

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"SISTEMA DE ELEVACIÓN DE BRAZO
ROBÓTICO PARA TAREAS
INDUSTRIALES"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre 2021

AUTOR: Clemente Fernández Irlés

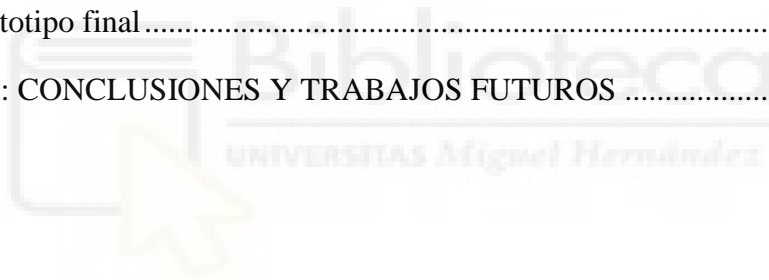
DIRECTOR: Nicolás García Aracil

COTUTOR: Andrea Blanco Ivorra



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	6
1.1.- PROYECTO SECONDARMS	7
1.2.- ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO SECONDARMS.....	8
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO	10
2.1.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN.....	10
- 2.1.1 Requisitos de diseño.....	10
- 2.1.2 Estudio de soluciones	10
2.2 DESARROLLO DEL PROYECTO	12
- 2.2.1 Selección de componentes	12
- 2.2.2 Dimensionamiento de los componentes	35
2.2.3 Prototipo final	40
CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	42



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Concepto inicial SecondArms.....	7
Figura 2: Brazo robótico.....	8
Figura 3: Pieza de anclaje del brazo robótico.....	9
Figura 4: Soporte espalda	12
Figura 5: Placa base.....	13
Figura 6: Ubicación en modelo 3D humano.....	14
Figura 7: Chapas extremos superior e inferior	14
Figura 8: Triángulo α y D2.....	17
Figura 9: Tuerca del husillo.....	18
Figura 10: Persona con el torso inclinado	23
Figura 11: Coeficiente seguridad husillo TR8x1.5.....	24
Figura 12: Desplazamiento husillo TR8x1.5.....	24
Figura 13: Coeficiente de seguridad TR10x2.....	25
Figura 14: Desplazamiento husillo TR10x2.....	25
Figura 15: Curva torque/rpm motor eléctrico.....	27
Figura 16: Fijación motor eléctrico	28
Figura 17: Fijación rodamiento superior	29
Figura 18: Fijación rodamiento inferior	30
Figura 19: Fijación varillas.....	31
Figura 20: Núcleo patín central	32
Figura 21: Vista seccionada patín central.....	33
Figura 22: Chapas patín central	33
Figura 23: Sensor final de carrera.....	34
Figura 24: Chapa detección final de carrera.....	34
Figura 25: Placa sujeción brazos	35
Figura 26: Coeficiente seguridad placa sujeción 4mm.....	36
Figura 27: Desplazamiento placa sujeción 4 mm.....	36
Figura 28: Coeficiente de seguridad placa sujeción 6 mm.....	37
Figura 29: Desplazamiento placa sujeción 6 mm.....	37
Figura 30: Coeficiente seguridad placa de la base de 8 mm	38
Figura 31: Desplazamiento placa de la base de 8 mm.....	39
Figura 32: Coeficiente de seguridad placa base 6mm.....	39
Figura 33: Desplazamiento placa base 6mm	40
Figura 34: Conjunto completo sistema de elevación.....	41
Figura 35: Conjunto sistema de elevación y persona	41

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1: Diámetro medio del paso	16
Fórmula 2: Ángulo α	17
Fórmula 3: Ángulo β n plano axial.....	17
Fórmula 4: Ángulo δ	18
Fórmula 5: Momento en el husillo	20
Fórmula 6: Rendimiento del husillo	21
Fórmula 7: Presión media.....	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Medidas generales husillo	16
Tabla 2: Cálculos de α , β n y D2	17
Tabla 3: Características técnicas tuerca del husillo	19
Tabla 4: Auto retención	20
Tabla 5: Momento y rendimiento husillo	21
Tabla 6: Presión media husillo	22
Tabla 7: Características del cojinete de fricción.....	26
Tabla 8: Características motor eléctrico	27
Tabla 9: Características rodamiento	30
Tabla 10: Medidas rodamiento	31

