

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

PROYECTO DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA MECÁNICO INERCIAL PARA EL ENTRENAMIENTO Y RECUPERACIÓN MUSCULAR

MEMORIA

Autor: Pau Claramunt Tuset
Director: Emilio Angulo Navarro
Convocatoria: 09/2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En este trabajo se realiza el diseño de una polea inercial cónica, que es un dispositivo de entrenamiento y recuperación muscular para deportistas basado en el disco de inercia. También se ha hecho el diseño de dos módulos de entrenamiento distintos a los que se le acopla la polea inercial para poder realizar más variedad de ejercicios.

Se ha estudiado su funcionamiento y el estado del arte. También se ha realizado un estudio del mercado actual para ser conscientes de donde se partía y que se quería conseguir con el diseño. Se decidió que se quería hacer un diseño propio de una polea inercial cónica que pudiera fijarse a diferentes módulos de entrenamiento para aumentar su versatilidad.

De los módulos que se podrían haber diseñado se optó por elegir dos, dado que los recursos de tiempo de los que se disponía eran limitados, que son el módulo *Leg Curl* y el módulo Remo, ambos son explicados extensamente en el cuerpo del documento.

Inicialmente se hizo un diseño conceptual de las tres estructuras teniendo en cuenta las especificaciones impuestas previamente. Después, se ha ido definiendo poco a poco un diseño definitivo que es justificado y explicado con detenimiento.

Posteriormente se ha realizado justificado el diseño mediante un análisis de las simulaciones hechas con el método de los elementos finitos. También se ha expuesto la lista de materiales, así como los métodos de fabricación necesarios para materializar este diseño.

Finalmente se ha analizado el impacto ambiental y se ha calculado el presupuesto del proyecto para, junto con todos los apartados anteriores, extraer unas conclusiones.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivo del Proyecto.....	7
1.2. Alcance del Proyecto.....	7
1.3. Motivación.....	8
1.4. Planificación.....	9
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Ventajas del Entrenamiento Inercial.....	12
2.2. Tipos de Máquinas Inerciales.....	14
2.3. Precios de mercado.....	21
3. ESPECIFICACIONES	23
3.1. Polea Inercial Cónica.....	23
3.2. Módulo 1: <i>Leg Curl</i>	23
3.3. Módulo 2: Remo.....	24
4. DISEÑO CONCEPTUAL	25
4.1. Polea Inercial Cónica.....	25
4.2. Módulo <i>Leg Curl</i>	26
4.3. Módulo Remo.....	27
5. DISEÑO DETALLADO	29
5.1. Polea inercial Cónica.....	29
5.2. Módulo <i>Leg Curl</i>	32
5.3. Módulo Remo.....	36
5.4. Análisis de vuelco.....	38
5.5. Cálculo de los rodamientos.....	42
5.5.1. Rodamientos de la polea inercial cónica.....	42
5.5.2. Rodamientos del asiento del Módulo Remo.....	44
6. SIMULACIONES CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	46
6.1. Análisis Estático Estructural.....	46
6.2. Análisis Modal.....	49
7. MÉTODOS DE FABRICACIÓN	51
7.1. Tubos.....	51

7.2. Chapas.....	52
7.3. Fabricación 3D.....	53
8. LISTAS DE MATERIALES	56
9. IMPACTO AMBIENTAL	58
10. PRESUPUESTO	59
10.1. Presupuesto del proyecto	59
10.2. Coste de fabricación	59
CONCLUSIONES	62

1. Introducción

1.1. Objetivo del Proyecto

Este proyecto tiene como objetivo el diseño y desarrollo de una polea cónica inercial, un mecanismo pensado para ejercitar diversos grupos musculares utilizando la inercia, en vez de la gravedad. Se realizará, también, el desarrollo y diseño de dos estructuras que, de manera modular, puedan unirse y separarse de la polea fácilmente. Estas estructuras servirán para dar más versatilidad al mecanismo, de esta forma se puede adaptar el trabajo inercial de la polea cónica para poder hacer diferentes ejercicios.

Se quiere obtener un modelo más compacto y versátil que las que existen en el mercado, con un conjunto de extensiones que se puedan intercambiar entre sí. La finalidad de la modularidad de las extensiones es poder intercambiarlas fácil y rápidamente para así poder realizar una gran variedad de ejercicios con una sola polea cónica.

1.2. Alcance del Proyecto

En el transcurso de este proyecto se realizará las siguientes operaciones:

- Introducción a las poleas cónicas y el entrenamiento inercial.
- Análisis del estado del mercado actual, productos principales y sus módulos.
- Estudio del mecanismo:
 - Modelo mecánico general.
 - Partes y materiales más utilizados.
- Diseño conceptual:
 - Análisis de requerimientos funcionales básicos del mecanismo.
 - Estudio de las sollicitaciones estructurales a las que estará sometido el conjunto de elementos.
 - Diseño conceptual en 3D de la polea y los diferentes módulos.
- Diseño detallado:
 - Análisis de vuelco
 - Cálculo de rodamientos
 - Justificación del diseño final

- Simulaciones con el Método de los Elementos Finitos:
 - Análisis Estático Estructural
 - Análisis modal
- Justificación de los materiales usados y métodos de fabricación

En este proyecto no se realizará el diseño de producto completo, ya que no se dispone del tiempo necesario. No se diseñará una interfaz para la monitorización de los datos de velocidades y pares, ni de la implementación del sensor. No se realizará todos los planos acotados en dos dimensiones de las piezas ni tampoco se fabricará el diseño final ya que no se dispone de tiempo ni recursos económicos suficientes.

1.3. Motivación

El tema de este proyecto surge de la experiencia personal del autor en su primer contacto con las máquinas inerciales. Como consecuencia de una lesión practicando balonmano a nivel estatal, se propuso desde el centro que llevaba la recuperación el uso de la polea inercial cónica. Este dispositivo despertó un gran interés tanto a nivel mecánico como también sus ventajas a la hora de tratar y prevenir lesiones.

Al investigar y preguntar se descubrió que las máquinas inerciales y su uso en el deporte es algo muy reciente y novedoso por lo que, en general, son muy caras. Hay muy pocos centros, por el momento, que dispongan de esta tecnología ya sea por el precio o por el desconocimiento de su existencia.

Es en este punto que nace la idea de este proyecto, para tratar de proponer una opción económica para los pequeños gimnasios y clubes deportivos. Al poder acoplar la polea inercial cónica a los diferentes módulos se ahorran miles de euros y se pueden realizar muchos ejercicios diferentes. Este planteamiento tiene la limitación que solo puede usar la polea un solo usuario y los módulos a los que no está acoplada la polea no pueden usarse. Sin embargo, esto ofrece a las personas, clubes o gimnasios que quieran adquirir tecnología inercial la posibilidad de hacerlo de manera gradual, sin necesidad de una sola gran inversión. De esta manera el consumidor puede ir adquiriendo poleas cónicas y módulos en la medida que más le convenga.

Finalmente, el autor del proyecto cree que elegir este tipo de proyecto le permite practicar y aprender diseño mecánico, al cual quiere dedicar los comienzos de su carrera profesional.

1.4. Planificación

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Gantt con el que se ha hecho la planificación del proyecto.

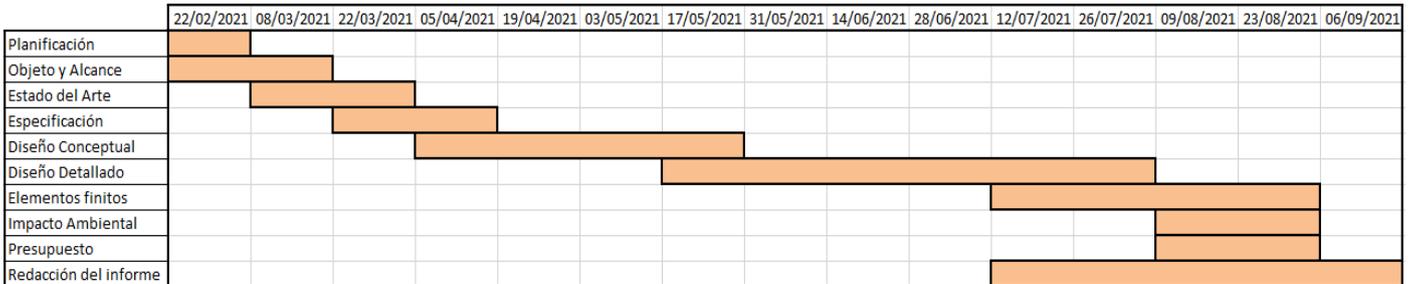


Figura 1: Diagrama de Gantt del proyecto.

Se trata de una planificación aproximada con los tiempos que requiere realizar cada apartado, no se ha hecho una planificación de cada tarea ya que al ser un proyecto de una persona no requiere tanto nivel de coordinación. Esta planificación fue modificada en el momento que se decidió prorrogar la entrega del proyecto hasta septiembre. En vista de la cantidad de tiempo que se necesitó para diseñar y analizar las máquinas, y el tiempo que se dedicaba al estudio para los exámenes, se decidió prorrogar el proyecto y modificar la planificación.

2. Estado del Arte

Actualmente, la gran mayoría de máquinas para la ejercitación muscular están basadas en el levantamiento de pesos mediante palancas o poleas y cables. Todas ellas se basan en hacer uso de la gravedad para generar una fuerza que el usuario debe contrarrestar haciendo uso de los músculos de su cuerpo.



Imagen 1: Máquina que se basa en el levantamiento de pesos mediante poleas y cables. (Fuente: muscul-fitness.com)

Las primeras tecnologías inerciales para el entrenamiento se desarrollaron en los años 80 con el fin de que los astronautas que viajaban al espacio pudieran ejercitarse en una situación de ingravidez, evitando así la pérdida de masa muscular y densidad ósea que deriva de la falta de gravedad durante periodos largos de tiempo. Los doctores H. Berg y P. Tesch [1] desarrollaron en el Instituto de Karolinska (Estocolmo) un sistema de entrenamiento basado en el volante de inercia (en inglés *flywheel*).

El volante de inercia es un elemento pasivo que aporta únicamente inercia adicional al sistema de manera que cuando el par motor que lo está propulsando cesa, este continúa su movimiento por la energía cinética que tiene por el hecho de tener masa y estar girando a cierta velocidad angular:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$



Imagen 2: El astronauta de la Agencia Espacial Europea Frank De Winne, comandante de la expedición 21, realiza los pasos de activación y verificación del nuevo dispositivo de ejercicio inercial (FWED) en el laboratorio Columbus de la Estación Espacial Internacional. (Fuente: images.nasa.gov)

2.1. Ventajas del Entrenamiento Inercial

Las ventajas del entrenamiento inercial provienen del esfuerzo excéntrico. Los ejercicios con máquinas inerciales están compuestos por dos fases: la fase concéntrica y la fase excéntrica. La fase concéntrica es aquella en que el usuario aplica una fuerza tirando de la cuerda, mientras que la fase excéntrica es aquella en que la máquina, mediante la cuerda, tira de ti con la inercia generada en la primera fase.

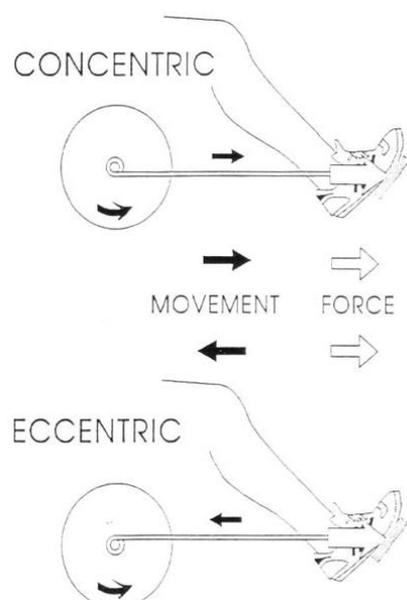


Figura 2: Diagrama del movimiento excéntrico y concéntrico. (Fuente: Isda.jsc.nasa.gov)

Para realizar un ejercicio continuo, el usuario debe frenar, con un esfuerzo excéntrico, toda la inercia y así poder tirar de la cuerda otra vez. La transición de esfuerzo concéntrico a excéntrico es una acción que se da en muchos deportes que implican aceleración, frenada y aceleración otra vez como puede ser el tenis, balonmano, rugby,... Las máquinas inerciales reproducen esta transición y el hecho de poder entrenarla supone un factor clave para el rendimiento en muchos deportes. Es en esta sobrecarga excéntrica y en la transición que recaen las ventajas del entrenamiento inercial.

En un estudio de Norrbrand L. (2010) [2] se investigaron las diferencias al realizar el ejercicio de extensión de rodilla con una máquina convencional o con una inercial con 70 jóvenes que no practicaban deporte habitualmente. Los resultados de este estudio demostraron que la activación muscular en el grupo que había entrenado con máquina inercial era mucho mayor, sobre todo en la fase excéntrica del movimiento, que en el grupo que había entrenado con una máquina convencional. Asimismo, los sujetos que entrenaron con máquina inercial también presentaron una mayor hipertrofia muscular debida a la mayor tensión muscular que se da en la fase excéntrica a causa de la inercia de la máquina.

Otro estudio, llevado a cabo por Nuñez (2017) [3], comparó las diferencias que había en el rendimiento de dos grupos de jugadores de rugby al realizar el ejercicio *high pull*. Un grupo entrenaba con máquina inercial y el otro con levantamiento de peso libre. Los resultados mostraron una mejora significativa del rendimiento en el grupo que había entrenado con una máquina inercial. Concretamente era mayor la aceleración, fuerza excéntrica y velocidad pico en comparación al grupo que había entrenado con pesos libres.

Recientemente, en 2017, se demostró científicamente los beneficios del trabajo con máquinas inerciales en deportistas y sujetos sanos respecto al trabajo con resistencia gravitatoria tradicional. En el artículo de Maroto-Izquierdo [4] se probó una diferencia significativa en los resultados con los distintos métodos de ejercicio muscular. Se demostró que los sujetos que habían entrenado con lo que se denomina "*Flywheel resistance training with eccentric overload*", que es el método de entrenamiento que usa máquinas basadas en el disco de inercia, mostraban mejoras significativas en los siguientes aspectos:

- Altura en salto vertical
- Hipertrofia muscular
- Potencia muscular
- Velocidad al correr
- Fuerza concéntrica y excéntrica

También se ha demostrado recientemente los beneficios del entrenamiento inercial en la población de edad avanzada. Mariusz Naczka [5] llevó a cabo un estudio en el que se sometía a 20 ancianos de 65 años o más de una residencia a un entrenamiento con tecnología inercial durante 6 semanas. Demostró que los sujetos que habían entrenado con esta metodología mostraban un aumento de la fuerza muscular en las extremidades superiores e inferiores del 23,3% y 40,6% respectivamente. Además, el entrenamiento inercial es mucho menos agresivo con las articulaciones y hay menor estrés cardiovascular.

