencia de la deformación de un sólido. Por lo tanto, se aumentaría así la rigidez a flexión sin renunciar a las ventajas que aporta la robótica blanda.

### 4.2. Beneficios sociales

El beneficio social de este trabajo está ligado al ámbito de la salud. Cuando una persona ha sufrido algún tipo de daño neurológico los tratamientos de rehabilitación son la principal manera de reducir el deterioro y discapacidad de estas personas. Los mejores resultados se obtienen cuando se le somete al paciente a un programa intensivo de tratamiento de rehabilitación suministrados de forma precoz y prologada en el tiempo. Esto se verá realmente facilitado para los fisioterapeutas si cuentan con dispositivos robóticos de rehabilitación que faciliten y complementen su trabajo.

### 4.3. Beneficios económicos

El beneficio económico de este proyecto está relacionado de forma indirecta con el ahorro de los gastos de asistencia. Es decir, supone un ahorro en el tiempo que deben dedicar los fisioterapeutas a la rehabilitación y por tanto es un ahorro en tiempo de asistencia que se traduce en un ahorro económico.

## 5. ESTADO DEL ARTE.

En este apartado se va a realizar una introducción a la robótica en general y luego se centrará en la robótica blanda ya que es el tipo utilizado para este proyecto. A continuación, se centrará en los dispositivos médicos de rehabilitación que utilizan este tipo de robótica.

### 5.1 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA BLANDA.

La robótica es la técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.

Estos tuvieron un rápido auge y se utilizaban materiales rígidos como el metal para fabricarlos. Se modelizaban como elementos rígidos unidos mediante articulaciones. El siglo XXI comenzó con esa misma idea de robots rígidos pero esto fue cambiando debido a las limitaciones que estos presentaban ya que no podían recrear ciertos movimientos naturales. Por ello, los ingenieros se inspiraron en la naturaleza y en el movimiento de ciertos animales para la creación de los soft robots.

La utilización de robots rígidos se limita a la realización de una única tarea por su falta de adaptabilidad y debido a su rigidez suponen un peligro en presencia del ser humano. De ahí la tendencia en algunas fábricas a tener espacios de trabajo compuestos únicamente por humanos y otros compuestos únicamente por robots.

Los soft robots eliminan esta separación y hacen que el contacto ser humano robot sea posible sin ningún tipo de peligro. Están formados por plásticos, polímeros e incluso tejidos. Gracias a esto tienen una estructura continuamente deformable que emula el movimiento de sistemas biológicos y pueden adaptarse a infinitas situaciones

imprevistas presentando una gran agilidad.

En los últimos años se han diseñado una gran variedad de softrobots:

1. En la figura 2 se puede ver un agarrador blando que puede agarrar un amplio rango de objetos gracias al control de la presión de vacío.



Figura 2. Agarrador blando

2. En la figura 3 se puede ver un robot basado en la estructura muscular de un pulpo



Figura 3. Robot inspirado en el movimiento de un pulpo

3. En la figura 4 se puede observar un andador multipaso potenciado por aire comprimido



Figura 4. Andador multipaso

## 5.2 DISPOSITIVOS MÉDICOS PARA REHABILITACIÓN

Los soft robots ofrecen la principal ventaja que son aptos para trabajar con personas. Es por ello que en las últimas décadas han tenido un gran impacto en el ámbito de la salud, creándose numerosos dispositivos de rehabilitación para extremidades.

Se han creado muchos dispositivos para la rehabilitación del brazo como, por ejemplo, el Soft-SixthFinger. Este robot ayuda a enfrentar la parálisis de la mano y el brazo en pacientes afectados neurológicamente y ayuda a recuperar la movilidad y la capacidad de agarrar objetos con la mano [Hussain et al., 2017].

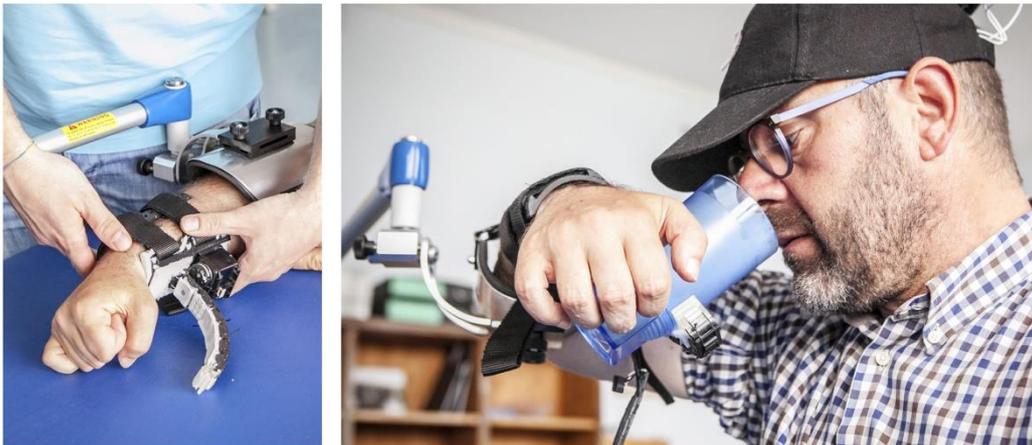


Figura 5. Soft-SixthFinger

En la universidad de Harvard, el Wyss Institute ha desarrollado un guante robótico blando (soft robotic glove) para ayudar a pacientes que han sufrido una pérdida del control motriz de la mano. La filosofía de este nuevo soft robot es que ya no solo se necesita una tecnología que se limite a cumplir una función sino que se centra en elementos sociales y psicológicos del diseño para permitir una adaptación mayor del usuario y aumentar la comodidad en su utilización.



Figura 6. Soft robotic glove

Igualmente, el Wiss Institute ha desarrollado dispositivos para el hombro, objetivo aún más desafiante debido a la complejidad del movimiento del hombro.



Figura 7. Dispositivo de rehabilitación del hombro

También se ha investigado mucho en la rehabilitación del tronco inferior basándose en el sistema motriz. Un ejemplo de ello son los Soft Exosuits. Este se utiliza para aumentar la resistencia, la fuerza y el equilibrio del paciente. Antes para este tipo de funciones se utilizaban robots rígidos pero estos tenían una limitación importante ya que no dejaban al usuario realizar movimientos totalmente naturales causándoles mucha fatiga. Con los Exosuits se ha conseguido un mejor dispositivo que mejora de manera notable la funcionalidad de la parte inferior del cuerpo.

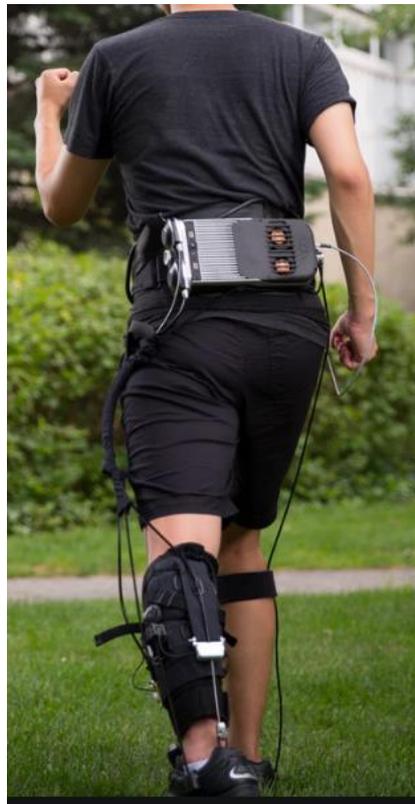


Figura 8. Soft Exosuits

## 6. REQUISITOS.

Para diseñar esta barra compuesta por distintos elementos funcionales se tienen que dar los siguientes requisitos funcionales:

- La barra estará empotrada en un extremo y articulada en otro, trabajando fundamentalmente a flexión
- Se podrá modificar la rigidez de esta mediante el diseño, jugando con el número de barras en paralelo que la conforman, con la sección de las barras, los materiales y la longitud de la barra. Asimismo, influirá también en la rigidez la posición de las distintas barras con respecto al eje de la barra compuesta.
- Las barras que conforman la barra compuesta deberán permanecer siempre paralelas entre sí
- La barra deberá ser capaz de recuperar su forma inicial una vez la carga en el extremo haya cesado.
- El rango de desplazamientos que se quiere obtener es  $\pm 45^\circ$  de inclinación

## 7. ANÁLISIS DE RIESGOS.

En todo proyecto pueden darse riesgos que ralenticen o provoquen un mal desarrollo de éste. Por ello, se analizarán los riesgos que podrían darse en este proyecto utilizando la matriz probabilidad-impacto. Esta es una herramienta que realiza un análisis de los riesgos de forma muy visual permitiéndolo establecer prioridades en cuanto a que riesgos son más importantes de tratar y cuales menos. Así, se podrán establecer medidas para intentar reducir la repercusión de estos riesgos. Para establecer el orden de prioridad se estudia la probabilidad de que ocurran y las repercusiones que podrían tener en caso de que ocurrieran.