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Existen un gran número de tareas desempeñadas en el ámbito industrial que requieren un esfuerzo físico elevado por parte de los operarios, como trabajar con maquinaria o manipular cargas pesadas. Dichos esfuerzos conllevan en muchas ocasiones lesiones, que pueden llegar a ser graves, y que suponen pérdidas en forma de recuperación y concesión de días de baja a las personas afectadas. Según el VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, estas lesiones vienen dadas mayoritariamente por la repetición de movimientos en el ámbito laboral, aunque también por la adopción de malas posturas y el transporte de cargas [1]. Estas dolencias se engloban dentro de los TME o trastornos musculoesqueléticos y son la primera causa de baja laboral en España [2].

Una posible solución para la reducción de los TME sería la inclusión de exoesqueletos que aumentan la capacidad de carga del trabajador en entornos industriales [3] [4]. En estos estudios puede observarse una disminución en la actividad muscular y el consumo de oxígeno de distintos sujetos al realizar una tarea repetitiva de ámbito industrial.

Otra opción sería la incorporación de brazos robóticos portables que colaboren junto al operario en sus funciones, aunque se trata de un mercado que todavía está por explotar. Surge entonces el proyecto SecondArms [5], descrito en detalle en el siguiente apartado, como una alternativa a este problema

1.1.- PROYECTO SECONDARMS

Los trastornos músculo esqueléticos, descritos anteriormente, ha motivado el desarrollo del proyecto SecondArms. Este proyecto da soporte a los operarios en el ámbito laboral, aumentando su capacidad de carga y reduciendo así las dolencias derivadas de los trabajos repetitivos o adopción de malas posturas

Se trata de un proyecto que pretende desarrollar un sistema robótico integral compuesto por dos brazos robóticos actuados que irán apoyados sobre un exoesqueleto de miembro inferior que soportará el peso de la estructura. El sistema debe ser autónomo y portable, por lo que estará provisto de una batería que alimentará el dispositivo. Por otro lado, se emplearán técnicas de Realidad Aumentada para la interacción hombre-máquina, aspecto que representa una innovación en la industria.

La Figura 1 muestra el concepto del sistema a desarrollar dentro del proyecto.



Figura 1: Concepto inicial SecondArms

1.2.- ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO SECONDARMS

El proyecto se compone de 2 brazos robóticos que disponen de 6 grados de libertad activos y un gripper en el efector final. Actualmente, este dispositivo se encuentra en una fase de desarrollo inicial, donde se han diseñado los brazos robóticos que manipularán la carga, como se puede observar en la Figura 2.