Entre otros beneficios se encuentra la reducción del tiempo de recuperación de lesiones y tendinopatías, mayor prevención de lesiones y una mejor relación beneficio/tiempo.

2.2. Tipos de Máquinas Inerciales

Actualmente las máquinas inerciales utilizadas en el ámbito deportivo se basan en dos mecanismos parecidos pero distintos: el *flywheel* o volante de inercia y el cono de inercia. La principal diferencia entre estos dos mecanismos es que con el volante de inercia puedes realizar ejercicios con niveles altos de fuerza a velocidades excéntricas bajas o moderadas mientras que con la polea se pueden realizar ejercicios más específicos a una velocidad alta, pero con niveles de fuerza moderados.

- *Flywheel* o volante de inercia:



Imagen 3: Máquina inercial basada en el volante de inercia. (Fuente: einerzial.com)

Es un mecanismo esencialmente sencillo que consta del volante de inercia unido a un eje al que se enrolla una cuerda o correa. El usuario hará girar el volante tirando de la cuerda y provocando un momento respecto al eje de rotación. Al ser el eje una barra cilíndrica, el momento que el usuario es capaz de hacer depende del radio de la barra que normalmente

no es muy gruesa. Por este motivo, se debe realizar una gran fuerza excéntrica para frenar la rotación del disco. En muchas máquinas, al disco se le puede añadir pesos o incluso más discos para aumentar a voluntad la inercia del sistema y de este modo la resistencia del ejercicio. Si se añaden pesos, estos se deben distribuir de forma simétrica para evitar vibraciones no deseadas. Hay cada vez más máquinas que incluyen el mecanismo del volante de inercia de diferentes maneras con tal de ejercitar distintos grupos musculares. Entre ellas encontramos las siguientes:

- *Yoyo Squat o máquina de sentadillas*



Imagen 4: Yoyo Squat (Fuente: spartantraining.se)

El *Yoyo Squat*, denominado así por la empresa sueca que lo inventó (*YoYo Technology*), es el más común de estos dispositivos, el eje del volante va fijado a una plataforma donde se posa el usuario. Este deberá usar un arnés al que se une la correa con la cual, mediante el movimiento de sentadilla (en inglés *squat*), hará girar el volante. La inercia del volante tirará del usuario hacia abajo, este deberá activar la musculatura de las piernas y el abdomen para oponerse a este movimiento y tirar de nuevo hacia arriba.

- *Leg Curl o máquina de flexión de piernas*

Esta máquina se usa para trabajar principalmente los isquiotibiales junto con otros músculos de las piernas. En este caso se parece mucho a la máquina gravitatoria usada para trabajar este grupo muscular, pero sustituyendo las poleas y el levantamiento de peso por una correa y, en el caso de la imagen, dos discos de inercia unidos al mismo eje.



Imagen 5: Leg Curl (Fuente: spartantraining.se)

- *Knee extensión o máquina de extensión de rodillas*



Imagen 6: Knee Extension (Fuente: spartantraining.se)

Este dispositivo se usa para trabajar los cuádriceps y ocurre lo mismo que en el último ejemplo, se sustituyen las poleas y el conjunto de pesos y en su lugar se pone una correa y los discos de inercia unidos por el mismo eje.

- *Multigym o máquina multi-ejercicios*

Estas son máquinas muy versátiles con las que se pueden realizar muchos ejercicios diferentes enfocados a trabajar distintos músculos.



Imagen 7: Multigym inercial (Fuente: tnr-world.com)

- Polea inercial cónica:



Imagen 8: Polea Inercial Cónica. (Fuente: tiendaprimdefisio.com)

Este dispositivo está constituido por un cono fijado a un disco de inercia, este está unido a un soporte que le permite girar sobre el eje que pasa por su centro y perpendicular a la

base del cono. La cuerda se enrolla alrededor del cono y le transmite la fuerza que realiza el usuario sobre ella. Una vez en movimiento, la cuerda transmitirá la inercia del cono y tirará del usuario, haciendo que este deba hacer fuerza para frenarla y acelerarla otra vez en el otro sentido.

La polea es más versátil que el volante de inercia ya que mediante diferentes modificaciones se puede conseguir distintos niveles de resistencia. Normalmente la mayoría de los dispositivos permiten fijar la polea a distintas alturas con tal de poder variar el momento que se hace al tirar de la cuerda y añadir o quitar pesos para aumentar la inercia o disminuirla.

A más altura, menos radio tiene el cono por lo que se genera un momento menor y hay menos aceleración, de lo que resultan ejercicios a una velocidad más baja, pero con mucha resistencia. Por el contrario, si la polea está situada a una altura baja respecto a la base del cono, el radio de éste es mayor por lo que el momento de fuerza que se puede realizar también es mayor. Con esto se consiguen ejercicios con menos resistencia a velocidades más altas.

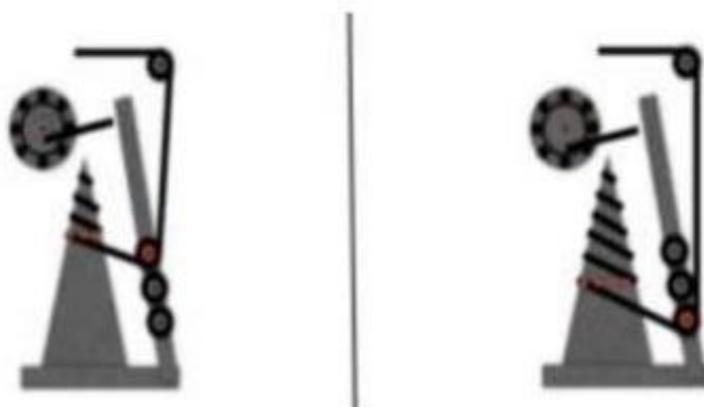


Figura 3: Polea Inercial Cónica fijada a diferentes posiciones. (Fuente: living4football.club)

Aunque no haya carga gravitatoria la masa sigue aportando inercia al sistema. Algunas poleas permiten enroscar unos pesos simétricamente alrededor del cono, fijados al disco de la base, con tal de aportar más inercia y de esta manera aumentar la resistencia. Gracias a la opción de fijar la polea a diferentes alturas y agregarle diferentes pesos se pueden realizar ejercicios con mucha variedad de resistencia y velocidad.

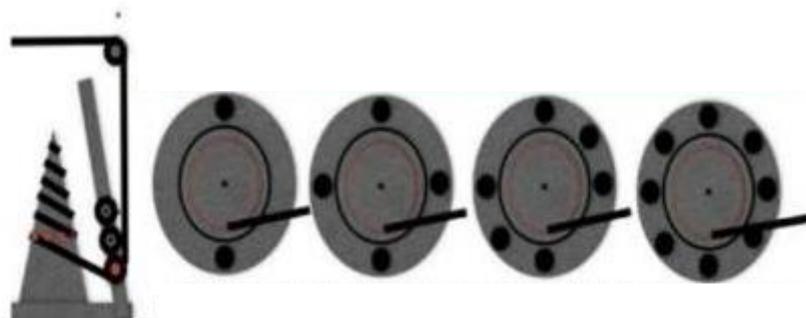


Figura 4: Polea Inercial Cónica con distinto número de pesos colocados de forma equilibrada. (Fuente: living4football.club)

Otra ventaja de las poleas cónicas es que se pueden combinar con otras poleas, estructuras y agarres para realizar múltiples ejercicios adaptados a las necesidades de cada usuario. En las siguientes imágenes se pueden ver diferentes montajes de la polea con múltiples accesorios para realizar ejercicios específicos.



Imagen 9: Ejercicio de abdominales



Imagen 10: Ejercicio de cuádriceps



Imagen 11: Ejercicio de tríceps



Imagen 12: Ejercicio de isquiotibiales

(Fuente: vimassport.com)

Hay poleas que incorporan electrónica. Gracias a un sensor rotatorio se pueden conocer los valores de potencia y aceleración tanto excéntrica como concéntrica. De esta manera se puede estudiar y monitorizar el entrenamiento con datos precisos a tiempo real. Normalmente la electrónica viene acompañada de una interfaz para que se puedan visualizar estos valores en una tablet o un teléfono móvil.

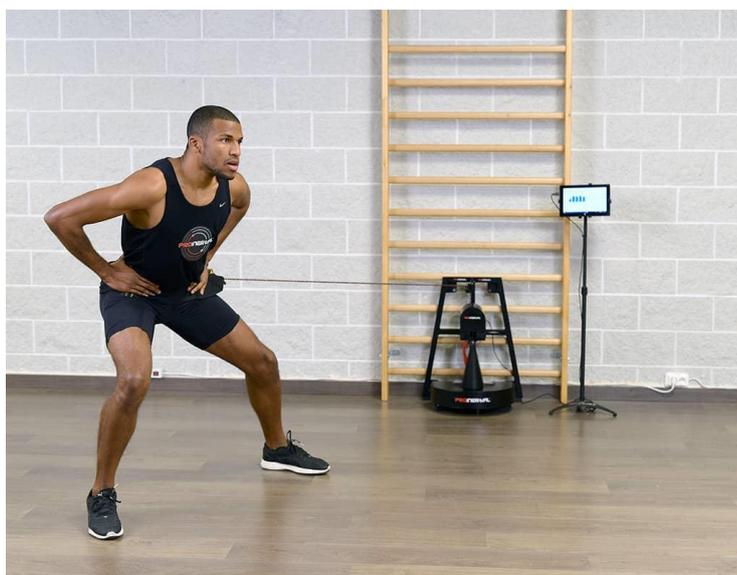


Imagen 13: Polea Inercial Cónica con sensor rotatorio conectada a una Tablet (Fuente: proinertial.com)

2.3. Precios de mercado

A continuación, se muestra los principales dispositivos inerciales del mercado y sus fabricantes. También se especifica el rango de precios sin IVA.

Principales fabricantes de dispositivos inerciales para el entrenamiento: *Proinertial*, *Inverti*, *RSP Inercial Performance*, *Versa Climber*, *YoYo Technology*, *Byomedic System*, *Prim Physio*, *Etenon*, entre otros, aunque estos son los más conocidos en el mundo del entrenamiento inercial.

- Poleas cónicas:
 - Básica: 700€ - 1400€.
 - Con estructura: 1000€ - 1800€.
 - Con sensor: 1500€ - 2000€.



Imagen 14: De izquierda a derecha, polea inercial cónica básica, polea inercial con estructura y polea inercial con sensor. (Fuentes: ossfitness.com, proinertial.com)

- Máquina de sentadillas: 1500€ - 3500€.



Imagen 15: Máquina de sentadillas también denominada YoYo Squat. (Fuente: byomedicsystem.com)

- Máquina de flexión de piernas o *Leg Curl*: 3500€ - 5500€.



Imagen 16: Máquina de flexión de piernas o Leg Curl. (Fuente: tmr-world.com)

- Máquina de extensión de rodillas o *Knee Extension*: 3500€ - 5500€.



Imagen 17: Máquina de extensión de rodillas o Knee Extension. (Fuente: tmr-world.com)

- Máquinas multi-ejercicios:

- Remo: 3500€ - 6000€

- *Multigym*: 4000€ - 7500€



Imagen 18: Máquina inercial de remo (izquierda) y Multigym (derecha). (Fuente: tmr-world.com)

3. Especificaciones

En este apartado se definirán los requerimientos básicos que debe cumplir el diseño.

3.1. Polea Inercial Cónica

Polea Inercial cónica:

- Modularidad: Debe tener un formato reducido y compacto para poder ser transportada y manipulada con facilidad. Se debe poder acoplar y fijar a los diferentes módulos de manera rápida y sencilla.
- Dimensiones: No debe ser más grande de 0,3x0,3x0,3 metros.
- Masa: < 15kg.
- Resistencia a la corrosión.
- Vida útil: más de 5 años.
- Precio aproximado de venta: 800€ – 1300€. Se estima que el coste de fabricación se sitúa normalmente alrededor del 30% del precio de venta.

3.2. Módulo 1: *Leg Curl*

Módulo 1, *Leg Curl*:

- Modularidad: Debe tener un alojamiento para fijar la polea cónica.
- Comodidad: Es necesaria una superficie blanda donde repose el usuario, para que pueda realizar los ejercicios sin clavarse la estructura.
- Resistencia a la corrosión.
- Masa: 40 kg - 70 kg.
- Dimensiones:
 - Ancho: de 257 mm a 360 mm.
 - Altura: 842 mm y 1028 mm.

Estas dimensiones se justifican posteriormente en el diseño conceptual con el uso de datos de tablas antropométricas de la población española.

- Rigidez: Debe poder soportar el peso de una persona adulta con cierto margen de seguridad. En este caso se fija en el percentil P95 ya que es el más restrictivo y, como se observa en la Tabla 1, el peso es de 92,7 kg.
- Vida útil: más de 5 años.
- Precio aproximado de venta: 1500€ - 2500€. Se estima que el coste de fabricación se sitúa normalmente alrededor del 30% del precio de venta.

3.3. Módulo 2: Remo

Módulo 2, Remo:

- Propiedades: Debe tener un alojamiento para fijar la polea cónica y soportar el peso de una persona adulta. Debe tener un asiento móvil que se pueda deslizar por unas guías, y que se pueda fijar a voluntad.
- Dimensiones: De 1,7 a 2 metros de largo, de 0,5 a 0,7 metros de alto y 0,7 a 1 metro de ancho. Para estos rangos de dimensiones se ha estudiado las medidas de las máquinas de remo convencionales del mercado.
- Masa: 60 kg - 80 kg.
- Resistencia a la corrosión.
- Rigidez: Debe poder soportar el peso de una persona adulta con cierto margen de seguridad. En este caso se fija en el percentil de población P95 ya que es el más restrictivo y, como se observa en la Tabla 1 en el apartado de diseño conceptual, el peso es de 92,7 kg.
- Vida útil: más de 5 años.
- Precio aproximado de venta: 2500€ - 3500€. Se estima que el coste de fabricación se sitúa normalmente alrededor del 30% del precio de venta.

4. Diseño Conceptual

Antes de realizar el diseño definitivo se ha realizado diferentes diseños intentando conseguir el equilibrio entre los siguientes requisitos:

- Minimizar el coste
- Minimizar el peso
- Conseguir una estructura robusta y que transmita una buena sensación de rigidez y estabilidad
- Modularidad

Para eso se ha hecho un estudio previo sobre qué formas deberían adoptar los tres dispositivos que se pretende diseñar, así como de qué manera se pueden unir entre sí.