En primer lugar se verán los riesgos que se presentan en este proyecto que en este caso los principales riesgos son 4:

### 1. Fallos en la maquinaria

Durante el proceso de realización del proyecto se pueden dar fallos en la maquinaria utilizada, es decir, en la impresora 3D. Si esto llegase a suceder se produciría una parada del proyecto atrasándose la construcción del prototipo final. Es cierto que la gravedad de este fallo no sería muy alta ya que solo se trata de una etapa de verificación de resultados.

Asimismo, su prevención es sencilla y se puede realizar verificando el buen funcionamiento de la máquina días antes de cuando estaba programada la impresión. De esta manera, de existir algún tipo de fallo existiría tiempo suficiente para subsanarlo.

### 2. El movimiento que se quiera realizar no sea posible

Puede suceder que el robot no pueda alcanzar la posición deseada. Es decir a la hora de plantear la resolución del problema cinemático inverso sea imposible dar unos parámetros al robot para que alcance esa posición dada.

### 3. Necesidad de tareas adicionales

Debido al amplio margen de tolerancia del diámetro de las barras es posible que los agujeros de los soportes sean demasiado pequeños y que se tenga que realizar una tarea adicional de taladrado. O si, por lo contrario, estos son demasiado grandes se tenga que hacer uso de unos adaptadores.

### 4. Mal deslizamiento de las barras por los agujeros.

A la hora de deslizar por los agujeros la barra tiene el riesgo de quedar enganchada y perder el paralelismo de estas. Esto provocaría la mala transmisión de los movimientos deseados.

La matriz de probabilidad-impacto como se puede ver cuenta con un eje vertical donde se establece la probabilidad de que estos riesgos ocurran en una escala del 0-1, siendo 0 raramente y 1 casi seguro. Asimismo, cuenta con un eje horizontal que cuantifica el impacto que este puede tener en una escala de 0 a 1 siendo 0 un impacto muy bajo y 1 muy alto.

Por lo tanto, se comenzará estudiando el primer riesgo, fallos en la maquinaria, la probabilidad es 0.3, esto es, difícilmente y el impacto es 0.1, bajo. Acudiendo a la matriz vemos que el riesgo es 0.03 y que se encuentra en la zona verde, por consiguiente, el riesgo es mínimo.

Para el segundo riesgo, que el movimiento que se quiere realizar no sea posible, la probabilidad es 0.5, es decir, posible mientras que el impacto es 0.2, moderado. Como se puede ver en la matriz el riesgo en este caso es 0.1, como está en la zona amarilla significa que se trata de un riesgo moderado y, por tanto, no tendría gran influencia en el desarrollo del proyecto en el caso de que sucediese.

En el tercer riesgo, necesidad de tareas adicionales, la probabilidad es 0.7, probable y el impacto es 0.1, bajo. En este caso, de acuerdo a la matriz de probabilidad e impacto el riesgo sería de 0.07 y se encuentra en la zona amarilla. Por ende, igual que en el caso

anterior, en caso de darse este riesgo su influencia en el proyecto no sería muy importante.

En el caso del cuarto riesgo, mal deslizamiento de las barras por los agujeros, la probabilidad es 0.5, posible mientras que el impacto es 0.4, alto. En este caso el riesgo es de 0.2, valor situado en la zona roja de la matriz y que por tanto, es un riesgo mayor, que podría tener influencia en nuestro proyecto.

Ilustrando estos valores en la matriz se obtiene lo siguiente:

		Riesgo = Probabilidad x Impacto				
Probabilidad	0,9	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72
	0,7	0,04	0,07 <sup>3</sup>	0,14	0,28	0,56
	0,5	0,03	0,05	0,10 <sup>2</sup>	0,20 <sup>4</sup>	0,40
	0,3	0,02	0,03 <sup>1</sup>	0,06	0,12	0,24
	0,1	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
		0,05	0,10	0,20	0,40	0,80
		Impacto				

Figura 9. Matriz de probabilidad e impacto

Atendiendo a los valores de los riesgos que se han calculado se puede observar que se debe actuar en primer lugar en aquel que más riesgo conlleva. En este caso, el riesgo 4. Para conseguir reducir este riesgo, se deberá agrandar el orificio de la barra atascada con la ayuda de una herramienta dremel o se deberá hacer uso de lubricantes en caso de necesitarlos. De esta forma, se conseguiría una reducción de la probabilidad de que suceda, quedando el riesgo en 0.04, ya situado en la zona verde.

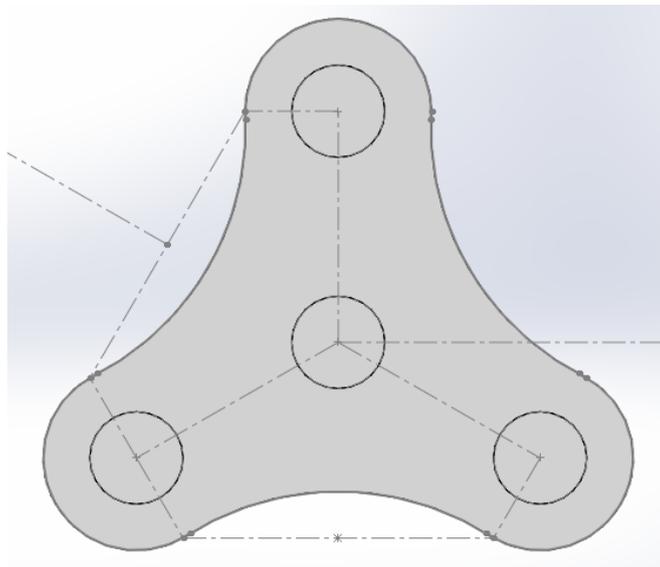
Asimismo, a pesar de ser riesgos moderados, se puede actuar sobre el riesgo 2 y 3. Sin embargo, no resulta demasiado importante ya que su influencia en el proyecto no genera grandes contratiempos.

## 8. DISEÑO DE LA BARRA

La idea principal del proyecto es crear un conjunto de barras que sirvan de unión entre el soporte que sujeta al paciente y el chaleco que lleva puesto éste y que además estas sean capaces de transmitir el movimiento deseado al chaleco mediante un motor rotativo. Para ello, se decidió utilizar cuatro barras unidas mediante dos soportes, el inferior adherido al soporte y el superior al chaleco. Entre estos dos irán también unas piezas intermedias muy delgadas cuya única función será mantener el paralelismo de estas. Para llevar a cabo esta idea se hizo lo siguiente:

### 8.1 Diseño en AutoCAD.

Se diseñaron los soportes en SolidWorks eligiendo una forma para estos que suponga la más económica posible en cuanto ahorro de material y a la vez consiga desarrollar las funciones del robot sin ningún problema. La forma adoptada es la siguiente:



**Figura 10. Forma soportes**

Para el diseño del soporte inferior se realizaron cuatro agujeros ciegos de la misma profundidad. Las barras se insertan en estos agujeros y se pegan.

Por otro lado, en el soporte superior se realizan de la misma manera cuatro agujeros siendo el central ciego y el resto pasantes. La barra central se pegará al agujero central y el resto deslizarán en sus respectivos agujeros.

Asimismo, se fabrican también cuatro piezas intermedias que asegurarán el buen funcionamiento del conjunto. La barra central irá pegada a estas guías mientras que el resto deslizarán.

De esta manera lo que se pretende es que la barra central esté bien sujeta por los soportes y las barras laterales puedan deslizar por los agujeros superiores de manera que cuando el conjunto de barras gire a la derecha, a la izquierda o hacia cualquier dirección estas se mantengan en todo momento paralelas unas a otras.