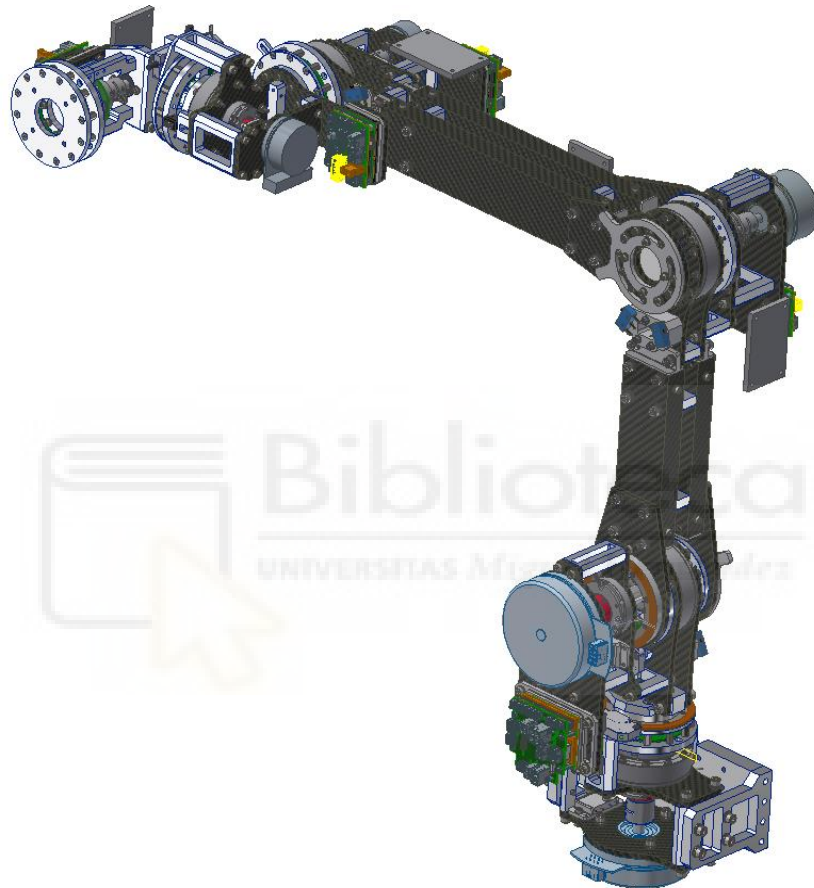


Figura 2: Brazo robótico

Con el objetivo de realizar trabajos a distintas alturas, y poder operar por encima de los hombros del operario, estos brazos robóticos deberán disponer de un sistema de elevación que proporcione un rango de movimientos ampliado. Este sistema, que unirá ambos brazos de forma solidaria, es objeto de este Trabajo de Fin de Grado.

La Figura 3 incluye el lugar de fijación al sistema elevador, pieza ya definida y desde donde partirá el diseño que se ha de efectuar.

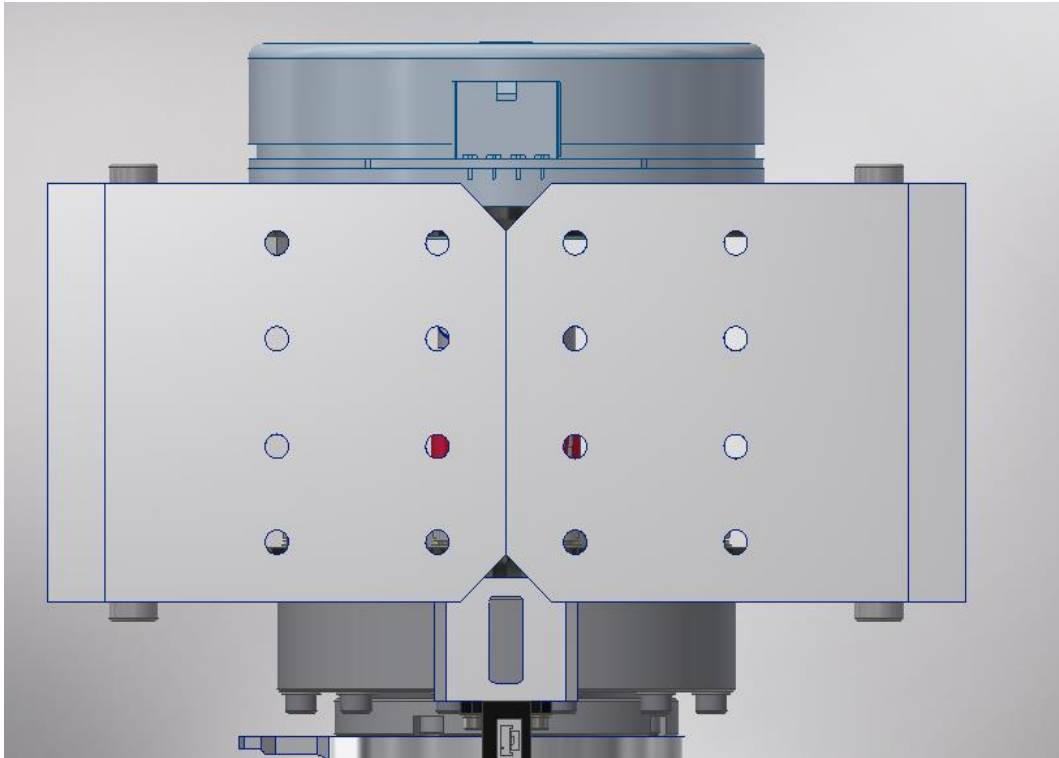


Figura 3: Pieza de anclaje del brazo robótico

A continuación, se profundizará en los datos concretos de estos brazos robóticos; masa, cargas que soportan, etc., así como los requisitos del diseño del sistema de elevación que se deben cumplir tales como distancias de separación entre ambos brazos robóticos.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO

A partir del proyecto SecondArms anteriormente mencionado, nace la necesidad de crear un sistema de elevación que unifique ambos brazos robóticos en un soporte de subida y bajada a lo largo de la parte posterior de la persona que lo utilice. Se desarrolla así este Trabajo de Fin de Grado, con una serie de requisitos mínimos dados por el proyecto, y con el objetivo de disponer de un conjunto ligero, sencillo y eficaz.