- Polea inercial cónica
- Estructura Remo
- Estructura *Leg Curl*

4.1. Polea Inercial Cónica

Para el diseño de la Polea Inercial Cónica se estudió todas las formas y tamaños del mercado. Teniendo en cuenta que se debía cumplir con las especificaciones se planteó un primer diseño. Este primer diseño se enfocó en crear una estructura con una forma que permitiese ser transportada y fijada fácilmente. Se planteó el problema de cómo se uniría la polea a los otros módulos y se pensó en una primera solución fácil, efectiva y barata: tornillos y tuercas. Dando a la estructura de la polea inercial, inicialmente, una forma cúbica, se pensó que sería fácil crear un alojamiento donde fijarla en las dos otras máquinas. El diseño debía incorporar también el *flywheel* o volante de inercia y el cono, unidos a un eje que permitiera el giro sobre si mismos de estos elementos.

En cuanto a la inercia, la máquina debe tener un sistema para aumentar la inercia. Tal como está pensado el diseño, las ecuaciones que describen la inercia del conjunto son las siguientes:

$$I_{total} = I_{eje} + I_{cono} + I_{disco} + I_{peso} \cdot n; \quad n = n^{\circ} \text{ de pesos}$$

$$I_{eje} = \frac{1}{2} m r_{eje}^2$$

$$I_{cono} = \frac{3}{10}mr_{base}^2$$

$$I_{disco} = \frac{1}{2}mr_{disco}^2$$

$$I_{peso} = I_{CM} + md^2 = \frac{1}{2}mr^2 + md^2$$

Se quiere que, con todos los pesos, la inercia del sistema sea como mínimo del 50% respecto a la inercia sin ningún peso. De esta manera se consigue un amplio rango de resistencias a las que se pueden realizar los ejercicios.

4.2. Módulo *Leg Curl*

La estructura principal de este módulo está basada en las máquinas ya existentes, tanto inerciales como gravitacionales. Aun así, había que adaptar el diseño para poder fijar la polea cónica de manera que se pudiera poner y sacar fácilmente. También surge la problemática de la fijación, en distintas posiciones, de las barras acolchadas sobre las que se realiza la fuerza con la parte anterior de la pierna para realizar el ejercicio.

Por lo que respecta a las dimensiones En este caso se debe estudiar las medidas antropométricas de la población a la que va dirigido este producto. En este caso se trata a toda la población adulta como usuario potencial, más concretamente se han usado los datos antropométricos de la población laboral española. Como es común en el diseño ergonómico, se han empleado los percentiles P5 y P95 abarcando de esta manera al 90% de la población adulta. En este caso la estatura de la población, tanto de mujeres como hombres, entre el P5 i el P95 va de 1,525 metros a 1,803 metros. De esta manera definimos que la máquina debe tener una longitud de entre 1,8 y 2 metros, se define el límite superior para que la máquina no sea excesivamente grande y quepa en salas con espacio limitado.

Nº (Refer. ISO 7250:1996)	Designación	Tama · mue s. t.	Media	Desv. típica	Erro r típic o	Percentiles				
						P 1	P 5	P 50	P 95	P 99
I Medidas tomadas con el sujeto de pie (mm)										
1 (4.1.1)	Masa corporal (peso, kg)	1711	70,46	12,70	0,307	46,9	51,0	70,0	92,7	102,8
2 (4.1.2)	Estatura (altura del cuerpo)	1723	1.663,23	83,89	2,021	1.479	1.525	1.665	1.803	1.855
3 (4.1.3)	Altura de los ojos	1722	1.557,96	82,31	1,985	1.382	1.423	1.558	1.699	1.747
4 (4.1.4)	Altura de los hombros	1722	1.382,12	76,28	1,838	1.217	1.256	1.384	1.508	1.558
5 (4.1.5)	Altura del codo	1721	1.027,24	58,03	1,399	900	932	1.027	1.122	1.165
6 (4.1.6)	Altura de la espina ilíaca	1524	934,46	56,59	1,452	806	842	934	1.028	1.066
7 (4.1.8)	Altura de la tibia	1374	451,78	36,56	0,986	377	398	449	515	548
8 (4.1.9)	Espesor del pecho, de pie	1722	249,16	26,91	0,648	192	208	248	294	320
9 (4.1.10)	Espesor abdominal, de pie	1719	230,05	39,81	0,960	154	168	229	297	327
10 (4.1.11)	Anchura del pecho	1722	308,20	32,80	0,790	237	257	309	360	385
11 (4.1.12)	Anchura de caderas (de pie)	1723	343,30	24,31	0,586	288	306	342	385	404

Tabla 1: Tabla de valores con los datos antropométricos de la población laboral española. (Fuente: documentacion.fundacionmapfre.org)

En cuanto al ancho, se ha utilizado los datos del ancho de pecho. En este caso las medidas del P5 al P95 son de 257 mm a 360 mm por lo que el ancho de la camilla debe rondar este último valor, por otra parte, el ancho de las patas se definirá analizando las condiciones de vuelco.

Para la altura de la máquina se ha contemplado que debe estar ligeramente por debajo de la altura de la cintura, ya que es a esta medida que es más fácil inclinarse sobre la máquina y apoyar el pecho y las rodillas sobre esta. Se han usado las medidas de la altura de la espina iliaca situada en la parte superior de la cadera, en este caso los percentiles P5 y P95 se sitúan en 842 mm y 1028 mm.

4.3. Módulo Remo

Este módulo, junto con la polea, son los que suponían un desafío de diseño más grande. Para la estructura principal se usó como referencia las máquinas de remo convencionales, aunque se debía modificar la estructura para poder alojar la polea inercial como en el módulo *Leg Curl*. Normalmente estas máquinas tienen un asiento deslizante y un

reposapiés fijo. La resistencia que oponen al movimiento usualmente se genera mediante resistencia magnética, resistencia aerodinámica, resistencia hidrodinámica e incluso con cilindros hidráulicos.



Imagen 19: Máquina de remo convencional de resistencia por aire. (Fuente: norditrack.es)

Después se planteó dónde se situaría la polea y en que orientación. Se decidió ponerla en la parte delantera y en posición vertical ya que parecía que era su posición natural, ya que era donde la cuerda tiene menos recorrido por lo que resulta más fácil mantenerla tensa durante el ejercicio.

5. Diseño Detallado

En este apartado se explicará y justificará el diseño de cada una de las tres estructuras, así como los elementos usados y las uniones entre ellos.

5.1. Polea inercial Cónica

Ésta estructura planteaba diversos retos a la hora de concebir su diseño definitivo. Se debía solventar el problema de cómo se iban a unir el cono, el disco y el eje. Y, a su vez, cómo se unirá este conjunto a la estructura y los rodamientos. También se debió tener en cuenta el montaje del ensamblaje, qué pasos se deben seguir y que no resulte muy complicado. Primero definimos todas las piezas que componen el ensamblaje.

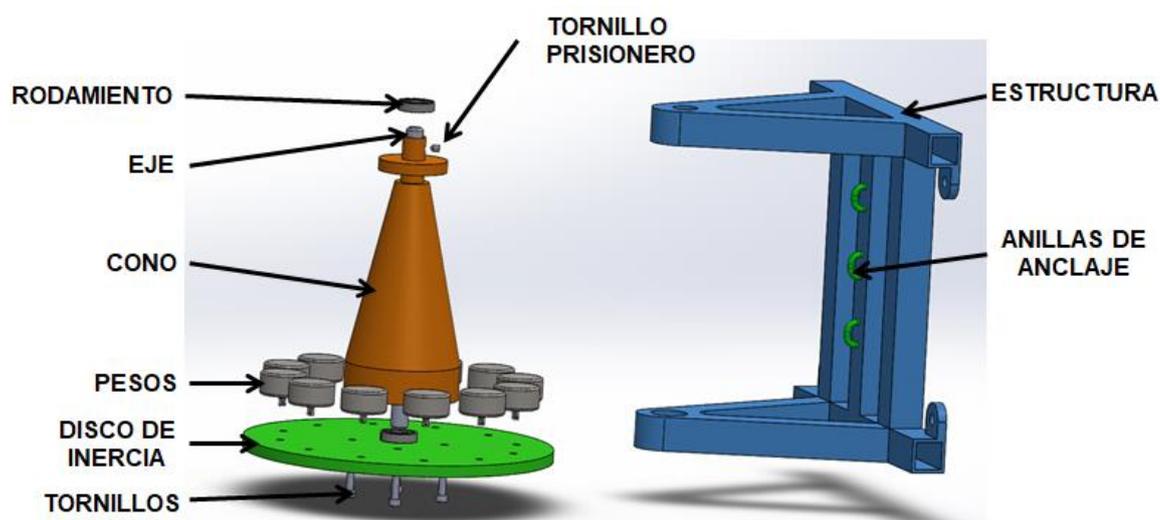


Figura 5: Vista explosión de los componentes del ensamblaje de la polea inercial cónica.

De esta manera se empezó a trabajar en el diseño del cono, disco y el eje. Cómo estos elementos deben girar solidariamente, se diseñaron para ser fijados por completo, el disco al cono y a su vez el cono y el disco con el eje. Esta unión debe ser muy concéntrica para que el eje de inercia coincida con el eje de giro y el centro de masas esté también sobre este eje. De esta forma se dice que el sistema está equilibrado, si no lo estuviera el sistema tendría vibraciones no deseadas.

Con la fabricación del primer prototipo se testaría si se ha conseguido un sistema equilibrado, de lo contrario se realizaría un mínimo rediseño para solventarlo.

La unión del disco con el cono se hace mediante 4 tornillos de M6x30 con cabeza

hexagonal, el disco tiene los cuatro taladros y un alojamiento para la cabeza de los tornillos, y por su banda, el cono tiene cuatro taladros roscados. De esta manera, cuando se alinean sus agujeros, se pueden unir con facilidad. El disco tiene 12 agujeros roscados donde pueden fijarse los pesos, que aportan inercia adicional al sistema. Los pesos deben distribuirse simétricamente respecto al eje de rotación y siempre debe haber un número par de pesos en total, de esta manera se evitan vibraciones y cargas no deseadas en los rodamientos. Exactamente, el incremento de inercia si comparamos el sistema sin pesos con el sistema con pesos es del 87.94%, este valor se ha obtenido usando las ecuaciones del apartado 4.1 en el diseño conceptual.

Las uniones del eje se realizan mediante un tornillo prisionero de M6x6 Allen, sin cabeza, que atraviesa las dos piezas. Por arriba, el cono y el eje, y por debajo el disco y el eje.

Seguidamente se justifica y desarrolla cómo los rodamientos unen el conjunto anterior con la estructura.

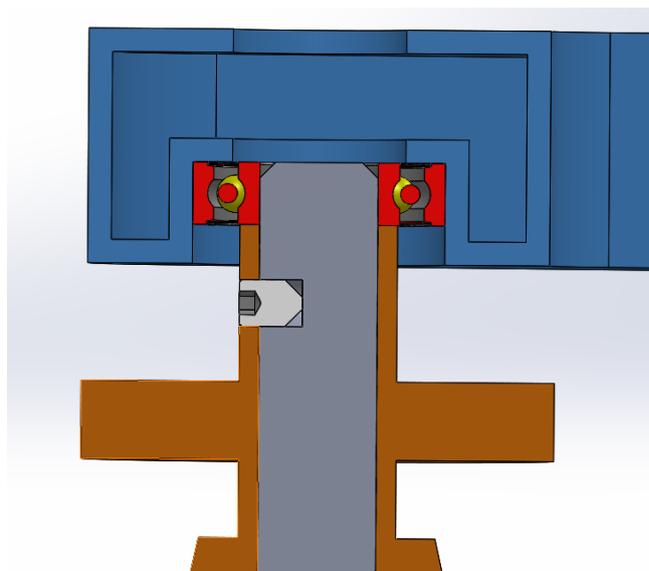


Figura 6: Vista de sección de la unión superior del eje, el rodamiento y la estructura.

Como se aprecia en la figura 6, en la parte superior de la máquina la pieza, el cono toca el aro interior del rodamiento y el aro exterior está en contacto con el alojamiento de la estructura. Este alojamiento tiene dos agujeros para poder meter y sacar el eje, si se quiere o fuera necesario.

Lo mismo ocurre en la parte inferior, allí es la parte que sobresale hacia abajo del disco la que contacta con el aro interno del rodamiento y apoya todo el peso del conjunto eje-cono-disco sobre él. Es por eso que cuando la estructura se encuentre en posición vertical (cuando está unida al módulo Remo) el rodamiento soportará el esfuerzo axial del peso y el

esfuerzo radial de la fuerza del usuario. Por el contrario, cuando esté en posición horizontal (cuando está unida al módulo *Leg Curl*) el rodamiento soportará únicamente carga radial. A su vez, el rodamiento, mediante el aro exterior contacta con la estructura de soporte, que tiene un alojamiento del mismo tamaño. Este alojamiento está agujereado con dos propósitos: el primero es que el extremo del eje no roce con nada, y el segundo es más enfocado al montaje. Para poder montar y desmontar el conjunto, el eje entrará y saldrá por estos dos agujeros. Además, si se quisiera, se podría incorporar un sensor rotatorio para implementar una interfaz de monitorización del ejercicio gracias a estos agujeros.

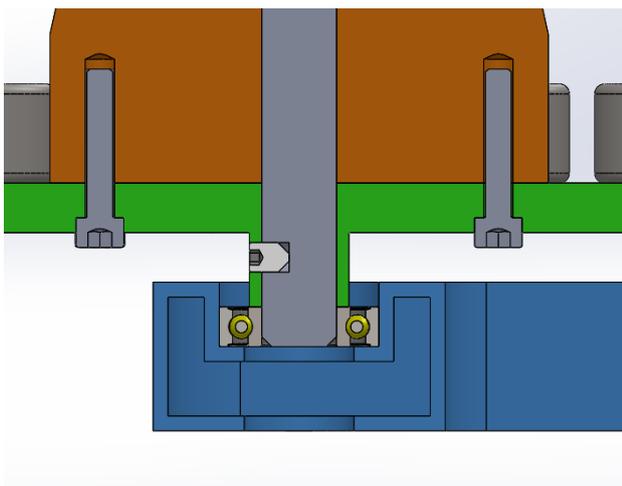


Imagen 20: Vista de sección de la unión inferior del eje, el rodamiento y la estructura.

Finalmente, el diseño de la estructura que soportará todo el conjunto definido anteriormente se hizo pensando en que debe unirse tanto al módulo de Remo como al módulo de *Leg Curl*. Esta unión debe poder hacerse de manera fácil, rápida e intuitiva.