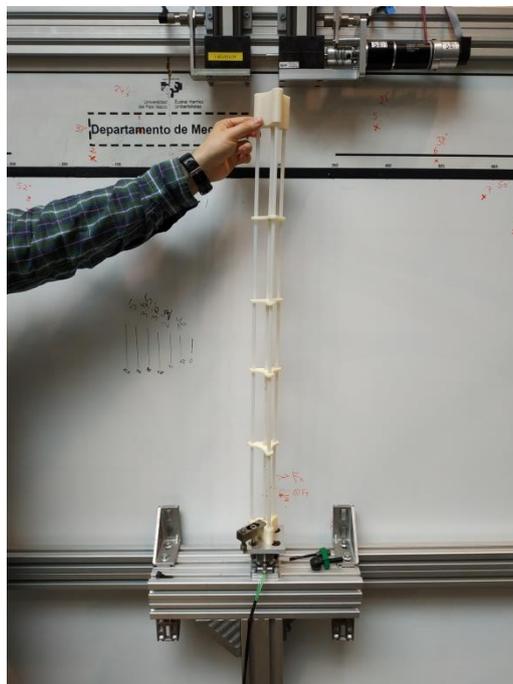


Figura 11. Prototipo final

Asimismo, se podrá jugar con las variables de diseño de los elementos terminales para así poder modificar la rigidez a flexión de la barra. Los parámetros que modifican la rigidez son la distancia de las barras con respecto al eje, el diámetro de las barras y el número de barras que se utiliza. Podemos ver cómo influyen estos parámetros según los cálculos mostrados en el apartado 9.3.

La fabricación de los soportes se realizó mediante impresión 3D. Por lo tanto, los planos se realizaron en formato STL (STereo Lithography) ya que es el formato que lee la impresora utilizada. Estos planos se encuentran en el Anexo II.

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Este proyecto se divide en ocho tareas. En este apartado se expone la planificación de estas, que se realiza en cada una de ellas, su duración en el tiempo y el hito obtenido en cada una de ellas.

#### **T.1. Revisión del Estado del Arte.**

El estudio del estado del arte conlleva la investigación profunda del tema, saber que se sabe hasta el momento y los avances que se han logrado, es decir, la recopilación de información y documentación. Es la primera tarea a realizar.

DURACIÓN: 2 semanas.

#### **T.2. Autoformación en SolidWorks**

Para llevar a cabo el diseño de los soportes ha sido necesaria una autoformación en SolidWorks ya que era un programa que no controlaba. Esto lo he llevado a cabo gracias a los tutoriales que ofrece el programa.

DURACIÓN: 2 semanas.

#### **T.3. Diseño conceptual del conjunto de barras.**

Se concreta un diseño preliminar de nuestro softrobot, que forma tendrán los soportes, cuantas barras tendrá, cuál será su movimiento, si irán pegadas a los soportes o deslizarán, etc.

Es solamente un diseño orientativo pero que permite saber qué movimiento tomará y más o menos que funciones podrá desempeñar.

HITO: primer boceto del conjunto de barras que realizaremos

DURACIÓN: 1 semana

#### **T.4. Diseño de detalle**

Se realizará a través de SolidWorks utilizando como base el primer boceto pero de forma que todas las variables estén perfectamente definidas. Es decir, se realizará la forma exacta de los soportes, con la forma exacta de los orificios para las barras, se definirá las uniones con las barras, etc.

HITO: obtención de los planos acotados

DURACIÓN: 2 semanas

#### **T.5. Fabricación**

Consiste en la fabricación de las piezas previamente diseñadas en SolidWorks mediante una impresora 3D. Posteriormente a esta fabricación se realiza el montaje del prototipo en el taller de ingeniería mecánica haciendo uso de las distintas herramientas disponibles como el taladro, la dremel, etc.

HITO: obtención del prototipo

DURACIÓN: 3 semanas

#### **T.6. Realización de ensayos**

Una vez el prototipo este construido, se realizan unos ensayos en la mesa Kistler para conocer las fuerzas que se crean en el soporte al aplicar una fuerza de tracción y desplazarlo.

HITO: valores experimentales de las fuerzas en los soportes

DURACIÓN: 1 semana

### **T.7. Comparación con el modelo**

Se comparará los resultados de los ensayos con un modelo matemático desarrollado por un doctorando en el departamento de ingeniería mecánica.

HITO: detección de imperfecciones y aspectos a mejorar

DURACIÓN: 1 semana

### **T.8. Documentación**

Por último, se elaborará la memoria del proyecto.

HITO: memoria

DURACIÓN: 4 semanas

## 9.2. DIAGRAMA DE GANTT

### Tarea

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
T.1. Revisión del estado del arte	1/03/18	14/03/18
T.2. Autoformación en SolidWorks	15/03/18	30/03/18
T.3. Diseño conceptual del conjunto	15/03/18	19/03/18
T.4. Diseño de detalle	2/04/18	20/04/18
T.5. Fabricación y montaje	23/04/18	16/05/18
T.6. Realización de ensayos	17/05/18	21/05/18
T.7. Comparación con modelo matemático	22/05/18	25/05/18
T.8. Documentación	28/05/18	6/07/18

Figura 12. Listado de tareas con fechas de inicio y fin

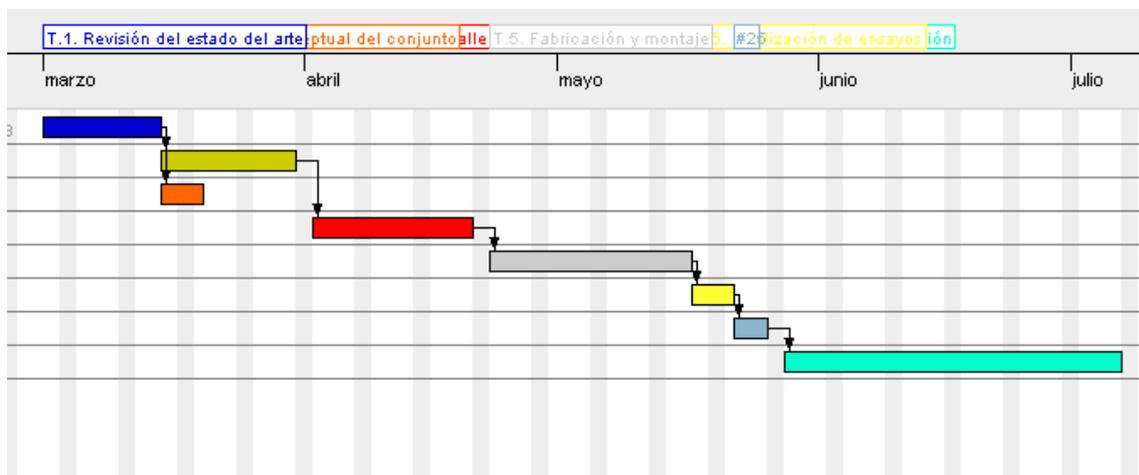


Figura 13. Diagrama de Gantt del proyecto

### 9.3. CÁLCULOS

En su funcionamiento la barra va a experimentar grandes deformaciones. Por lo tanto, no se puede asumir la hipótesis lineal ya que la orientación de las fuerzas aplicadas cambia con respecto a la viga a causa de la gran deformación de ésta. Estos cálculos que se realizarán son más habituales para casos de pequeñas deformaciones. No obstante, se realizará para tener unos valores de referencia.