2.1.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN

En esta sección se aborda el diseño del sistema de elevación, desarrollando distintas soluciones e indicando ventajas e inconvenientes de cada una de ellas

- 2.1.1 Requisitos de diseño

En el proyecto SecondArms se han establecido ciertos requisitos y características que el sistema de elevación debe cumplir:

- El recorrido del sistema de elevación será de 450mm y debe abarcar desde la zona lumbar de la persona hasta por encima de los hombros.
- La carga total que se ha de soportar es de 30 kg. En esta carga se incluye la masa de cada brazo robótico (11,5 kg), la masa de la pinza (1 kg) y la masa máxima a transportar (3kg).
- La distancia entre las bases de los dos brazos robóticos debe ser de 15 cm para cumplir con el espacio de trabajo calculado en la simulación.
- La velocidad mínima de traslación será de 18 mm/s.
- Los brazos no subirán independientemente el uno del otro, siempre lo harán de forma solidaria.

-2.1.2 Estudio de soluciones

Se han planteado 3 posibles soluciones como sistema de elevación de brazo robótico para tareas industriales. Se describen a continuación:

- **Solución 1**

El principal elemento que forma parte de esta solución es un sistema de tuerca y husillo que permita el movimiento vertical de los brazos robóticos. Una de las ventajas que tiene es el espacio compacto que permite la solución, así como un peso reducido, parámetros importantes en la elección del sistema. Además, la elección del husillo nos puede permitir bloquear el movimiento cuando no se esté operando con él, de forma que no se baje solo por su propio peso.

Por otro lado, debemos prestar atención a la esbeltez del sistema, comprobando que el husillo resiste las cargas que se añadan sin flectar de manera que se pierda el paralelismo del sistema, provocando desajustes y mal funcionamiento.

- **Solución 2**

En este caso, la elevación de los brazos robóticos se llevaría a cabo a través de un sistema de piñón cremallera. Se trata de un sistema sencillo que también utiliza un patín central que se desplaza a lo largo del sistema, pero en este caso el motor se movería solidario al patín. Esto conlleva el problema adicional sobre la colocación de los cables de alimentación del motor, teniendo que evitar posiciones donde puedan quedar atrapados y sufrir cortes. Además, el patín debe cargar con el peso adicional del motor y del piñón.

- **Solución 3**

Este sistema se puede asimilar al desplazamiento que realiza los elevadores eléctricos de un automóvil. Se trata de un par de brazos rígidos que se articulan por el centro en forma de tijera. En los extremos superiores se fija la carga u objeto que se desea elevar. En el otro extremo se halla un conjunto de piñón cremallera que abre o cierra los dos brazos entre sí, moviendo consigo la carga. Como en los casos anteriores, también sería necesario un sistema de guiado en los laterales para el deslizamiento.

La principal ventaja se encontraría en un funcionamiento suave con un desplazamiento constante, aunque su principal inconveniente está en el volumen ocupado por el sistema y el riesgo de atrapamiento en el movimiento de tijera que sucede. Habría que proteger este sistema para evitar los accidentes, y añadir peso al conjunto. Además, los 2 brazos que forman la tijera serían mecanizados, aumentando el coste.

2.2 DESARROLLO DEL PROYECTO

Como se ha comprobado en el apartado anterior, existen varias soluciones para cumplir la tarea requerida en este proyecto. Entre todas las soluciones propuestas, hemos considerado la solución 1 como la más óptima, gracias a que dispone de un diseño compacto que otras soluciones no permiten. Además, la solución permite la auto retención del sistema a través de la elección de la geometría del husillo. Así, la idea principal de este Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de un sistema de elevación que tiene como elemento principal un husillo central que genera el movimiento. Se contará con un par de varillas laterales que servirán de guía para un patín central, que llevará fijado una plancha donde se anclan ambos brazos robóticos.