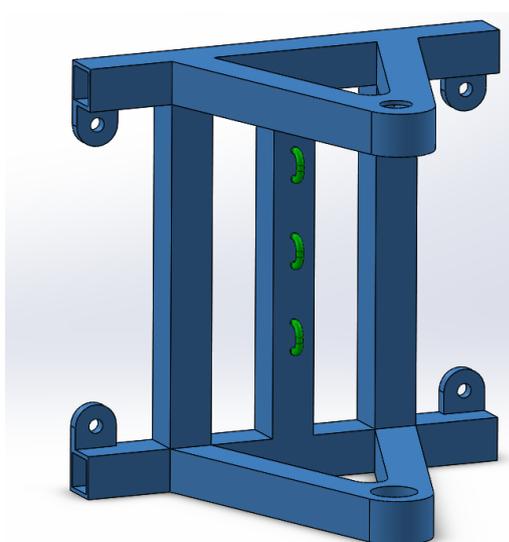


Figura 7: Estructura de la polea inercial cónica.

La estructura está formada por tubos de acero mecanizados de 3mm de grosor, soldados entre sí. Tiene la parte superior e inferior en forma triangular, lo que le da rigidez a la vez que se consigue un diseño estético y atractivo. Tiene cuatro salientes en la parte interior, con un taladro para M10, con los que se fijará a los dos módulos. Además, lleva soldadas tres anillas en la biga central con las que se podrá fijar una polea de baja fricción a tres alturas diferentes para así poder trabajar con distintos niveles de resistencia.

5.2. Módulo Leg Curl

En módulo hay varias piezas que merecen ser explicadas con detalle para la correcta comprensión del funcionamiento de dicha máquina. Por una parte, tenemos el alojamiento donde se fijará la polea cónica inercial y por otra banda nos centraremos en la articulación y el sistema de regulación de las diferentes posiciones del soporte para los pies.

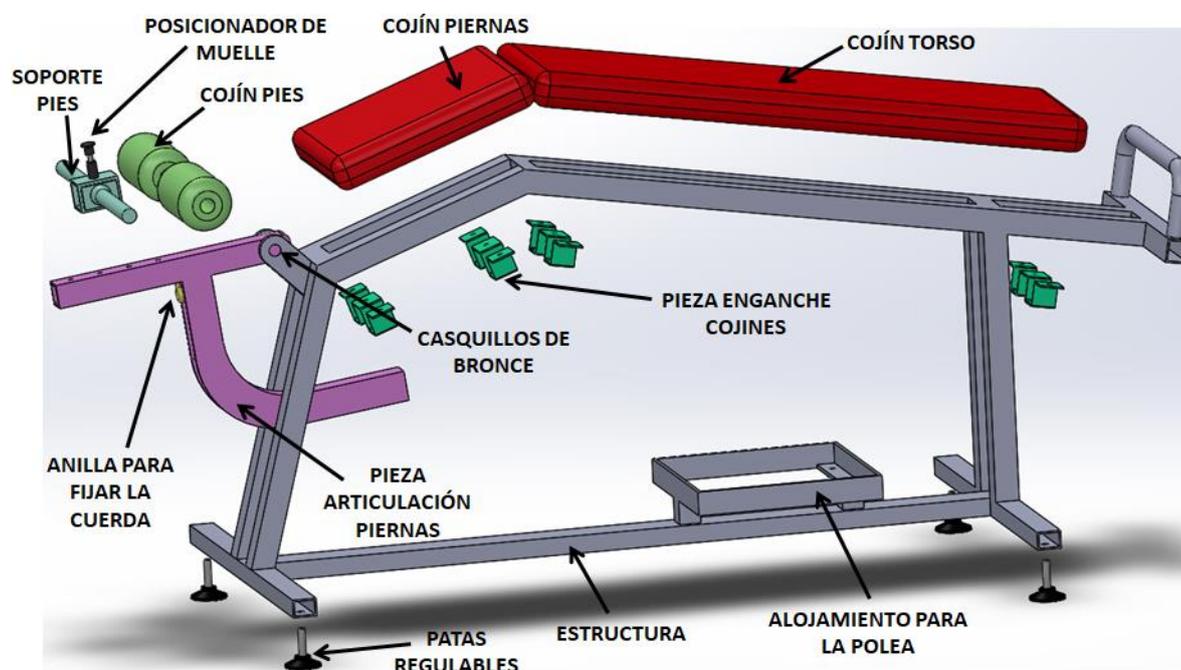


Figura 8: Vista explosionada de los componentes del ensamblaje del módulo Leg Curl.

La estructura base de este módulo está basada en la de las máquinas de gimnasio que ya existen, pero con las modificaciones necesarias para poder funcionar como máquina inercial. Se substituye el sistema de cables i pesos por la polea inercial cónica y una cuerda que le transmite la fuerza. Para ello hay que diseñar piezas que permitan este sistema. Primero se diseñó la articulación que realiza el movimiento, el único subensamblaje móvil de la máquina.

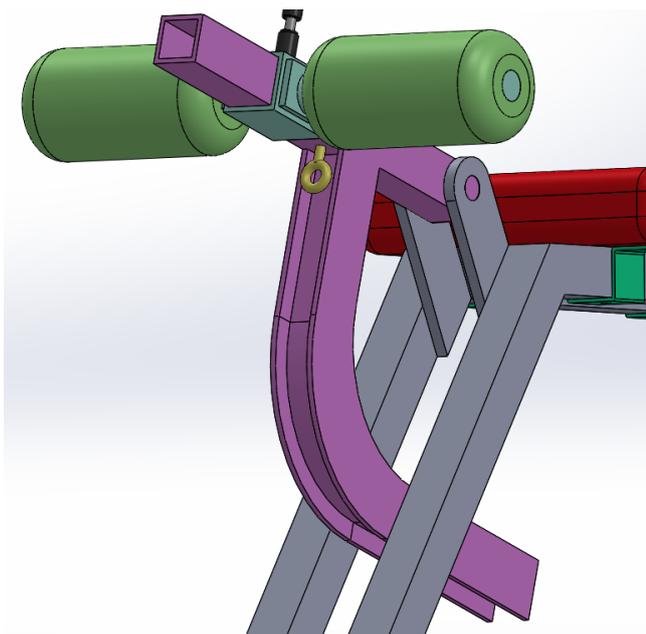


Figura 9: Articulación que permite el movimiento de las piernas.

La articulación se ha hecho con dos casquillos de bronce con valona auto lubricados. Estos casquillos, también denominados cojinetes de deslizamiento, están hechos de bronce sinterizado empapado en aceite, por lo que son auto lubricantes. No precisan de ningún mantenimiento.



Imagen 21: Casquillo de bronce con valona auto lubricado usado en el módulo Leg Curl. (Fuente: norelem.com)

De esta manera se evita que el rozamiento dañe las piezas o produzca desgaste. Esta pieza móvil es la que permitirá, mediante los pies del usuario, tirar de la cuerda de la polea inercial para realizar el ejercicio. Como se puede apreciar en la figura 9 a esta pieza se le roscará un cáncamo macho de M10x15 para poder anudar la cuerda, esta cuerda a su vez

pasará por el canal que se le ha preparado, para que no pueda desviarse durante los ejercicios.

Este canal servirá también para guiar la cuerda hacia la polea inercial, a la altura correspondiente y facilitar así que haya tensión en la cuerda durante la realización de los ejercicios.

Para regular la altura del soporte para los pies y de esta manera poder ser una máquina útil para un mayor rango de personas con diferentes medidas se ha diseñado las siguientes piezas. El soporte consiste en un prisma rectangular de 1 mm por banda más que el tubo al que pasa por encima. A este prisma van unidos los dos cilindros que harán de soporte para cada uno de los pies. Se fija mediante un pasador cilíndrico con muelle de una sola posición, que gracias a los agujeros que presenta la pieza móvil de la articulación permite que este entre y se fije toda la pieza en las distintas posiciones.

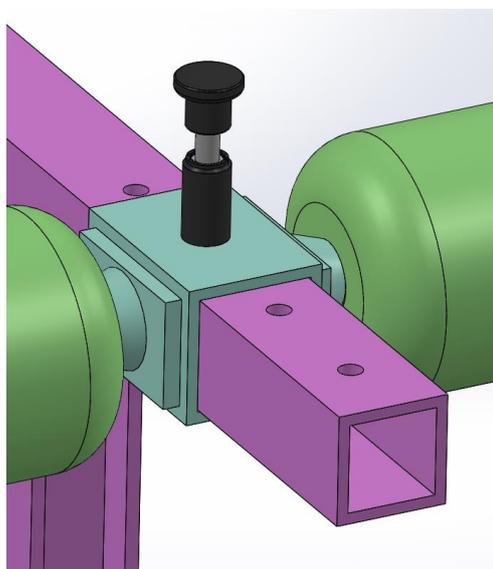


Figura 10: Soporte para los pies con el posicionador de muelle que se desliza arriba y abajo por la pieza guía y permite fijarse a diferentes alturas.

El alojamiento para la polea inercial consiste en un marco, con las dimensiones de la estructura de la polea a las que se le ha añadido 3 mm, lo suficiente como para que pueda entrar sin dificultades, pero no pueda salirse si se somete a esfuerzos de cizalla. El marco es vacío para ahorrar material, lo que implica una reducción de coste y de peso, cosa que beneficia al diseño. El marco se encuentra elevado para que la altura a la que quedará la polea coincida con la altura a la que le llegará la cuerda desde la articulación.

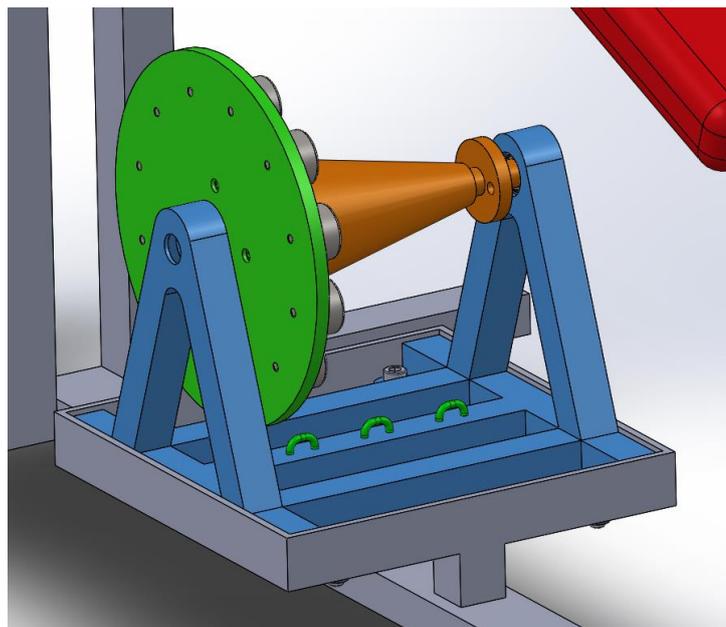


Figura 11: Alojamiento con la polea inercial cónica acoplada y fijada.

El marco tiene 4 agujeros que encajan con los de la estructura de la polea y, detrás, unos insertos roscados (por ejemplo de la marca PEM), que en el proceso de fabricación se han unido a la chapa. En estos insertos se roscarán tornillos de M10x25 para fijar ambas estructuras.

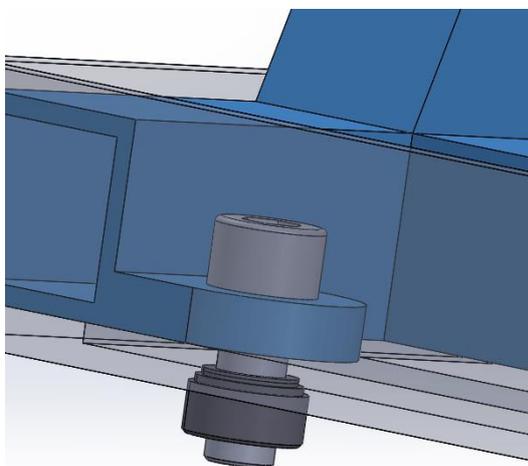


Figura 12: Detalle del tornillo que fija la polea inercial cónica a su alojamiento.

De la misma manera se roscarán las cuatro patas a la estructura, de esta manera se consigue poder regular la altura y evitar que la estructura cojee de alguna pata.

Para finalizar, las piezas acolchadas que permiten al usuario tumbarse sobre la estructura se han unido a la estructura mediante unas piezas de chapa doblada que las fija en su

posición mediante tornillos, que se roscarán tanto a la estructura de acero como a los cojines.

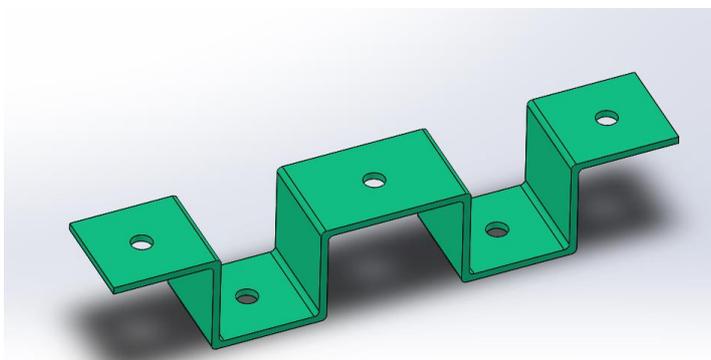


Figura 13: Pieza que une los cojines a la estructura.

5.3. Módulo Remo

Este módulo es el que más tiempo ha consumido de diseño, ya que tiene partes como el asiento móvil que lo hacen un poco más sofisticado que los otros. Posee varios elementos en común con el módulo *Leg Curl*. El sistema de fijación a distintas posiciones del asiento del Remo es el mismo que se utiliza para fijar el soporte para los pies en el *Leg Curl*, también comparten el mismo sistema para regular la altura de las patas, así como el alojamiento para la polea. En este último caso, pero, la polea estará en posición vertical y no tumbada horizontalmente como lo está en el módulo *Leg Curl*.