#### 9.3.1. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ A FLEXIÓN

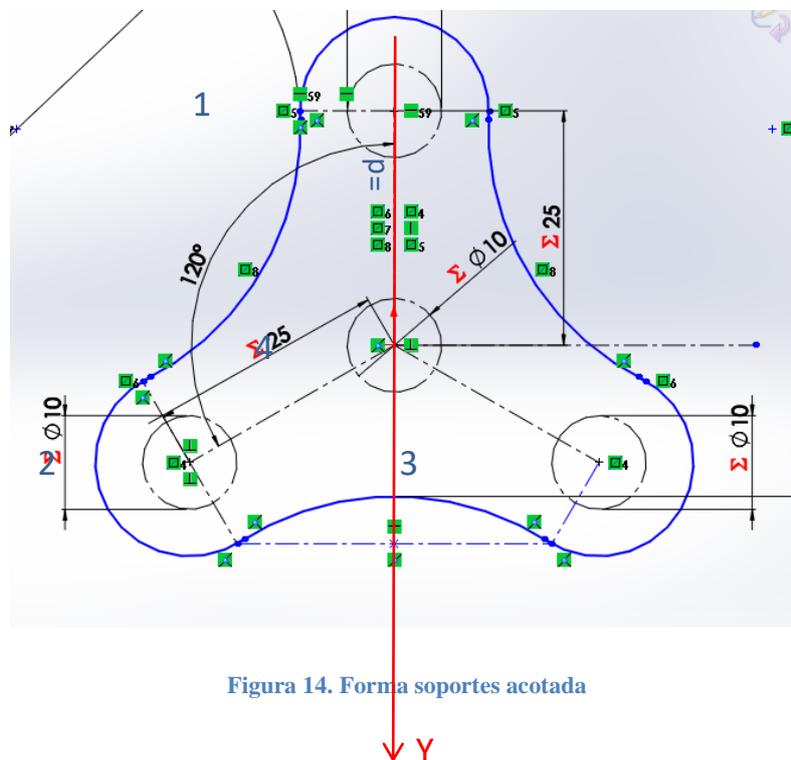


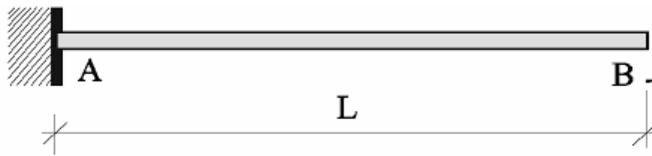
Figura 14. Forma soportes acotada

Se calculará la rigidez del conjunto de barras que mide la capacidad que tienen las barras para aguantar esfuerzos sin perder su forma.

Sabiendo que se tiene una ménsula empotrada y libre se conoce que su rigidez se define con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{3EI}{l^3} \text{ (N/m) donde,}$$

- E es el módulo de Young del material de la barra. Este caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. En este caso el material de la barra es nylon 66 de temperatura de fusión alto y atendiendo a las características que presenta definimos el valor del módulo de Young E:  $3.1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$
- I es el momento de inercia de área que nos cuantifica la resistencia de la barra a girar. Se explicará más adelante como se debe calcular.
- L es la longitud de la barra desde el empotramiento hasta su extremo libre.



En este caso será la distancia desde el soporte inferior hasta el extremo libre de la barra.  $L=731\text{mm}$

El momento de inercia de una sección circular R con respecto a un eje que pase por el centro de gravedad es  $\frac{\pi R^4}{4}(\text{m}^4)$ . Por lo tanto, el momento de inercia de las secciones 1 y 4 respecto al eje vertical Y es:

$$I_1=I_4=\frac{\pi R^4}{4}$$

Sin embargo, como las secciones 2 y 3 están a una distancia  $\frac{d\sqrt{3}}{2}$  del eje vertical Y es necesario aplicar el teorema de Steiner. Este dice que el momento de inercia respecto a un eje es igual al momento de inercia respecto a otro eje paralelo más la distancia al cuadrado entre ambos ejes multiplicada por el área de la sección.

Por ello, en este caso se calcula el momento de inercia de la sección 2(o 3, el resultado es el mismo) respecto a un eje que pasa por su centro de gravedad que es  $\frac{\pi R^4}{4}$  y para definirlo respecto al sistema de referencia definido, es decir, respecto al eje vertical Y hay que sumarle a ese valor la distancia al cuadrado entre ambos ejes multiplicada por

el área de la sección. Es decir, el cálculo queda de la siguiente forma:

$$I_2=I_3=\frac{\pi R^4}{4}+\pi R^2 * \left(\frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2$$

Por lo tanto, si se utiliza solo una barra el momento de inercia sería muy bajo y, por lo tanto, también la rigidez. Por ello se utilizan 4 barras en paralelo y el momento de inercia es:

$$I_{total}=I_1+I_2+I_3+I_4=\pi R^4+\left(\pi R^2 * \left(\frac{d*\sqrt{3}}{2}\right)^2\right) * 2$$

Insertando todos los valores en el software matemático MATLAB se obtiene:

```

r=3; %mm
d=25; %mm
Iner= (pi*r^4)+((pi*(r^2)*(d*sqrt(3))^2))/2; %mm^4
l=731 %mm
E=3.1*10^3; %N/mm^2
k=(3*E*I)/(l^3) %N/mm con las 4 barras
I1=(pi*r^4)/4 %mm^4
k1=(3*E*I1)/(l^3) %N/mm si solo tuvieramos una barra
  
```

Y se obtiene el valor  $k=0.6371\text{N/mm}$  y  $k1=0.0015\text{N/mm}$

Es decir, la rigidez que se tiene poniendo las 4 barras en paralelo es mucho mayor. Por tanto, se gana rigidez manteniendo la flexibilidad del conjunto.

## 9.4 RESULTADOS

### 9.4.1 PROTOTIPO DE BARRA

Tras la fabricación de las piezas necesarias y el montaje de la barra, resulta este prototipo:

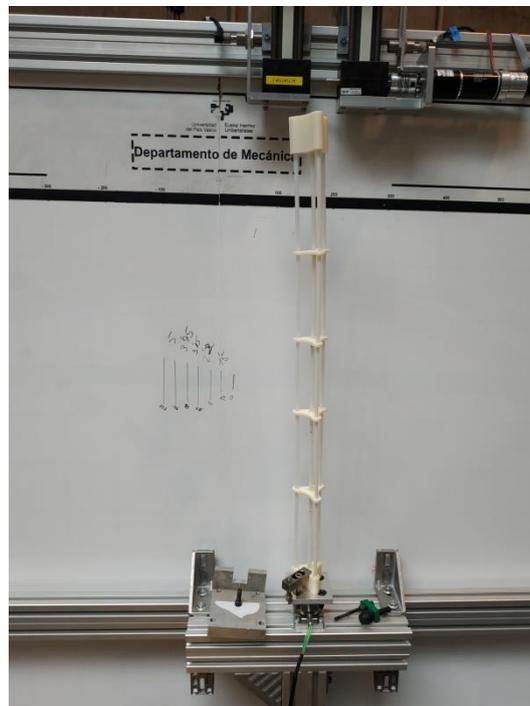


Figura 15. Prototipo de la barra

Aquí se puede ver como se deforma la barra cuando es sometido a una flexión hacia la derecha y hacia la izquierda.

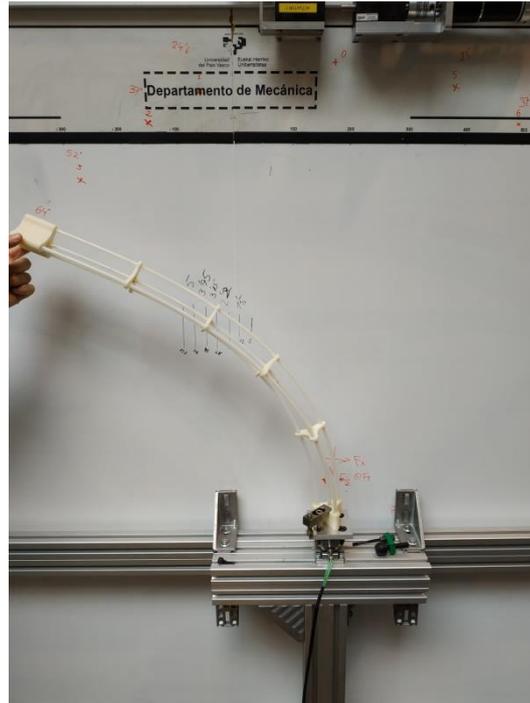


Figura 16. Giro de la barra hacia la izquierda

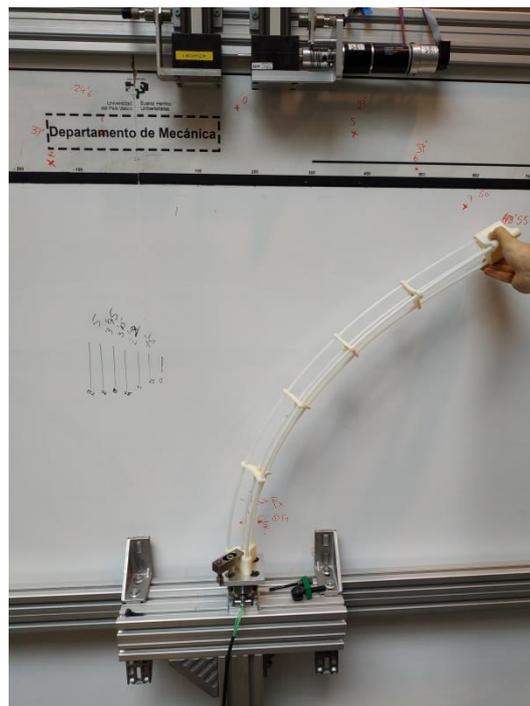


Figura 17. Giro de la barra hacia la derecha

En las imágenes se puede ver como al doblarse todas las barras mantienen su paralelismo, que es lo que se quería conseguir para su correcto funcionamiento.