-2.2.1 Selección de componentes

Para el comienzo del desarrollo de este sistema de elevación, se ha planteado una placa base donde se fijarán el resto de componentes. En un primer momento, se planteó que la base estuviera en contacto con la persona y tuviera un revestimiento cómodo, pero finalmente se ha optado por una plancha de aluminio que se ancla a un soporte para la espalda ya existente, que aparece en la Figura 4 y en el que la ergonomía está testada en otros proyectos.



Figura 4: Soporte espalda

El centro de esta placa se ha vaciado para aligerar el conjunto en una de las zonas menos críticas con los esfuerzos que soportan. Con respecto a la elección de sus medidas, se ha utilizado un modelo realista de persona que tenemos disponible en 3D, con el objetivo de conseguir que los brazos suban desde la zona lumbar hasta la zona superior de los hombros, que aproximadamente está en 450 mm. En las Figuras 5 y 6 se muestra la plancha de aluminio y su posición sobre el usuario.

Los cálculos realizados con las cargas a soportar y la validación de las dimensiones de esta pieza están en el apartado 2.2.3, Dimensionamiento de componentes

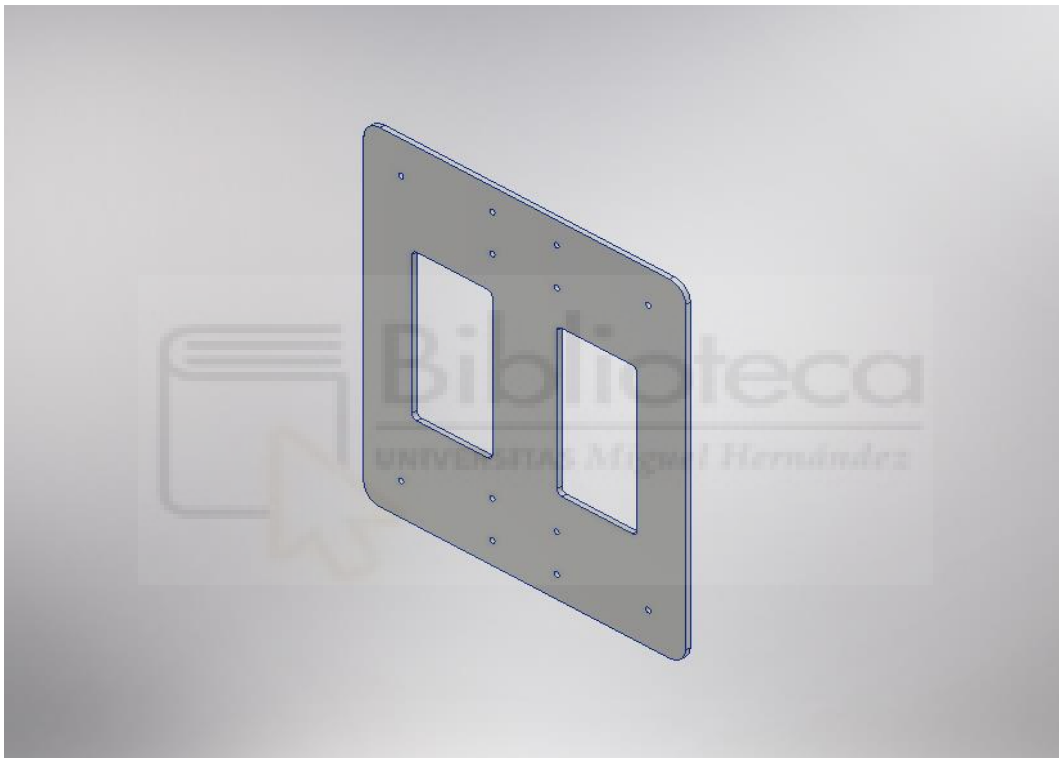


Figura 5: Placa base

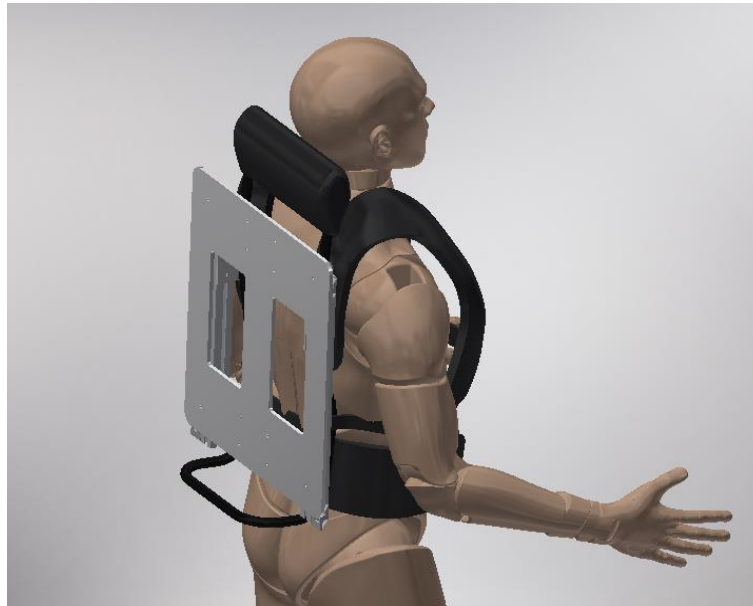


Figura 6: Ubicación en modelo 3D humano

Para fijar el resto de elementos que se van a instalar posteriormente, se añaden dos chapas plegadas en ambos extremos de la placa de la base. En la Figura 7 se puede observar la situación de dichas chapas