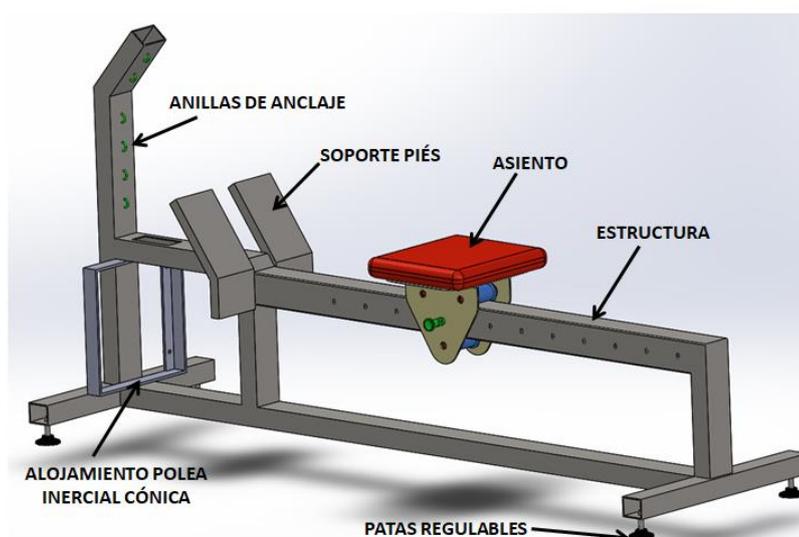


Figura 14: Módulo Remo con sus componentes

El asiento está diseñado para poder rodar sobre la estructura por si se quiere realizar ejercicios con el asiento móvil. Este movimiento debe ser suave y sin roces para no entorpecer la experiencia del usuario. El asiento debe también poder fijarse en diferentes posiciones, para adaptarse a las diferentes alturas de los usuarios, si se quiere realizar ejercicios con el asiento fijo.

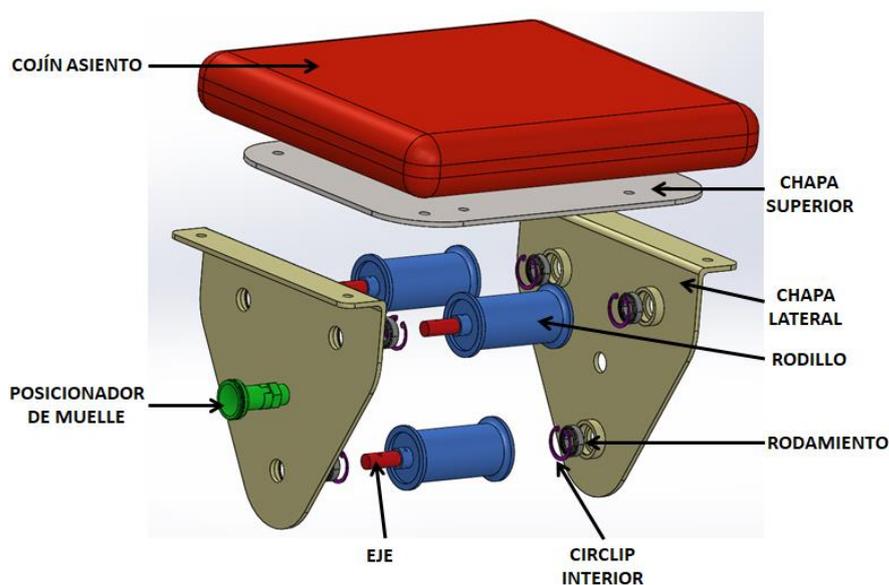


Figura 15: Vista explosionada de las piezas que componen el asiento móvil.

La estructura del asiento consta de tres piezas, dos laterales y la tapa superior. Estos se unirán mediante tornillos. El contacto con la biga principal de la estructura será con unas piezas de plástico, dos en la parte superior, para conseguir estabilidad y uno en la parte inferior, para evitar que el asiento pueda salirse del carril. Para el asiento, sería muy deseable realizar una fase de experimentación con el primer prototipo y posteriormente, si fuera necesario, rediseñar hasta conseguir suavidad en el movimiento.

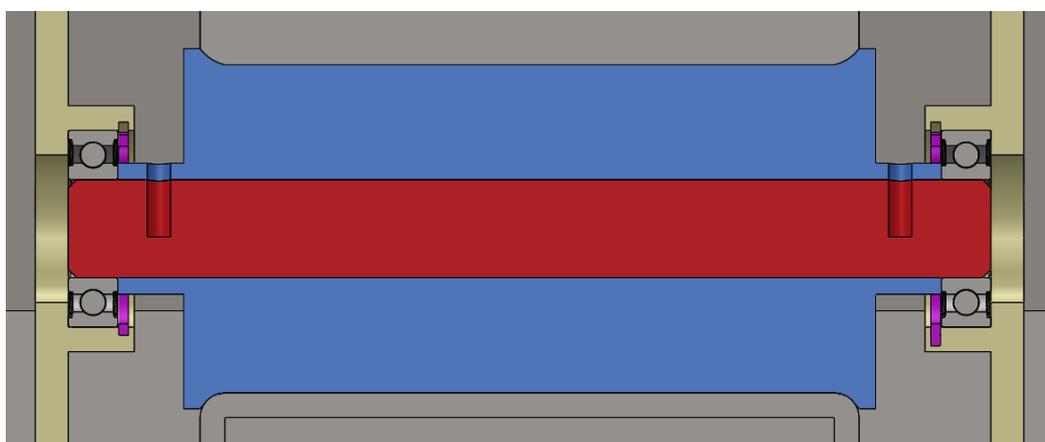


Figura 16: Vista de sección de las piezas que permiten que el asiento se desplace por la guía.

También sería recomendable hacer pruebas del comportamiento de estas piezas con distintos materiales como la poliamida (nylon), PTFE (teflón) o PC (policarbonato). Estas piezas de plástico encajan perfectamente con las esquinas del tubo de acero que conforma la biga mediante unos ángulos que evitan el desplazamiento lateral del conjunto. Los cilindros de plástico girarán solidariamente a los ejes, unidos mediante dos tornillos prisioneros Allen M3x8. Los ejes a su vez estarán en contacto con el aro interior de los rodamientos para permitir un giro con baja fricción. Las piezas laterales incorporarán tres alojamientos para los tres rodamientos, en los que se encajarán y así se evita su desplazamiento en la dirección radial. Para evitar el desplazamiento en la dirección axial los alojamientos tienen unas ranuras para un circlip interior que contacta con el aro exterior de los rodamientos y de esa forma restringe su movimiento.

Las piezas que sirven para apoyar los pies consisten en chapa de acero doblada y soldada, que se unirán a la estructura principal también mediante soldadura.

Como en el módulo *Leg Curl*, las patas son regulables y van atornilladas a la base de la estructura principal. También se usa el mismo método para el alojamiento de la estructura de la polea inercial, esta vez en cambio se dispone verticalmente para que, con la ayuda de otra polea, pueda transmitir la fuerza que realiza el usuario a través de la cuerda hacia la polea inercial.

5.4. Análisis de vuelco

Al ser estructuras que deben mantenerse de pie en todo momento y no volcar fácilmente, se deben aplicar un conjunto de medidas para que esto no ocurra. Como en este caso tratamos con estructuras pesadas, es muy importante realizar este análisis ya que al volcar podría causar lesiones de gravedad a los usuarios.

A este tipo de máquinas se le aplican una serie de normas y condiciones que debe cumplir:

- Si se le aplica a la máquina una fuerza de 250 N paralela al suelo y en el punto más alto, la máquina no vuelca.
- En el caso en que la máquina se incline más de 12° respecto su posición habitual, ésta debe volver a su estado inicial.
- Si se le aplica una fuerza de 800 N en dirección vertical y sentido de la gravedad en cualquier punto de la máquina, ésta no debe volcar.

Las condiciones de este análisis serán las que se encontraría un usuario en una máquina sin una persona encima, pero con la polea cónica montada, lo que le añade peso y baja su

centro de gravedad. El análisis será estático. Seguidamente se han realizado los cálculos para ambas estructuras.

1. Si se le aplica a la máquina una fuerza de 250 N paralela al suelo y en el punto más alto, la maquina no vuelca.

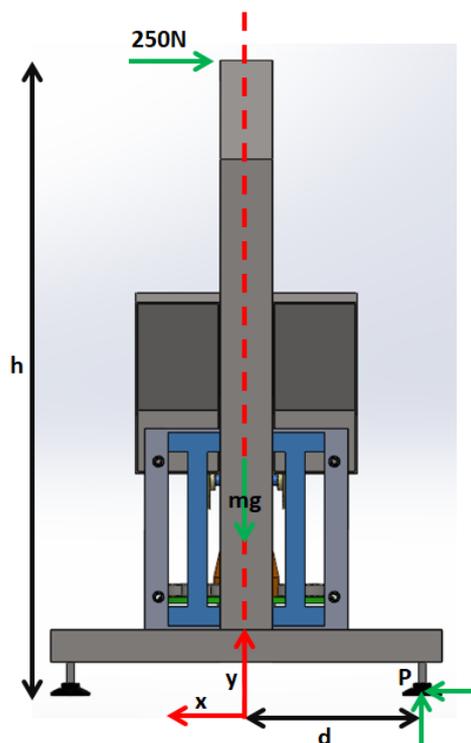


Figura 17: Diagrama de fuerzas sobre el módulo Remo en el caso n°1.

Como se aprecia en la figura 17, se ha realizado el diagrama de fuerzas que actúan sobre el módulo Remo en estas condiciones. Se ha realizado el mismo procedimiento para el módulo *Leg Curl*.

Al ser, ambas estructuras, simétricas respecto al plano y-z (plano que atraviesa longitudinalmente la pieza por la mitad), sabemos que el centro de gravedad caerá sobre este plano.

- El punto más alto del módulo *Leg Curl* se encuentra a 767 mm respecto el suelo. El conjunto pesa 563,39 N y el centro de masas se encuentra a una altura de 440 mm. El centro de masas se ha calculado a través del programa de diseño Solidworks, indicando los materiales de las piezas que forman el ensamblaje.
- Por otra banda, el punto más alto del módulo Remo lo encontramos a 943 mm. El

conjunto pesa 686,31 N y el centro de masas se encuentra a una altura de 287 mm.

Se trata del caso más extremo, en el que una fuerza horizontal produce el mayor momento, por lo tanto la fuerza se aplica en el punto más alto de la máquina. Se supone que, al aplicar la fuerza, en el momento antes del vuelco, no hay contacto en uno de los extremos (las dos patas de la izquierda) y toda la máquina se apoya sobre las patas de la derecha. Haciendo un diagrama de las fuerzas y reacciones planteamos la ecuación que debe cumplir. El sumatorio de los momentos respecto el punto P debe ser positivo para que la estructura no vuelque.

$$d > \frac{250 \cdot h}{m_{CM} \cdot g}$$

De esta manera se obtiene que la distancia 'd', que corresponde a la longitud de las patas, debe ser superior a 340 mm para el módulo *Leg Curl* y de 343 mm para el módulo de remo.

2. En el caso en que la máquina se incline más de 12° respecto su posición habitual, ésta debe volver a su estado inicial.

Al inclinarse 12°, la máquina pasará a apoyarse sobre las dos patas de un lado, este punto lo llamamos P. Al realizar el diagrama de fuerzas, debemos tener en cuenta las reacciones en el punto de contacto y la fuerza de gravedad que se aplica en el centro de masas.

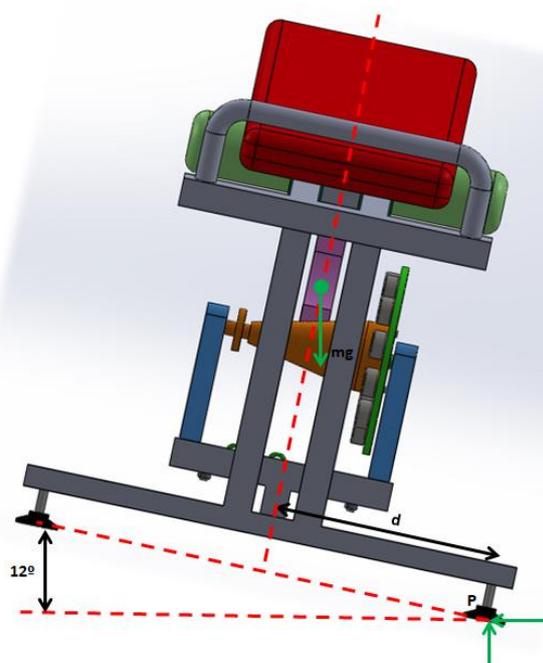


Figura 18: Diagrama de fuerzas sobre el módulo Leg Curl en el caso nº 2.

Para el análisis de vuelco hay que hacer el sumatorio de momentos respecto del punto P. Para que no vuelque, el sentido de giro debe ser antihorario. Como la única fuerza que produce momento es la de la gravedad, éste será antihorario cuando la coordenada x del centro de masas no caiga a la derecha del punto P. De esta condición podemos sacar la ecuación que restringe la largada de las patas (distancia d).

$$d \cdot \cos 12 > y_{CM} \cdot \cos 78$$

Para el módulo *Leg Curl* se obtiene que la distancia d debe ser mayor a 93 mm, y para el módulo Remo debe ser mayor a 61 mm.

3. Si se le aplica una fuerza de 800 N en dirección vertical y sentido de la gravedad en cualquier punto de la máquina, ésta no debe volcar.

En el caso del módulo de *Leg Curl* el punto más restrictivo se encuentra en el cojín del reposapiés a una distancia de 220 mm respecto la coordenada x del centro de masas. En cambio, en el módulo Remo, el punto más extremo se encuentra a tan solo 170 mm. Si realizamos el diagrama de fuerzas podemos plantear sumatorio de momentos respecto el punto P. Para que no vuelquen estas estructuras, el momento resultante debe tener sentido antihorario, tal y como se plantea en el esquema.

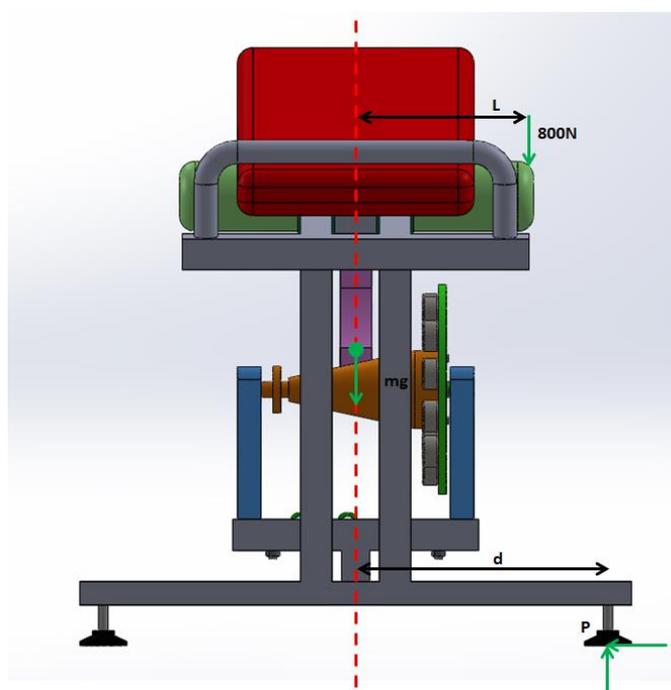


Figura 19: Diagrama de fuerzas sobre el módulo Leg Curl en el caso nº3.