#### 9.4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Para la realización de los ensayos se miden los esfuerzos en la dirección X, Y y Z al realizar un esfuerzo de flexión en las barras moviéndolas a distintas posiciones. En la Figura 18 se muestra un esquema de la mesa dinamométrica empleada, una mesa Kistler. El funcionamiento de esta se basa en el efecto piezoeléctrico, la acción de la una fuerza y la diferencia de presión entre dos caras paralelas produce una diferencia de potencial. Esta señal eléctrica es luego amplificada y tratada para ser captada y almacenada por el ordenador y mediante una escala voltios/Newton se traduce a newtons esta diferencia de potencial.

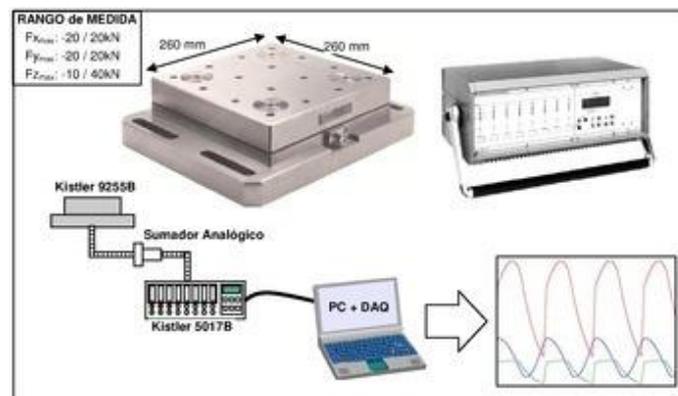


Figura 18. Mesa dinamométrica Kistler y sistema de adquisición de datos

Para llevar a cabo los ensayos se apoya la barra sobre la mesa kistler y se engancha a esta gracias a un utillaje de amarre de la siguiente manera:

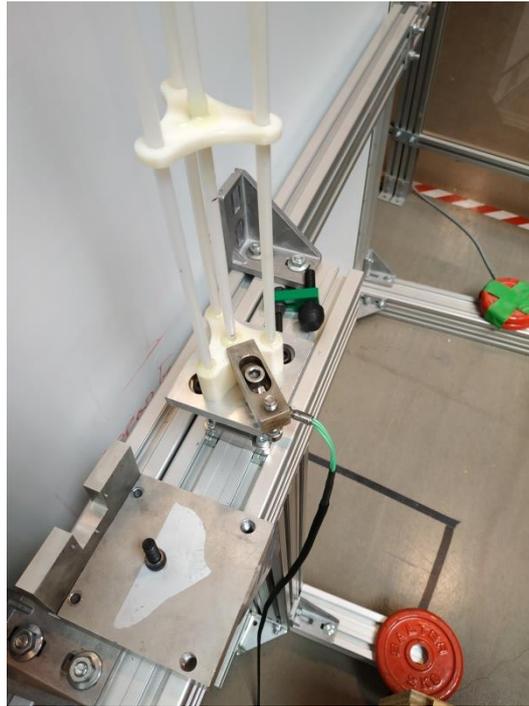
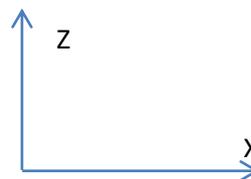


Figura 19. Unión de la barra a la mesa Kistler

En el anexo I podemos encontrar más imágenes sobre la realización de los ensayos.

Los ensayos se realizaron para unos desplazamientos de 64 grados hacia la izquierda y de 63 grados hacia la derecha con la vertical, con medidas intermedias entre estos. En la siguiente tabla se reflejan todos los resultados de los ensayos indicando las coordenadas del extremo superior de la barra, el ángulo que forma la barra con la dirección horizontal, las fuerzas en la dirección X, Y y Z y, por último, el módulo de la fuerza al que se denominará F.

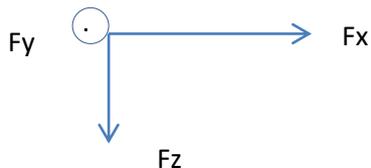
Tomando los siguientes ejes de referencia:



Xp	Zp	Ángulo	Fx	Fy	Fz	F
0,198	0,727	67	0,41	-0,08	0,7	0,82
0,309	0,672	53	-0,03	-0,05	1	1,00
0,4	0,601	40	0,28	-0,05	1,6	1,63
0,464	0,541	27	-0,36	0,03	3	3,02
-0,225	0,718	65,4	-0,38	0,39	0,7	0,89
-0,313	0,669	53	-0,07	0,44	1,8	1,85
-0,435	0,577	38	-0,31	0,23	2	2,04
-0,517	0,481	26	0,94	0,23	2,8	2,96

Tabla 1. Resultado de ensayos experimentales

Las fuerzas están medidas con los siguientes ejes:



#### 9.4.2. COMPARACIÓN CON EL MODELO.

Se compararán los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con un modelo matemático de MATLAB realizado en el departamento de ingeniería mecánica. Este modelo funciona de la siguiente manera. Se introducen como datos el módulo de la fuerza medida con la mesa dinamométrica (está será positiva si la deformación es hacia la izquierda, en dirección negativa del eje x y será negativa en caso contrario), el ángulo de la barra con la horizontal. El modelo nos devuelve un gráfico en los ejes X, Z que nos presenta la deformación de la barra, con el ángulo teórico de deformación. Para ver si el modulo experimental y el modelo teórico coinciden se comparará el ángulo teórico con el obtenido mediante el modelo.

Al poner esto en práctica, se obtiene para los desplazamientos hacia la derecha obteniendo los siguientes ángulos medidos con la horizontal, 90.06°, 90.11°, 90.23° y 90.49° en lugar de 67°, 53°,40°y 27° como podemos ver en la siguiente gráfica. Si se

realiza esta comparación con el resto de valores, cuando deformamos la viga hacia la izquierda, sucede exactamente lo mismo, obtenemos 89.93°, 89.8°, 89.71° y 84.52° en lugar de 65.4°, 53°, 38° y 26°. Los resultados se ven reflejados en la siguiente gráfica:

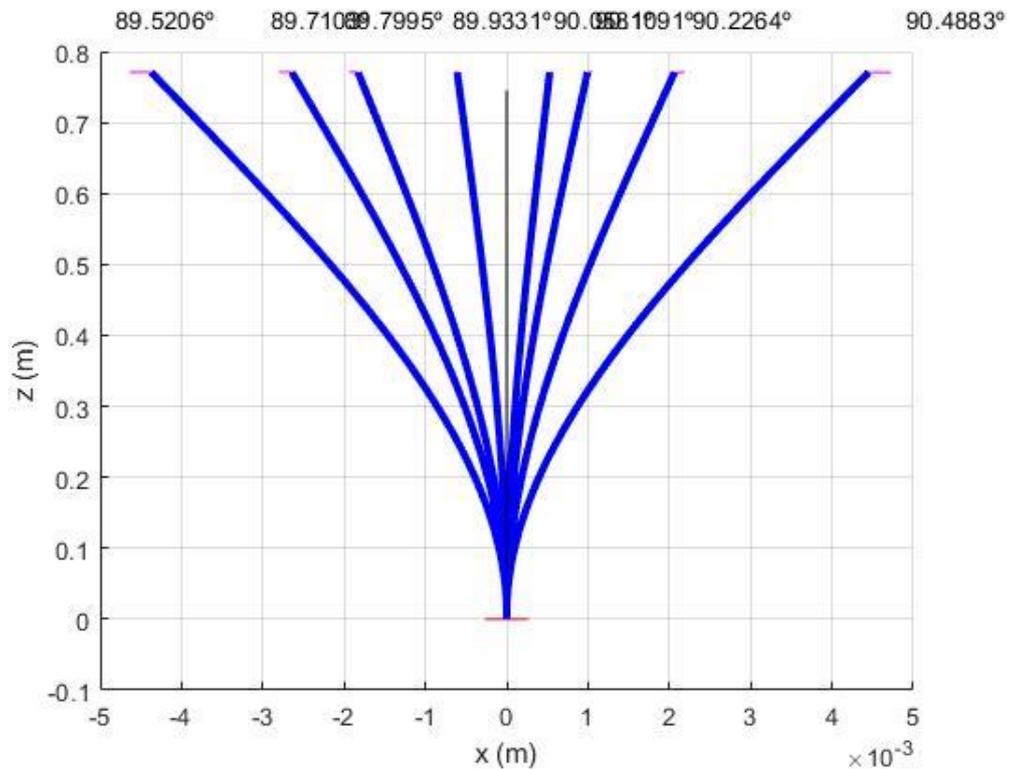


Figura 20. Resultados del modelo matemático.