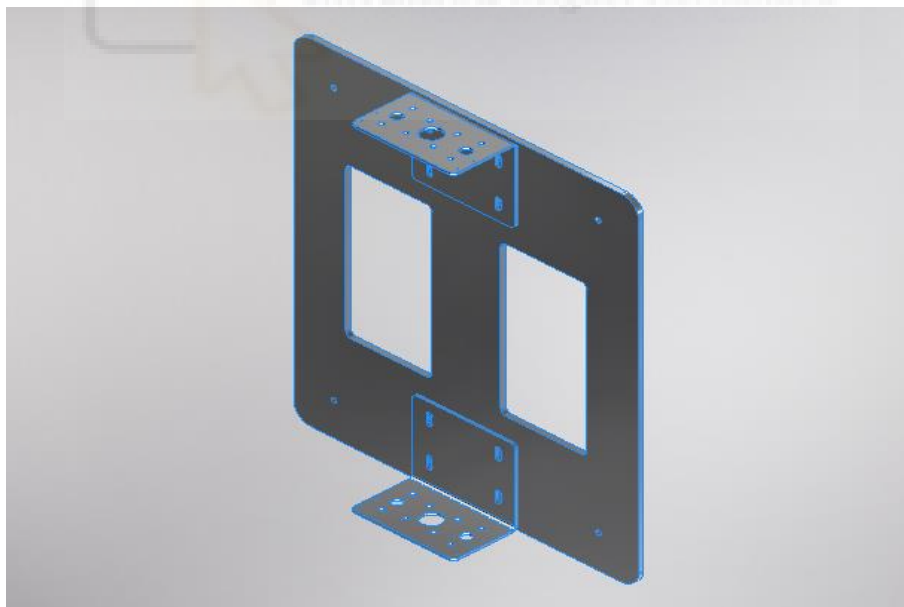


Figura 7: Chapas extremos superior e inferior

El siguiente paso es diseñar y ubicar el husillo. Desde un primer momento se ha continuado con la idea de utilizar un husillo en posición central, fijado entre 2 chapas (superior e inferior) que se anclen a la placa de la base.

Existen 2 factores importantes en el proceso de la elección del husillo: el par que va a soportar el elemento, y si buscamos o no la auto retención del conjunto. Ambos datos se contrastan con el cálculo de unas fórmulas donde se tiene en cuenta principalmente diferentes medidas de la rosca en cuestión, aunque también datos sobre el material del que están realizados o el coeficiente de fricción.

En nuestro caso, pretendemos que se produzca la auto retención. Este fenómeno desfavorece el rendimiento en funcionamiento del husillo, pero a cambio permite que, sin ningún sistema exterior, la carga se mantenga fija en cualquier punto que decidamos parar el avance. Se han incluido todas las roscas trapezoidales comerciales disponibles a una lista, ya que estas son las que más favorecen el sistema de auto retención. En la designación se indica el diámetro exterior y el avance. Hay varios tipos en los que el hilo es doble o triple, apareciendo la letra P (Cuando no es así, avance y paso toman el mismo valor). En todos los casos el ángulo β , semiángulo de la rosca, es 15° (expresado en radianes en la imagen). Todos estos datos y la lista completa de las roscas trapezoidales aparecen en la Tabla 1