Del sumatorio de momentos se extrae la siguiente ecuación que permite obtener la distancia d de las patas.

$$\frac{d - L}{L} > \frac{m_{CM} \cdot g}{800}$$

De esta manera se obtiene que para el módulo *Leg Curl* debe ser mayor a 374 mm y para el módulo de Remo d deba ser mayor a 313 mm.

Una vez encontrados todos los valores se fijará la distancia d de las patas usando el valor más restrictivo del resultado de las tres restricciones. Para el módulo Remo este valor es de 343 mm y para el módulo *Leg Curl* es de 374.

5.5. Cálculo de los rodamientos

En este diseño aparecen rodamientos en dos ocasiones, la primera es en la polea inercial cónica y la segunda es en el asiento del remo. Un rodamiento es un elemento mecánico que permite reducir la fricción entre un eje y las piezas a las que está conectado. Los rodamientos más comunes son los de bolas, de rodillos o de agujas.

Los rodamientos tienen unos estándares que definen sus límites de falla o fatiga, para ello se deben estudiar las cargas a las que están sometidos.

Según la dirección del esfuerzo al que está sometido, este puede ser axial, radial o una combinación de los dos. También hay que distinguir entre carga estática y carga dinámica, ya que la carga cuando la máquina está en uso es diferente que con la máquina parada.

5.5.1. Rodamientos de la polea inercial cónica

Estos rodamientos son los que unirán el conjunto del disco-cono-eje a la estructura de soporte. Estos rodamientos trabajarán tanto de forma axial como radial. Cuando está en estático y en posición vertical, como es el caso cuando está acoplada al módulo Remo, soporta el peso del disco de inercia, el cono y el eje que le infligen un esfuerzo axial. En cambio, cuando está trabajando en dinámico, la fuerza que le transmite el usuario a la cuerda y ésta al disco les infligen a los rodamientos un esfuerzo radial.

La carga P estática a la que están sometidos los rodamientos se calcula como la suma de las cargas dinámicas y estáticas.

$$P = P_{din} + P_e$$

En este caso, la carga estática corresponde al peso del conjunto de inercia, que cuando la polea está en posición vertical se trata de una carga axial y cuando esta tumbada en horizontal es una carga radial. También se debe tener en cuenta la carga dinámica, que se calcula de esta manera:

$$P_{din} = \frac{P_{min} + 2P_{max}}{3}$$

Se ha considerado que la carga dinámica máxima promedio es de 500N, ya que esta es la fuerza máxima promedio de los ejercicios que se realizan con la polea inercial. La carga P final es la suma de la estática y la dinámica.

Una vez se obtiene la carga P que tienen que soportar los rodamientos y el diámetro del eje al que se unirán, se elige el rodamiento más adecuado. En este caso se ha buscado rodamientos del proveedor SKF que tiene una amplia oferta en rodamientos [6], se ha encontrado que el más adecuado para las sollicitaciones del diseño era el 16002-2Z que es un rodamiento rígido de bolas con las siguientes características: d=15mm, D=32mm, B=8mm, C=5.85kN, C0=2.85kN.



Imagen 22: Rodamiento rígido de bolas 16002-2Z de la marca SKF. (Fuente: skf.com)

Una vez elegido el rodamiento se hace un estudio de la vida nominal del mismo. Esto se hace mediante una ecuación de la que se extrae, en millones de revoluciones la esperanza

de vida de los rodamientos con el uso que se les dará. Este cálculo se hace con la siguiente ecuación:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6$$

Donde L es la vida nominal de un rodamiento que se basa en un modelo estadístico y se define como el número total de revoluciones que el 90% de rodamientos idénticos, sometidos a las mismas condiciones operativas, alcanzará antes de que ocurra fallo por fatiga del material. La C es la capacidad de carga dinámica básica, un dato que aparece en la ficha técnica del rodamiento. El exponente p es una constante que varía en función del tipo de rodamiento que se trata, $p=3$ para rodamientos de bolas y $p=10/3$ para rodamientos de rodillos.

El resultado, para amenizarlo, se ha convertido a años de vida. Para ello se ha considerado que el uso medio dinámico de esta máquina es de 5 horas al día, 5 días a la semana, 42 semanas al año con una media de $n = 150\text{rpm}$.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6 \text{ rev} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ horas}$$

El resultado es que aproximadamente la vida útil de estos rodamientos es de 28,27 años, lo cual es una cifra aceptable.

5.5.2. Rodamientos del asiento del Módulo Remo

Los rodamientos del módulo Remo son los que unirán las piezas laterales del asiento con el eje y las piezas rodantes de plástico. Gracias a estos elementos el asiento podrá rodar sobre la biga principal de la estructura para permitir ejercicios dinámicos.

En este caso los rodamientos estarán sometidos solamente a carga radial. La carga estática es la del propio asiento y la dinámica es la que corresponde al peso del usuario que está sentado en el asiento, que como se ha visto en la Tabla 1 de medidas antropométricas, su masa es de 92,7kg. El peso del usuario, sin embargo, se reparte entre los 4 rodamientos. De esta forma se calcula la carga y elegimos el rodamiento que más se adecua a las sollicitaciones del diseño.

Se ha elegido el rodamiento rígido de bolas W61901-2RS1 con las siguientes características: $d=12\text{mm}$, $D=24\text{mm}$, $B=6\text{mm}$, $C=2.51\text{kN}$, $C0=1.46\text{kN}$.



Imagen 23: Rodamiento rígido de bolas W61901-2RS1 de la marca SKF. (Fuente: skf.com)

En este caso también se ha calculado la vida útil del rodamiento, en años de vida, con las ecuaciones mostradas anteriormente. Para ello se ha considerado que el uso medio dinámico de esta máquina es de 5 horas al día, 5 días a la semana, 42 semanas al año. Se considera que la velocidad lineal media de desplazamiento del asiento es de 0,5 m/s, lo que resulta en $n = 1250$ rpm.

Realizando el cálculo se obtiene el resultado de que la vida útil de estos rodamientos es de 17,09 años.

6. Simulaciones con el Método de los Elementos Finitos

En este apartado se ha realizado diversas simulaciones usando el método de los elementos finitos. Gracias a este método se pueden realizar cálculos muy complejos para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales asociadas a geometrías complicadas. Se ha usado el software *Ansys* para este propósito.

6.1. Análisis Estático Estructural

Para el análisis estático estructural se ha seguido un proceso iterativo para dar con el grosor óptimo de los tubos de acero que forman las estructuras de los módulos. Para ello se obtendrán las deformaciones y las tensiones equivalentes de Von Mises, al simular que una persona reposa toda su masa sobre las máquinas. Se ha utilizado el valor de 92,7 kg, correspondiente al del valor del percentil 95 de las tablas de medidas antropométricas, como puede observarse en la Tabla 1. De esta forma se considera al 95% de la población adulta.

Las condiciones de contorno para el análisis estático estructural de la estructura *Leg Curl* son las siguientes:

- Se han fijado las 4 patas en todas las direcciones.
- Se ha aplicado una fuerza de 1000 N, simulando el peso de un usuario (caso extremo), distribuida uniformemente por la parte superior de la estructura donde van los cojines donde reposa el usuario.
- Se ha aplicado una fuerza de 500N, correspondiente a la reacción que aparece al realizar un ejercicio, en la articulación.
- Se ha aplicado una fuerza de 500N también, en los taladros del alojamiento de la polea, simulando la fuerza que hace la polea en esta unión cuando el usuario tira de ella

La malla se ha generado automáticamente con el programa *Ansys Workbench*, que ha elegido el tamaño de elemento adecuado para cada estructura.

Se decidió empezar las simulaciones con un grosor de 4mm de los tubos que forman la estructura y a partir de los resultados seguir con las simulaciones.

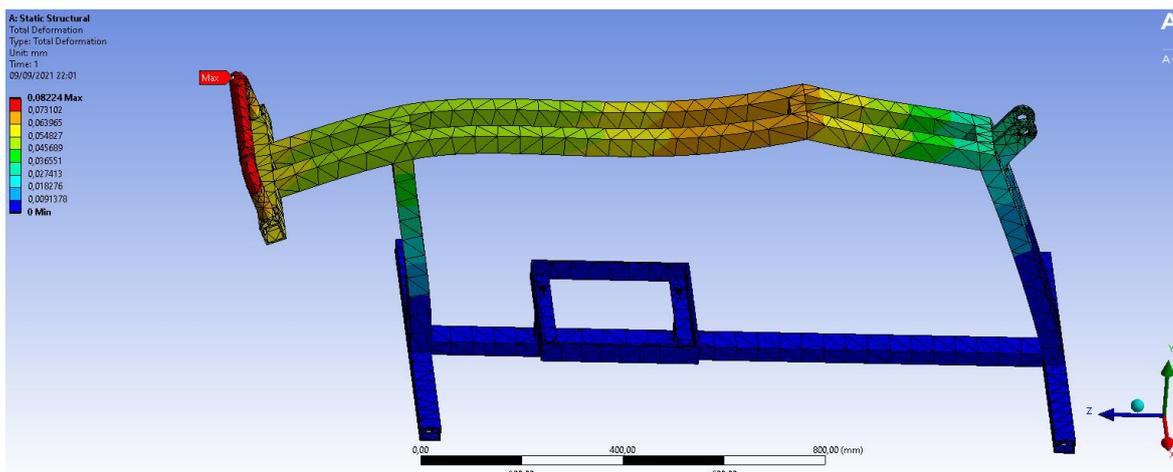


Figura 20: Deformación total en la estructura del módulo Leg Curl hecha con tubos de 4mm de grosor.

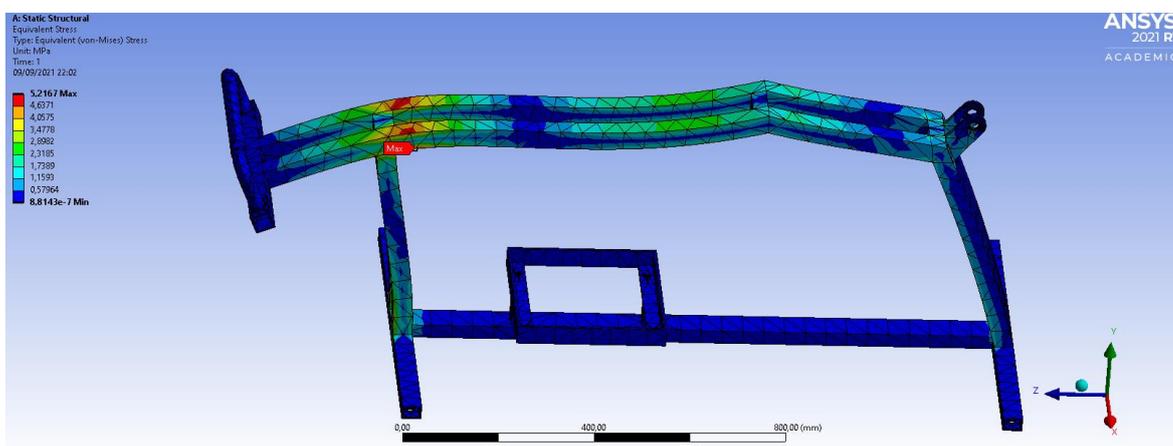


Figura 21: Tensiones equivalentes de Von Mises en la estructura del módulo Leg Curl hecha con tubos de 4mm de grosor.

En los resultados de la primera simulación se observa que la deformación máxima es de 0,08 mm y la tensión equivalente máxima es de 5,2 MPa. Estos son valores muy bajos lo que indica que la estructura es extremadamente robusta y puede soportar con creces estos esfuerzos.

A partir de las conclusiones extraídas de esta primera simulación, se decide hacer nuevas iteraciones reduciendo en 1mm el grosor de los tubos. De esta manera se intenta conseguir una estructura lo más ligera posible y a la vez más barata.

La siguiente simulación se realiza con las mismas condiciones de contorno y se genera una nueva malla para la estructura con tubos, esta vez, de 3 mm de grosor.

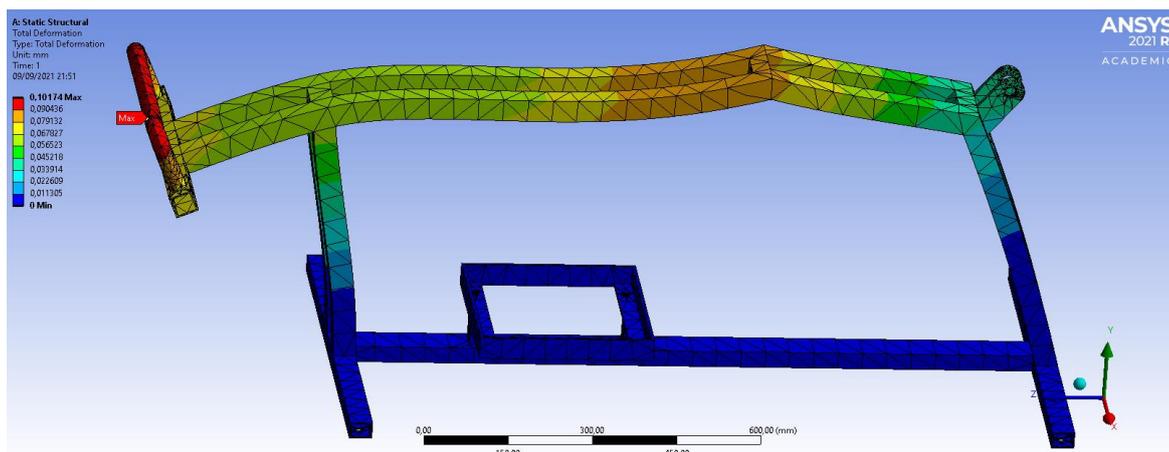


Figura 22: Deformación total en la estructura del módulo Leg Curl hecha con tubos de 3mm de grosor.