La diferencia en los resultados es notable ya que el desajuste se corrige si se utiliza un módulo de Young tres órdenes de magnitud menor como, por ejemplo, el del teflón. En la siguiente gráfica se ven los resultados obtenidos habiendo utilizado el módulo de Young del teflón. Los resultados obtenidos son

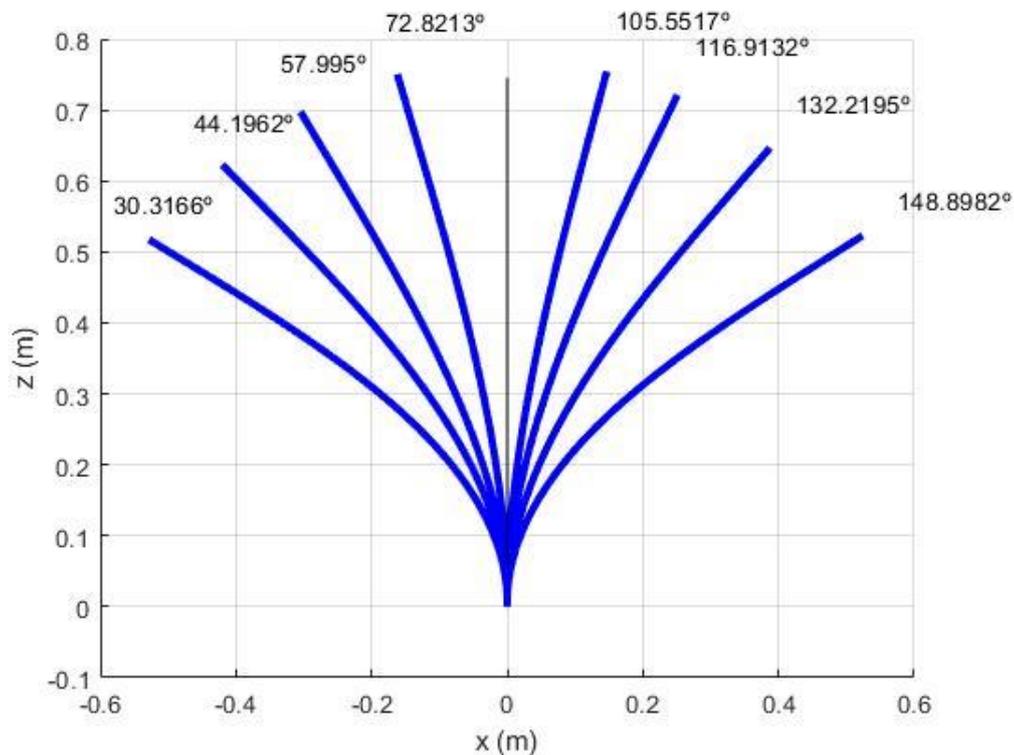


Figura 21. Resultados modelo matemático corregido.

Como podemos ver aquí los resultados de aproximan mucho a los resultados experimentales. Se obtienen los ángulos 30°,44°,58° y 72.8° medidos desde la horizontal en vez de 65.4, 53°,38° y 26°. Y en el giro a la derecha se obtienen 31.1°, 48°, 63° y 74.45° medidos con la horizontal, en vez de los medidos experimentalmente: 27°, 40°, 53°y 67° respectivamente.

La fuente de error es desconocida y se puede dar debido a dos factores, a una falta de exactitud de las medidas tomadas o a un error en la realización del modelo matemático.

## 10. DESCARGO DE GASTOS

En este apartado se presenta el descargo de gastos de la realización del proyecto.

### HORAS INTERNAS

En esta partida se presentan las horas que ha dedicado cada persona involucrada en este proyecto.

Recursos	Unidades	Coste unitario	Nº unidades	Coste total
Director del proyecto	Horas	50€/hora	60	3000€
Ingeniero Senior	Horas	40€/hora	20	800€
Ingeniero junior	Horas	30€/hora	150	4500€

Tabla 2. Partida de horas internas

Subtotal horas internas: 8300€

### AMORTIZACIONES

Para la realización del proyecto hemos necesitado un equipo constituido por un ordenador portátil, la licencia para los softwares SolidWorks y MATLAB y una impresora 3D.

Recursos	Coste	Vida útil	Coste unitario	Uso en el proyecto	Coste total
Ordenador portátil	600€	5 años	0.329€/día	85 horas	3.49€
Licencia Solidworks	70€	1 año	0.247€/día	27 días	6.67€
Licencia MATLAB	90€	1 año	0.192€/día	20 horas	0.16€
Impresora 3D	1000€	10 años	0.011574€/hora	16 horas	0.19€

Tabla 3. Partida de las amortizaciones.

Subtotal amortizaciones: 10.51€

#### GASTOS DE MATERIAL:

En esta partida se contempla el material utilizado para la construcción del prototipo completo.

Recursos	Unidades	Coste unitario	Nº unidades	Coste total
ABS +	Kg	300€/kg	0.17024	51.07€
Barras de nylon	-	2.246€	4	8.98€

Tabla 4. Partida de los gastos de material

Subtotal gastos de material: 60.05€

#### Gastos:

Los costes indirectos de realización de proyecto (luz, electricidad, agua, etc.) se calculan

como el 5% de los costes directos

Total:

Por consiguiente, sumando todas las partidas, el descargo de gastos del proyecto ha sido:

<b>Concepto</b>	<b>Coste total</b>
Horas internas	8300€
Amortizaciones	10.51€
Gastos material	60.05€
<b>Subtotal</b>	<b>8370.56€</b>
Costes indirectos (5%)	418.53€
<b>TOTAL</b>	<b>8789.09</b>

Tabla 5. Descargo total de gastos.

## 11. CONCLUSIONES

Mediante la realización de este proyecto se ha conseguido llevar a cabo el diseño y la fabricación del prototipo de barra que se quería de manera exitosa, manteniendo en todo momento el paralelismo de las barras que la componían, como se quería.

Asimismo, se ha conseguido el objetivo de modificar la rigidez de la barra dependiendo la geometría de los elementos terminales y del número de barras utilizadas. Por lo tanto, se ha conseguido crear un softrobot lo suficientemente flexible y a la vez lo suficientemente rígido para transmitir los esfuerzos necesarios. Es decir, se ha logrado un dispositivo ideal para unir el soporte del sistema de rehabilitación para el que se ha creado esta barra con el chaleco y así poder recrear los movimientos deseados para asistir a la rehabilitación de pacientes con daños neurológicos sin que ésta suponga un riesgo para ellos, lo cual era uno de los objetivos principales.

Igualmente, se ha logrado la realización de unos ensayos en la mesa dinamométrica a pesar de que su veracidad está por determinar y se han hecho unas comparaciones con el modelo teórico lo que nos ha llevado a darnos cuenta de una posible fuente de error o en los ensayos, o en el modelo matemático del que se disponía. Por consiguiente, quedaría comprobar la fuente de error para así a través de la comparativa saber si el funcionamiento de la barra es correcto asegurándonos de la inexistencia de imperfecciones y detectando los aspectos a mejorar.

## 12. REFERENCIAS

- Barbuzano, J. (2014). La robótica se ablanda. *Revista materia*. Recuperado desde <http://esmateria.com/2014/08/09/robots-pulpo-una-nueva-generacion-de-robots-blandos-esta-en-camino/> (fecha última de acceso :28/06/2018)
- L. S. Cowan y Ian D. Walker. “Soft” Continuum Robots: the Interaction of Continuous and Discrete Elements. *En Clemson University, Clemson, SC 29634, USA*  
  
[http://cecas.clemson.edu/~iwalker/ALIFExi\\_pp126-133.pdf](http://cecas.clemson.edu/~iwalker/ALIFExi_pp126-133.pdf)
- S. Coyle, C. Majid, P. LeDuc y K. J.Hsia. Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design. *Extreme Mechanics Letters, volume 22, Julio 2018*.
- Daniela Rus y Michael T. Tolley. Design, fabrication and control of soft robots. *MIT open access articles, nature 521, no.7553, 27 de mayo de 2015*  
  
[http://scholar.google.fr/scholar\\_url?url=https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/100772&hl=es&sa=X&scisig=AAGBfm2l4fnfT9LKyZ1gjAY3KdL7BAFI7w&nossl=1&oi=scholar](http://scholar.google.fr/scholar_url?url=https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/100772&hl=es&sa=X&scisig=AAGBfm2l4fnfT9LKyZ1gjAY3KdL7BAFI7w&nossl=1&oi=scholar)
- José Medina H. y Paulina Vélez N. “Soft Robotic”: Una nueva generación de robots. *Maskana, 17 de octubre de 2014*.  
  
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/579/503>
- Hussain., et al. A soft supernumerary robotic finger and mobile arm support for grasping compensation and hemiparetic upper limb rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems, 4 abril 2017*.
- J. Burgner-Kahrs., et al. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. *IEEE Robotics and Automation Society, 2 noviembre 2015*.
- J.K.Mohanta., et al. Developpement and control of a new sitting-type lower limb



rehabilitation robot. *Computer and Electrical Engineering*, abril 2018.

- [https://www.europeana.eu/portal/es/record/2020801/dmglib\\_handler\\_image\\_13709023.html](https://www.europeana.eu/portal/es/record/2020801/dmglib_handler_image_13709023.html) (fecha última de acceso :28/06/2018)
- Conor Walsh, Robert Wood, Timothy Walsh y Sam Liss. Soft robotic glove. *Wiss Institute at Harvard*. Recuperado desde <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-robotic-glove/> (fecha última de acceso :28/06/2018)
- Conor Walsh, Robert Wood, Timothy Walsh, Sabrina Paganoni y Scott Kuindersma. Soft Wearable Shoulder-Assistive Device. *Wiss Institute at Harvard*. Recuperado desde <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-wearable-shoulder-assistive-device/> (fecha última de acceso :28/06/2018)
- Conor Walsh, Robert Wood, Sam Liss y Kathleen O'Donnell. Soft Exosuits. *Wiss Institute at Harvard*. Recuperado desde <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-exosuit/> (fecha última de acceso :28/06/2018)