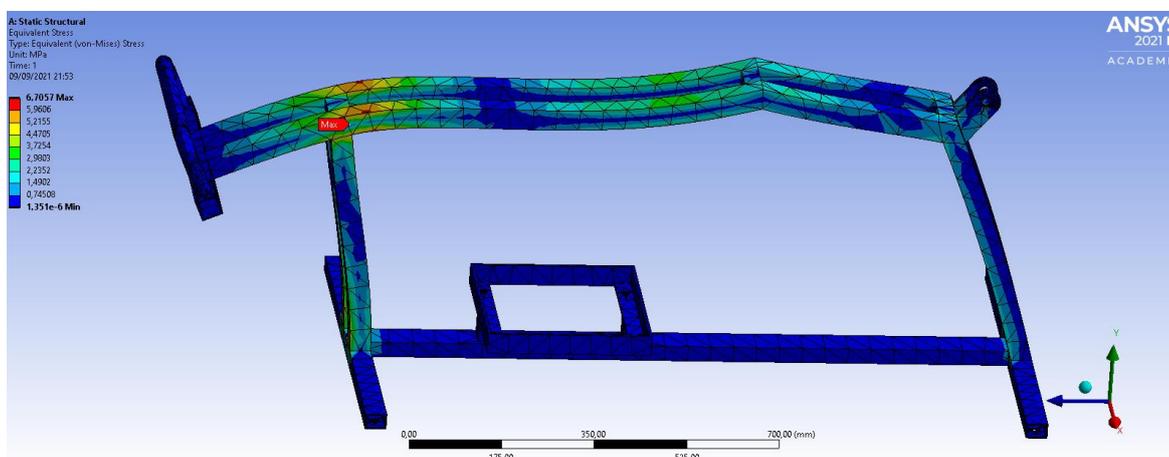


Figura 23: Tensiones equivalentes de Von Mises en la estructura del módulo Leg Curl hecha con tubos de 3mm de grosor.

El resultado de esta simulación muestra una deformación máxima de 0,1 mm y una tensión equivalente máxima de 6,7 MPa. Muy lejos aún de la tensión de límite elástico de estos tubos y con deformaciones aceptables.

Se han realizado iteraciones para grosores de 2 mm y 1 mm, resultando en deformaciones mayores a las deseadas. Por lo que se ha optado por la opción de tubos de 3 mm de grosor.

El mismo proceso se ha seguido para el módulo remo, con unos resultados muy similares, por lo que también se ha optado por tubos de 3 mm de grosor.

6.2. Análisis Modal

En este apartado se realiza un análisis modal de las estructuras. El análisis modal consiste en un estudio dinámico de las estructuras, tiene como objetivo estimar los modos propios y frecuencias naturales del sistema. Se pretende comprobar que el rango de frecuencias a las que trabajará el sistema no coincide con ninguna frecuencia natural. Esto se hace porque si se diera el caso que una frecuencia de trabajo es la misma que una frecuencia natural del sistema se daría el fenómeno conocido como resonancia, hecho que aumentaría la amplitud a la que vibra la máquina con lo que se producirían más tensiones y deformaciones.

Este estudio se ha realizado con el diseño definitivo de los módulos.

Para el módulo Remo se ha encontrado que sus frecuencias naturales son de:

- 94,212 Hz
- 111,62 Hz
- 129,71 Hz
- 162,55 Hz
- 189,52 Hz
- 210,62 Hz

Se sabe que el rango de frecuencias de trabajo del sistema, es decir, el rango de frecuencias a la que se realizan los ejercicios es de 0 a 600 rpm que se traduce en un rango de 0 a 10 Hz. De esta manera queda descartado que el sistema pueda entrar en resonancia durante los ejercicios.

Los mismos resultados se han obtenido para el módulo *Leg Curl*, frecuencias naturales del sistema muy altas a las que no es posible llegar realizando ejercicios con la polea.

A continuación se muestran a modo de ejemplo dos figuras en las que se puede observar el comportamiento del módulo remo al oscilar con las frecuencias de dos de sus seis modos propios.

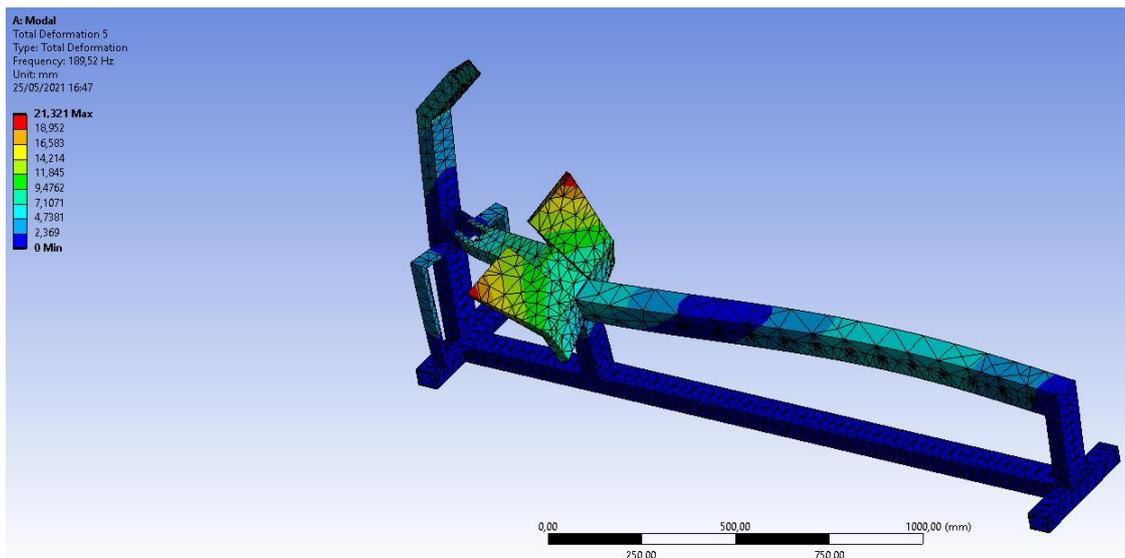


Figura 24: Deformación total en la estructura del módulo remo cuando oscila a la frecuencia de 189,52 Hz, su quinto modo propio.

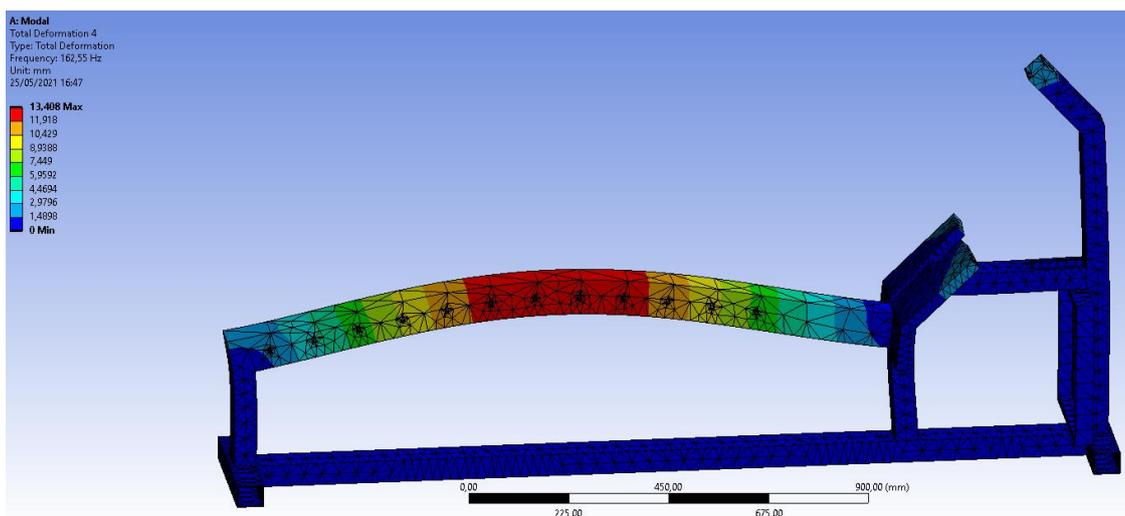


Figura 25: Deformación total en la estructura del módulo remo cuando oscila a la frecuencia de 162,55 Hz, su cuarto modo propio.

7. Métodos de Fabricación

7.1. Tubos

En este apartado se detallan los métodos de fabricación de las piezas diseñadas para este proyecto. Las estructuras de todas las máquinas se han hecho con tubo de acero. Concretamente de tubo laminado rectangular de acero soldado s275. Se ha elegido este material por sus propiedades, coste y accesibilidad. Además, es un acero que admite muy bien la soldadura, sin precalentamiento ni tratamiento térmico posterior.

Los aceros s275 son aceros estructurales, no aleados, que cumplen la norma EN 10025-2 [8]. Sus aplicaciones son principalmente la fabricación de productos largos y planos laminados en caliente y productos semielaborados. A continuación, se muestra su composición y sus propiedades.

C para espesor nominal, mm			Mn	P	S	N	Cu
≤16	>16 ≤ 40	> 40					
≤ 0.21	≤ 0.21	≤ 0.22	≤ 1.50	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.012	≤ 0.55

Tabla 2: Composición química basándose en el análisis de cuchara según la norma EN 10025-2, en %. (Fuente: metinvestholding.com)

Espesor nominal, mm	Límite elástico mínimo, MPa	Límite de resistencia, MPa
<3	275	430-580
≥3 ≤ 16	275	410-560
> 16 ≤ 40	265	410-560
> 40 ≤ 63	255	410-560
> 63 ≤ 80	245	410-560
> 80 ≤ 100	235	410-560
> 100 ≤ 150	225	400-540
> 150 ≤ 200	215	380-540
> 200 ≤ 250	205	380-540
> 250 ≤ 400	195	380-540

Tabla 3: Propiedades mecánicas. (Fuente: metinvestholding.com)

Para conseguir los tubos, se laminan en caliente los lingotes de acero fundido. Se calientan a una temperatura que haga posible su deformación siguiendo un proceso de estiramiento y desbaste que se lleva a cabo en el tren de laminación, mediante una cadena de cilindros a presión.

El siguiente paso para obtener los tubos es doblar la lámina hasta conseguir un tubo redondo. Posteriormente, este tubo se somete a un conformado en el que se le aplanaran las paredes con las medidas deseadas.

Para obtener las estructuras que se ha diseñado se deben cortar los tubos y unirlos entre sí. Para ello se utiliza el corte por láser y la soldadura. Con el corte por láser se obtiene un buen acabado de la sección de corte sin rebabas ni escoria. También sería posible realizar el corte por arranque de viruta, aunque el acabado puede no ser tan bueno.

La soldadura puede ser realizada de muchas maneras, pero el método más adecuado para los tubos que se tratan es el TIG, la soldadura por arco de tungsteno con gas. Este tipo de soldadura se caracteriza por el uso de una antorcha en la que es insertado un electrodo de tungsteno, este electrodo es el que se encarga de la fusión de las piezas que se están soldando, con la protección de un gas que puede ser Argón o Helio. Este tipo de soldadura puede ser con aportación de material o sin, el primer caso resulta en una soldadura con mayor firmeza y se recomienda su uso para tubos o láminas con poco espesor (de 2 a 5 mm).



Imagen 24: Operario realizando soldadura TIG en tubos de acero. (Fuente: Ifap.com)

7.2. Chapas

Por otra parte, hay piezas que se crean a partir de planchas de acero, como el disco de inercia, el asiento, los reposapiés del módulo remo, ... Las planchas de acero se cortan por láser para darle el contorno deseado y después, se doblan mediante máquinas especializadas para adquirir la forma final. A la hora de diseñar piezas que se fabricarán

con chapa plegada se debe tener en cuenta estos pliegues y dejar desahogos. Los desahogos ayudan a controlar el comportamiento de la chapa al doblarla, evitando de este modo deformaciones no deseadas. En el diseño de desahogos se prevé el mecanizado posterior.

En el módulo remo, los reposapiés, así como las piezas laterales del asiento, se fabrican mediante chapa plegada y soldada.

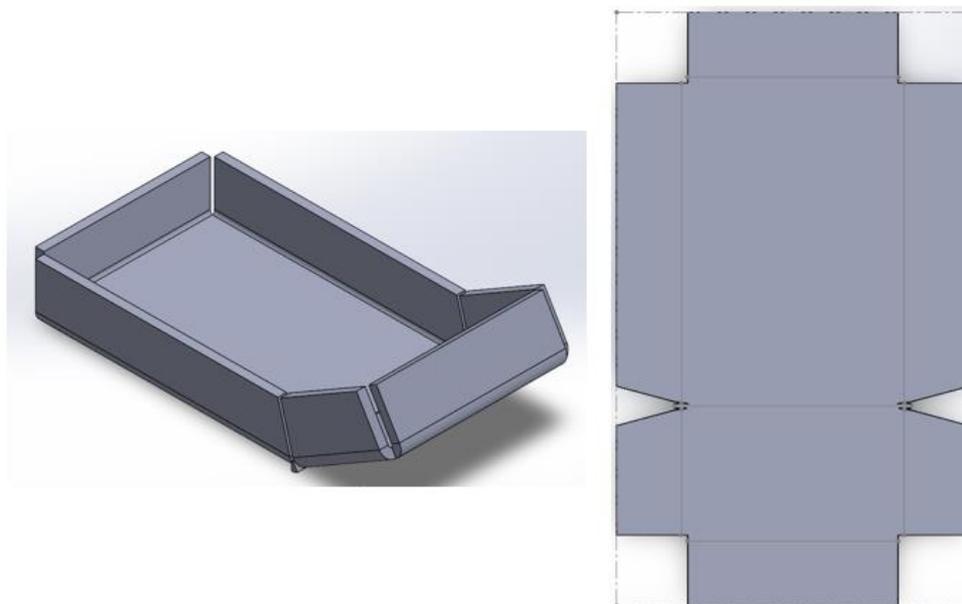


Figura 26: Diseño de un reposapiés del módulo remo, plegado (izquierda) y desplegado (derecha).

7.3. Fabricación 3D

De las piezas que se ha diseñado, se contempla fabricar con plástico los rodillos del asiento del módulo remo. Para hacer los prototipos o tiradas cortas, se recomienda usar la tecnología 3D, ya que para geometrías complejas resulta barato y rápido. Si se tienen que fabricar muchas unidades, sin embargo, resulta mucho más caro que un proceso como la inyección de plástico.

La tecnología que se usaría para la fabricación de estas piezas es la *MultiJet Fusion* de HP [9].

La tecnología de impresión 3D *Multi Jet Fusion* de HP se basa en el uso de polvo de poliamida para la creación de piezas de baja porosidad, alta densidad y un buen acabado. Para crear estas piezas, el primer paso que hacen las maquinas es depositar una capa uniforme de polvo. Una vez se tiene la capa de polvo de plástico, se imprime sobre ella la

pieza con dos agentes: el *fusing agent* i el *detailing agent*. Con el primero se pinta todo el grueso de la pieza, este agente hace que el punto de fusión de la poliamida baje. Con el segundo se pinta el contorno, y hace que el punto de fusión del material suba, de esta manera se obtiene un acabado superficial muy bueno y se pueden conseguir piezas de gran detalle. Una vez pintada la capa, pasa un carro con unas lámparas llamadas *fusing lamps*, que lo que hacen es calentar el material lo justo como para que el trozo de capa de polvo que ha sido pintado con el *fusing agent* se fusione y pase a ser un fragmento sólido. En este punto se vuelve a hacer otra capa de polvo encima de la anterior y se repite el proceso.