## ANEXO I: ENSAYOS

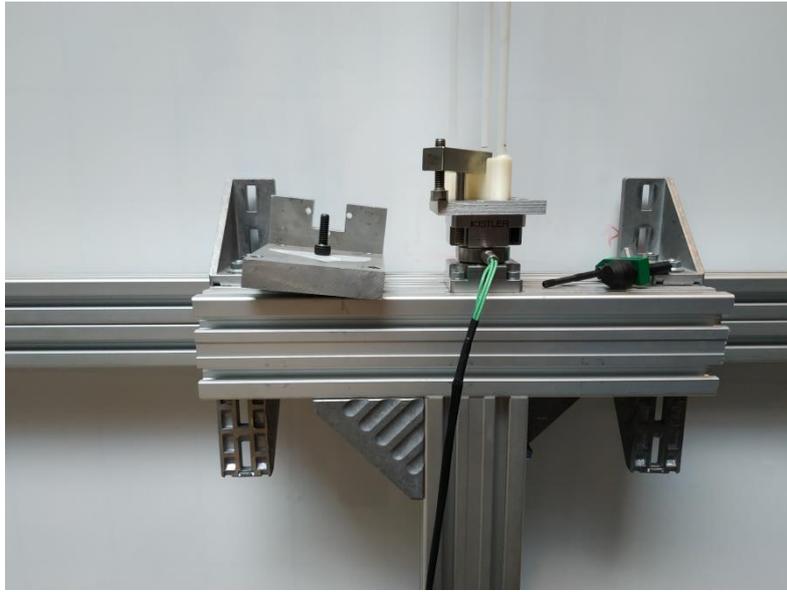


Figura 22. Barra enganchada a mesa Kistler

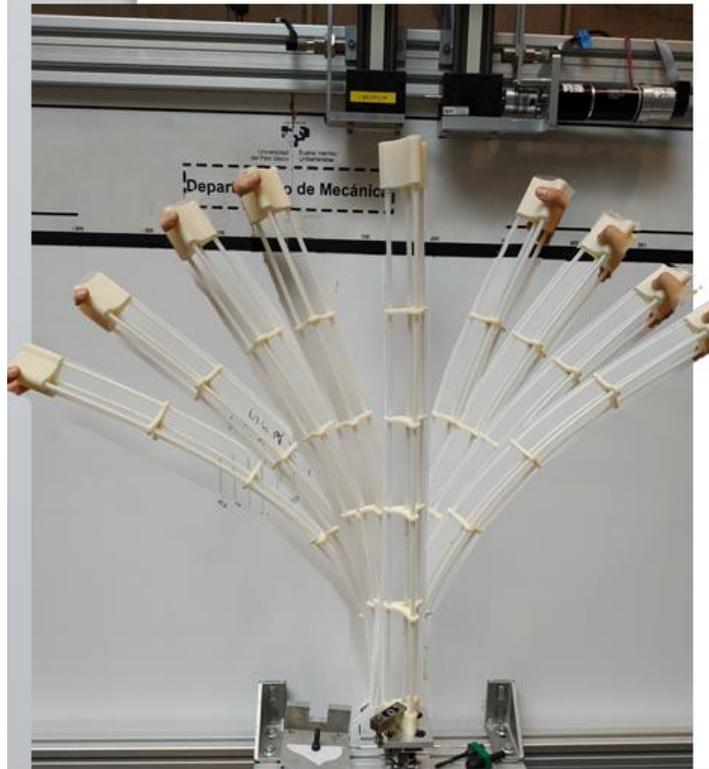


Figura 23. Montaje de todas las posiciones que alcanza la barra

## ANEXO II: PLANOS SOLIDWORKS.

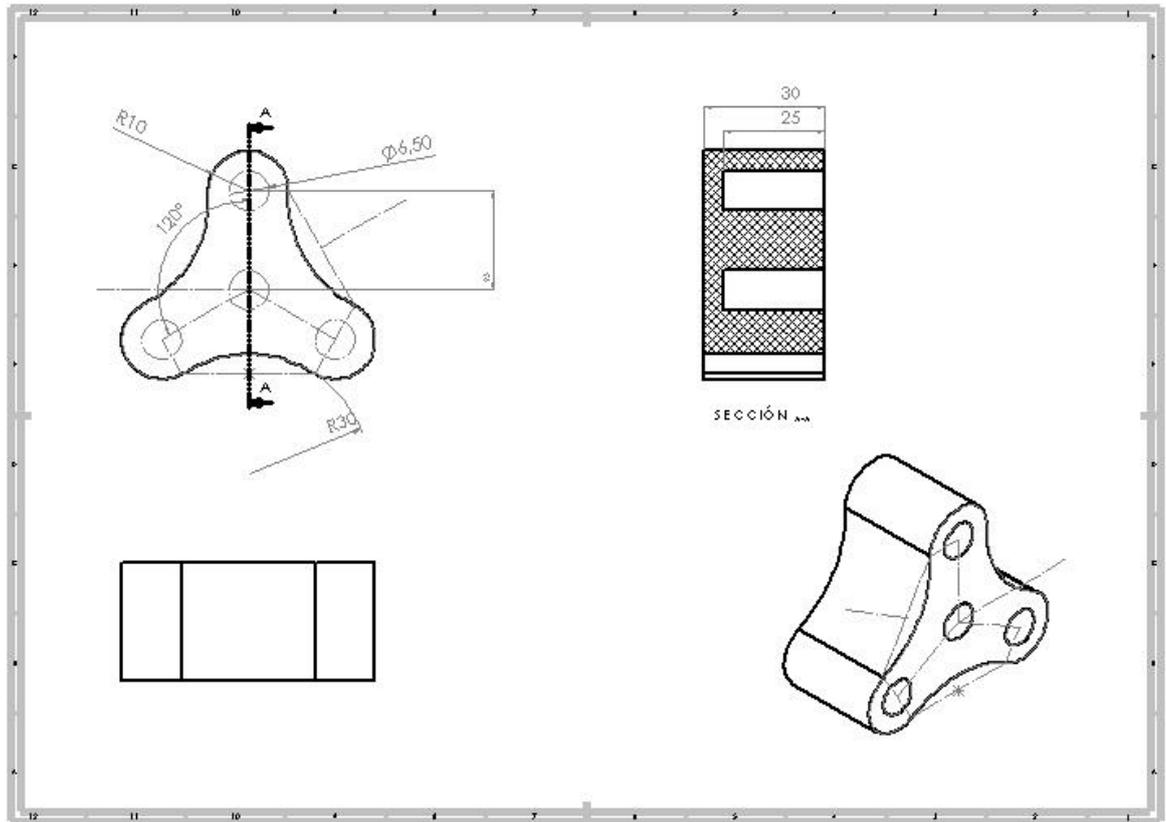


Figura 24. Planos soporte inferior

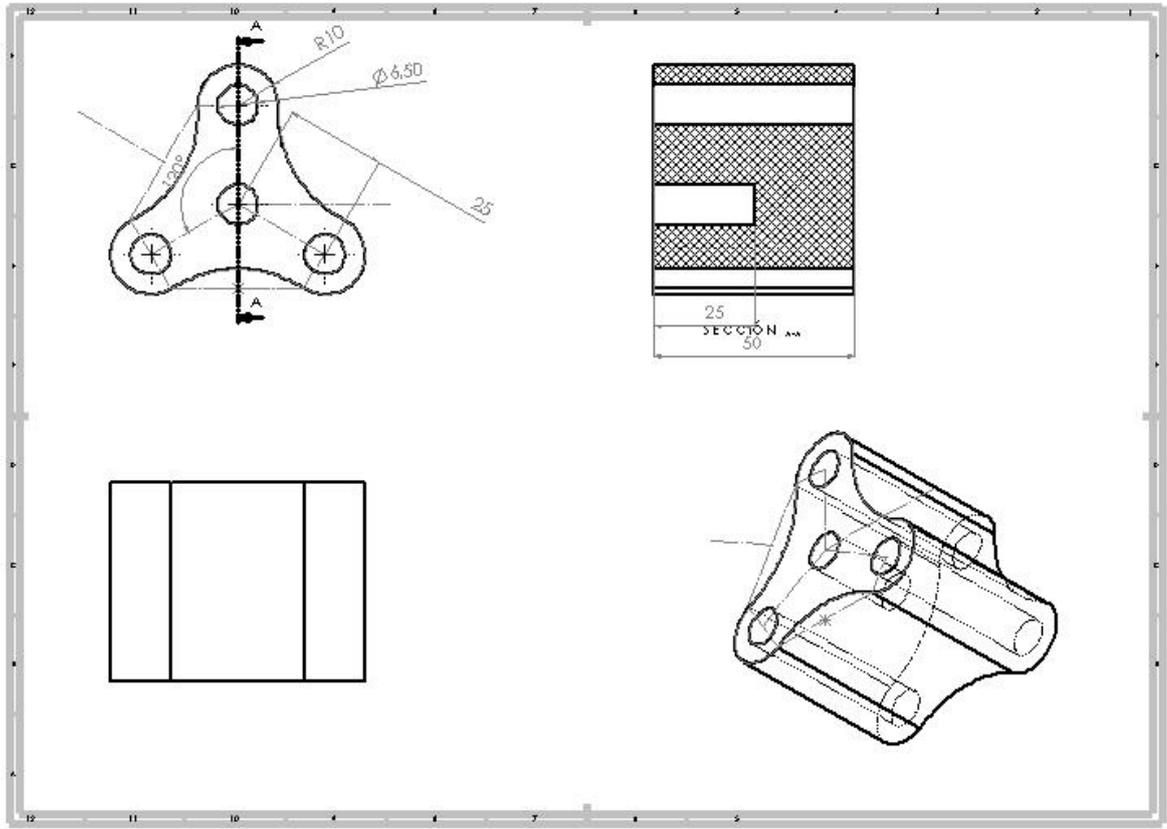


Figura 25. Planos soporte superior

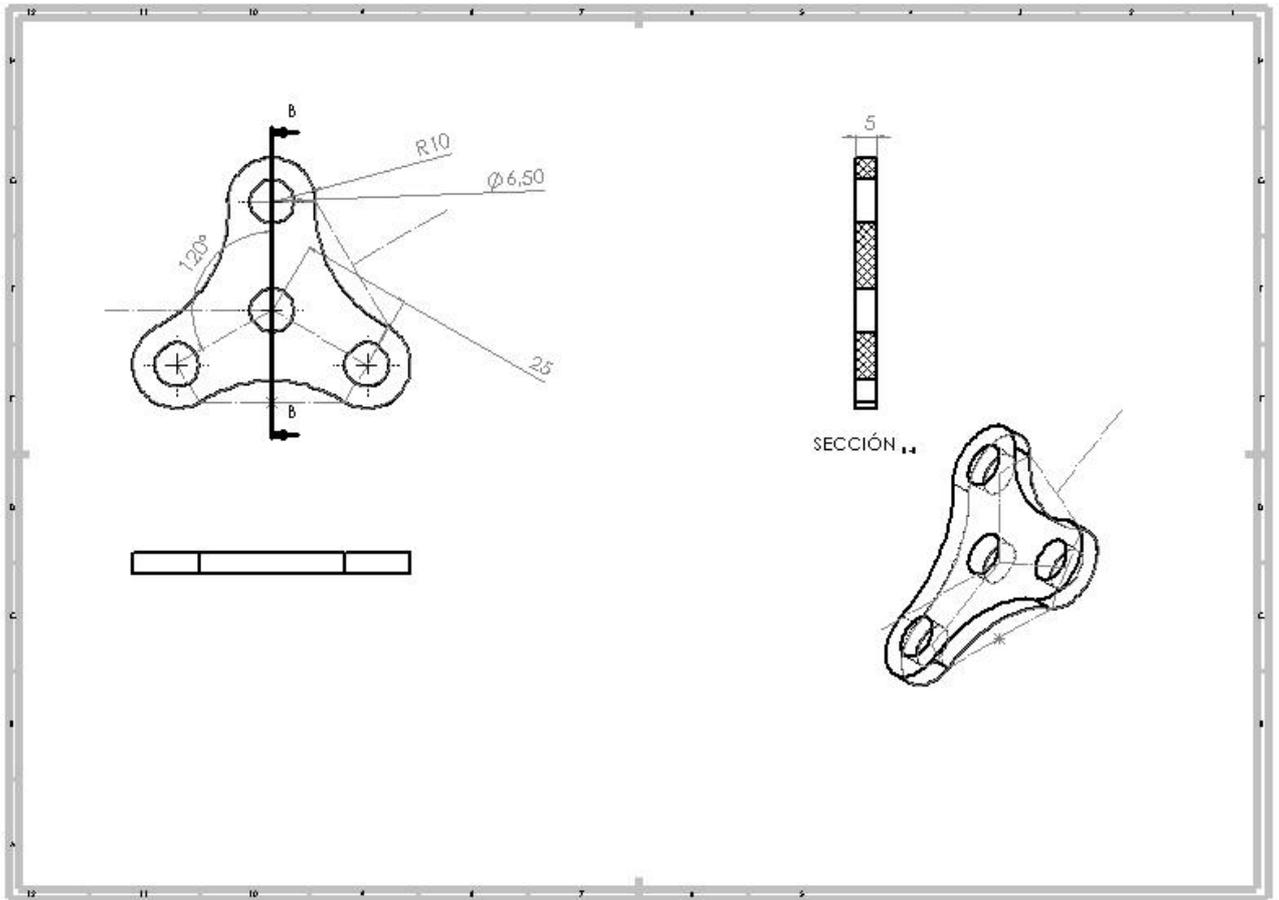


Figura 26. Planos pieza intermedia