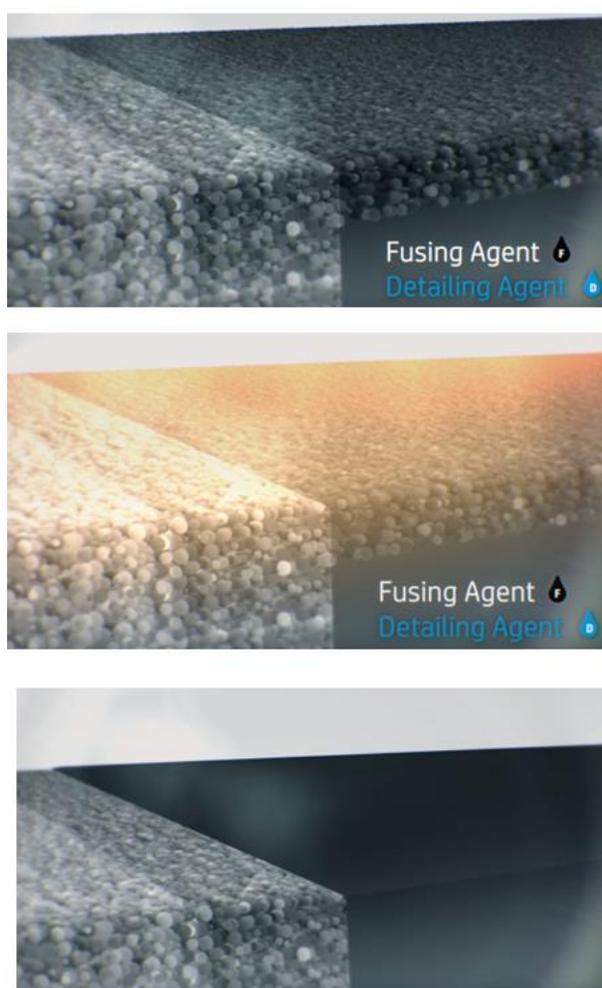


Figura 27: Tecnología Multi Jet Fusion para la creación de piezas 3D. (Fuente: hp.com)

De esta forma, capa a capa, se va creando la pieza hasta que está completa. Cuando acaba la impresión y el tiempo de enfriado, hay que desenterrar la pieza o las piezas del cubo de polvo en el que se encuentran y limpiarlas con aire a presión. Todo el polvo que no se ha convertido en pieza se reutiliza por completo.

Esta tecnología actualmente se usa mucho en la ingeniería, sobre todo en el diseño de prototipos.



Imagen 25: De derecha a izquierda, impresora Jet Fusion 4200, módulo de enfriamiento y limpieza de piezas, y ejemplo de una pieza con geometría compleja impresa en estas máquinas. (Fuente: hp.com)

8. Listas de materiales

- Ensamblaje Polea Inercial Cónica

DESCRIPCIÓN PIEZA	CANTIDAD	ESTANDARD	Nº REFERENCIA
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO POLEA	1	NO	-
ANILLA DE ANCLAJE	3	NO	-
CONO	1	NO	-
EJE CILINDRICO 15X266	1	NO	-
DISCO DE INERCIA	1	NO	-
PESOS CON ROSCA	12	NO	-
RODAMIENTOS	2	SI	SKF 16002-2Z
TORNILLO PRISIONERO ALLEN M6X8	2	SI	RS 187-0793
TORNILLO ALLEN M6X30	4	SI	RS 483-8348

Tabla 4: BOM del ensamblaje de la polea inercial cónica

- Módulo Leg Curl

DESCRIPCIÓN PIEZA	CANTIDAD	ESTANDARD	Nº REFERENCIA
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO LEG CURL	1	NO	-
PIEZA ARTICULACIÓN PIERNAS	1	NO	-
SOPORTE PIERNAS DESLIZANTE	1	NO	-
POSICIONADOR DE MUELLE 1 POSICIÓN	1	SI	PMT.100-A
CÁNCAMO MACHO M10	1	SI	RS 673-692
COJINES PIÉS	2	NO	-
PATAS REGULABLES	4	SI	A090/020
PIEZA ENGANCHE COJINES	4	NO	-
COJÍN TORSO	1	NO	-
COJÍN PIERNAS	1	NO	-
ALOJAMIENTO POLEA CON PEMS ROSCADOS	1	NO	-
TORNILLOS CABEZA ALLEN M10X25	4	SI	RS 484-0032
TORNILLOS CABEZA ALLEN M8X16	20	SI	RS 281-142
CASQUILLO DE BRONCE CON VALONA	2	SI	23761-02002420

Tabla 5: BOM del módulo Leg Curl

- Módulo Remo

NOMBRE PIEZA	CANTIDAD	ESTANDARD	Nº REFERENCIA
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO REMO	1	NO	-
ANILLA DE ANCLAJE	6	NO	-
ALOJAMIENTO POLEA	1	NO	-
SOPORTE PIÉ	2	NO	-
PATAS REGULABLES	4	SI	A090/020
POSICIONADOR DE MUELLE	1	SI	GN617.1-AN-NI
CHAPA LATERAL ASIENTO	2	NO	-
CHAPA SUPERIOR ASIENTO	1	NO	-
RODILLOS	3	NO	-
RODAMIENTOS	6	SI	SKF W61901
EJE CILINDRICO 12X112	3	NO	-
CIRCLIP INTERIOR	6	SI	SN1793
COJÍN ASIENTO	1	NO	-

Tabla 6: BOM del módulo Remo

9. Impacto Ambiental

En el estudio del impacto ambiental se analizará cual es el impacto que ha causado la realización del proyecto en el entorno. Se considerará también el impacto que supondría la fabricación de las tres máquinas, aunque no se dispone de los recursos para llevarla a cabo.

Para fabricar estas tres máquinas se usan aproximadamente 130 kg de acero. Se considera que en la producción del acero se producen 600 kg de residuos por cada tonelada producida. De esta manera se calcula que se producirían unos 78 kg de gases residuales, carbono y escoria en la producción de acero que se necesitan para fabricar las tres máquinas diseñadas en este proyecto.

La tecnología usada para imprimir piezas en 3D no produce muchos residuos, ya que se reutiliza todo el polvo que no se usa para fabricar la pieza y este puede ser reciclado. Sin embargo, las máquinas usadas tienen un alto consumo eléctrico. También tiene un consumo de electricidad el ordenador con el que se ha diseñado y analizado todas las piezas y el redactado de la memoria.

Todo el proceso de mecanizado tiene también un alto consumo eléctrico. Las máquinas de corte con láser, fresadoras y tornos industriales funcionan con energía eléctrica. Todo consumo de electricidad se traduce en emisiones de CO₂ que tienen un impacto negativo en el medio ambiente y contribuyen al cambio climático.

Sin embargo, al estar prácticamente hechas de acero eso las hace altamente reciclables. El acero es 100% reciclable por lo que al final de su vida útil pueden ser recicladas sin generar un impacto negativo en el medio ambiente.

10. Presupuesto

Este apartado se dividirá en dos subapartados. Por una banda se analizará el coste del proyecto y por otra se desglosará el presupuesto para la fabricación de las máquinas que se han diseñado.

10.1. Presupuesto del proyecto

Tarea	Horas	Precio la hora (€)	Precio total (€)
Diseño 3D	250	45	11250
Análisis MEF	50	60	3000
Redacción de la memoria	100	20	1500
Total	400		15750

Tabla 7: Coste del personal.

También se debe tener en cuenta el precio de las licencias de los programas utilizados.

Software	Horas de uso	Coste anual (€)	Horas de trabajo anuales	Coste (€)
SolidWorks	250	8100	1800	1125
Ansys Workbench	50	36100	1800	1003
Total				2128

Tabla 8: Coste de las licencias

Sumando el coste de personal y el coste de las licencias el coste total del proyecto es de 17878€.

10.2. Coste de fabricación

En este subapartado se plantea lo que costaría fabricar cada una de las máquinas. Para ello se considerará lo que costaría fabricar una unidad de cada máquina si se fabricarán los primeros prototipos. Se sabe que si se fabricarán grandes lotes de estas máquinas resultaría mucho más barato, ya que la estandarización de un proceso resulta más eficiente

y económica.

A continuación, se detallan los precios exactos de las piezas estandarizadas y sus proveedores. Por lo que respecta a las piezas no estandarizadas se ha hecho una estimación de su coste de fabricación y se ha buscado proveedores locales donde se podrían fabricar estas piezas.

- Polea inercial cónica:

PIEZA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	PROVEEDOR
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO POLEA	1	300	300	LASER GODED
ANILLA DE ANCLAJE	3	5	15	LASER GODED
CONO	1	150	150	FRESTOR
EJE CILINDRICO 15X266	1	30	30	FRESTOR
DISCO DE INERCIA	1	100	100	LASER GODED
PESOS CON ROSCA	12	8	96	FRESTOR
RODAMIENTOS	2	9,52	19,04	TME
TORNILLO PRISIONERO ALLEN M6X8	2	0,5708	1,14	RS
TORNILLO ALLEN M6X30	4	0,2283	0,91	RS
PRECIO TOTAL			712,09	

- Módulo Leg Curl:

PIEZA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	PROVEEDOR
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO LEG CURL	1	700	700	LASER GODED
PIEZA ARTICULACIÓN PIERNAS	1	200	200	LASER GODED
SOPORTE PIERNAS DESLIZANTE	1	120	120	LASER GODED
POSICIONADOR DE MUELLE 1 POSICIÓN	1	5,48	5,48	ELESA-GANTER
CÁNCAMO MACHO M10	1	7,76	7,76	RS
COJINES PIÉS	2	40	80	TAPICERÍA
PATAS REGULABLES	4	12,84	51,36	RS
PIEZA ENGANCHE COJINES	4	15	60	LASER GODED
COJÍN TORSO	1	120	120	TAPICERÍA
COJÍN PIERNAS	1	70	70	TAPICERÍA
ALOJAMIENTO POLEA CON PEMS ROSCADOS	1	120	120	LASER GODED
TORNILLOS CABEZA ALLEN M10X25	4	0,5098	2,01	RS
TORNILLOS CABEZA ALLEN M8X16	20	1,0084	20,17	RS
CASQUILLO DE BRONCE CON VALONA	2	4,95	9,9	NORELEM
PRECIO TOTAL			1566,68	

- Módulo Remo:

PIEZA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	PROVEEDOR
ESTRUCTURA TUBO DE ACERO REMO	1	600	600	LASER GODED
ANILLA DE ANCLAJE	6	5	30	LASER GODED
ALOJAMIENTO POLEA	1	120	120	LASER GODED
SOPORTE PIÉ	2	30	60	LASER GODED
PATAS REGULABLES	4	12,84	51,36	RS
POSICIONADOR DE MUELLE	1	19,88	19,88	ELESA-GANTER
CHAPA LATERAL ASIENTO	2	40	80	LASER GODED
CHAPA SUPERIOR ASIENTO	1	35	35	LASER GODED
RODILLOS	3	56,26	168,78	PROMETAL3D
RODAMIENTOS	6	22,92	137,52	SP RECAMBIOS
EJE CILINDRICO 12X112	3	10	30	FRESTOR
CIRCLIP INTERIOR	6	0,62	3,72	RDM PARTS
COJÍN ASIENTO	1	80	80	TAPICERÍA
PRECIO TOTAL			1416,26	

Conclusiones

Se pueden extraer conclusiones en base a los objetivos que se plantearon al principio del proyecto. En primer lugar, se ha realizado el diseño de una polea inercial cónica, de formato compacto y que puede ser acoplada a dos máquinas que también han sido completamente diseñadas para alojarla y poder trabajar con ella.

Se ha explicado en detalle las piezas que forman las máquinas y los métodos de fabricación usados para crearlas y ensamblarlas.

Se ha llevado a cabo un análisis estructural iterativo de las dos estructuras para optimizar el diseño. También se ha realizado un análisis modal para comprobar que las frecuencias naturales del sistema no coincidían con las frecuencias de trabajo y los sistemas entran en resonancia.

Las máquinas diseñadas cumplen con las especificaciones fijadas antes del diseño.

- Comercialización

Este proyecto es un punto de partida para, si se quisiera, fabricar y comercializar estos productos. Se podría fabricar los primeros prototipos de estas máquinas, hacer test de vida de sus componentes y rediseñar lo que sea necesario hasta conseguir un producto final que pueda salir al mercado. Se estima que con procesos de fabricación estandarizados y de grandes lotes, se conseguiría un precio de mercado muy competitivo.

- Aprendizaje

A nivel detallado, entre otras cosas, se ha aprendido:

- Cálculo de rodamientos.
- Análisis modal de estructuras con *Ansys Workbench*.
- Análisis de vuelco.

Se debe destacar también que este proyecto ha supuesto un gran reto a nivel personal, con el que se ha tenido que aprender muchos conocimientos nuevos para hacer frente a las limitaciones de las que se partía y los problemas que iban surgiendo. Sobre todo se ha aprendido a pensar de antemano, cuando se está diseñando, cómo se fabricará la pieza que se está creando, con que materiales, si será barata de fabricar y cómo encajará con el resto de la máquina.

Bibliografía

- [1] Tesch PA, Berg HE, Bring D, Evans HJ, LeBlanc AD. (2005). *Effects of 17-day spaceflight on knee extensor muscle function and size. Eur J Appl Physiol. PMID: 15517339.*
- [2] Norrbrand, L., Pozzo, M. y Tesch, P.A. (2010). *Flywheel resistance training calls for greater eccentric muscle activation than weight training. PMID: 20676897.*
- [3] Núñez FJ, Suarez-Arrones LJ, Cater P, Mendez-Villanueva A. (2017). *The High-Pull Exercise: A Comparison Between a VersaPulley Flywheel Device and the Free Weight. Int J Sports Physiol Perform. PMID: 27705034.*
- [4] Maroto-Izquierdo S, García-López D, de Paz JA. (2017). *Functional and Muscle-Size Effects of Flywheel Resistance Training with Eccentric-Overload in Professional Handball Players. J Hum Kinet. PMID: 29339993*
- [5] Naczki M, Marszałek S, Naczki A. (2020). *Inertial Training Improves Strength, Balance, and Gait Speed in Elderly Nursing Home Residents. Clin Interv Aging. PMID: 32103920.*
- [6] *Tabla de valores con los datos antropométricos de la población laboral española. url: <https://www.documentacion.fundacionmapfre.org>*
- [7] *Catálogo de rodamientos de la empresa SKF. url: <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings>*
- [8] *Norma para productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados. url: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064323>*
- [9] *Tecnología 3d Multi Jet Fusion de HP. url: <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>*