Designación husillo (trapezoidal)	β (rad)	diametro nominal (d)	avance (l)	Paso (P)
TR6x2P1	0,26179939	6	2	1
TR8X1.5	0,26179939	8	1,5	1,5
TR10X2	0,26179939	10	2	2
TR10X3	0,26179939	10	3	3
TR12X3	0,26179939	12	3	3
TR12X6P3	0,26179939	12	6	3
TR14X3	0,26179939	14	3	3
TR14X4	0,26179939	14	4	4
TR16X2	0,26179939	16	2	2
TR16X4	0,26179939	16	4	4
TR16X8P4	0,26179939	16	8	4
TR18X4	0,26179939	18	4	4
TR18X8P4	0,26179939	18	8	4
TR20X4	0,26179939	20	4	4
TR20X8P4	0,26179939	20	8	4
TR24X5	0,26179939	24	5	5
TR26X5	0,26179939	26	5	5
TR28X5	0,26179939	28	5	5
TR30X6	0,26179939	30	6	6

Tabla 1: Medidas generales husillo

Comprobaremos primero cuales de las roscas en el listado permite la auto retención. Necesitamos sacar el diámetro medio del paso (D2). Utilizando este dato sacamos el ángulo α , un ángulo que está formado entre el avance y $D2 * \pi$, como vemos en el triángulo mostrado en la Figura 8. Y finalmente con el ángulo α podremos obtener el ángulo β_n que se encuentra en el plano axial. Las fórmulas quedan de la siguiente manera:

$$D2 = d - 0,5 * P$$

Fórmula 1: Diámetro medio del paso

$$\tan(\alpha) = \frac{l}{\pi * D2}$$

Fórmula 2: Ángulo α

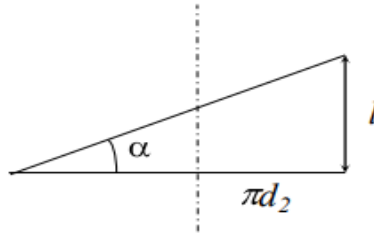


Figura 8: Triángulo α y $D2$

$$\tan(\beta n) = \tan(\beta) * \tan(\alpha)$$

Fórmula 3: Ángulo βn plano axial

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2:

Designación husillo (trapezoidal)	D2	α	βn
TR6x2P1	5,5	0,116268764	0,031285059
TR8X1.5	7,25	0,065952595	0,017695765
TR10X2	9	0,070853742	0,019014745
TR10X3	8,5	0,11281971	0,030349543
TR12X3	10,5	0,091197255	0,024499299
TR12X6P3	10,5	0,183924196	0,049804453
TR14X3	12,5	0,076543336	0,020546982
TR14X4	12	0,106503264	0,028638023
TR16X2	15	0,042466819	0,011385303
TR16X4	14	0,091197255	0,024499299
TR16X8P4	14	0,183924196	0,049804453
TR18X4	16	0,079745875	0,021409982
TR18X8P4	16	0,160512514	0,043355227
TR20X4	18	0,070853742	0,019014745
TR20X8P4	18	0,142422481	0,038403237
TR24X5	21,5	0,074161067	0,019905279
TR26X5	23,5	0,067829245	0,018200706
TR28X5	25,5	0,062494873	0,016765714
TR30X6	27	0,070853742	0,019014745

Tabla 2: Cálculos de α , βn y $D2$

El último paso para comprobar en que roscas se produce la auto retención es obtener el ángulo δ , incluyendo en estos cálculos el coeficiente de rozamiento característico de la tuerca que estemos utilizando. La fórmula es la siguiente:

$$\tan(\delta) = \frac{f}{\cos(\beta n)}$$

Fórmula 4: Ángulo δ

El coeficiente de fricción viene determinado por la tuerca que escojamos. Es un dato importante a tener en cuenta, ya que un coeficiente de fricción excesivo nos supondrá un exceso de gasto energético en el movimiento, aunque por otra parte también facilitará la auto retención. Así, después de varias comprobaciones variando el coeficiente de fricción en los cálculos y observando como varían los valores, se ha escogido una tuerca comercial con un coeficiente de fricción de 0,09. La tuerca es la siguiente:

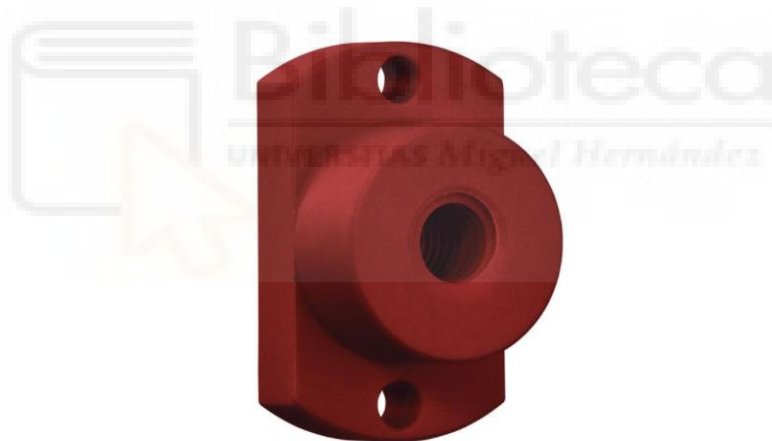


Figura 9: Tuerca del husillo

Las características técnicas de la tuerca se muestran a continuación:

Propiedades generales	
Material	igliidur® R
Dirección de la rosca	Rosca a la derecha
Tipo de rosca	Rosca trapezoidal
Peso	0,00 g
Densidad	1,39 g/cm ³
Color	Rojo oscuro
Absorción máx. de humedad (a 23 °C/73 °F, 50% r.h.)	0,2 Wt.-%, método de prueba DIN 53495
Máx. absorción de humedad	1,1 Wt.-%
Coefficiente de fricción, deslizamiento dinámico contra acero	0,09 - 0,25 μ
Valor pv máx. (en seco)	0,27 MPa · m/s
Con plano llave	Si

Tabla 3: Características técnicas tuerca del husillo

Teniendo el coeficiente de fricción, realizaremos los cálculos del ángulo δ . Al obtener este ángulo será necesario comprobarlo con el ángulo α anteriormente obtenido. Esto determinará si existe la auto retención o no.

- Si $\alpha > \delta \rightarrow$ No existe auto retención
- Si $\alpha < \delta \rightarrow$ Sí existe auto retención

En la Tabla 4 se muestran los resultados para todas las roscas trapezoidales de la lista. Estos datos nos permitirán descartar las roscas que no tengan auto retención, pero no podremos seleccionar aún ninguna en concreto, ya que tenemos que comprobar que el husillo puede resistir los esfuerzos y los momentos que están presentes

Designación husillo (trapezoidal)	α (rad)	δ (rad)	
TR6x2P1	0,116268764	0,089801882	no autorretención
TR8X1.5	0,065952595	0,089772154	autorretención
TR10X2	0,070853742	0,089774316	autorretención
TR10X3	0,11281971	0,089799306	no autorretención
TR12X3	0,091197255	0,089784974	no autorretención
TR12X6P3	0,183924196	0,089869013	no autorretención
TR14X3	0,076543336	0,089777023	autorretención
TR14X4	0,106503264	0,089794796	no autorretención
TR16X2	0,042466819	0,089763961	autorretención
TR16X4	0,091197255	0,089784974	no autorretención
TR16X8P4	0,183924196	0,089869013	no autorretención
TR18X4	0,079745875	0,08977864	autorretención
TR18X8P4	0,160512514	0,089842145	no autorretención
TR20X4	0,070853742	0,089774316	autorretención
TR20X8P4	0,142422481	0,089824047	no autorretención
TR24X5	0,074161067	0,089775864	autorretención
TR26X5	0,067829245	0,089772963	autorretención
TR28X5	0,062494873	0,089770723	autorretención
TR30X6	0,070853742	0,089774316	autorretención

Tabla 4: Auto retención

El siguiente paso será en calcular el momento necesario para elevar la carga. Además de para elegir el husillo, este cálculo nos viene bien para elegir el motor que va a accionar el sistema. El momento se calcula de la siguiente manera:

$$M = F * \frac{D2}{2} * \tan(\alpha + \delta)$$

Fórmula 5: Momento en el husillo

Todos los datos los hemos obtenido anteriormente, excepto F, que es la fuerza de la carga que tenemos que elevar. Hemos considerado para este valor 350 N, que son 35 kg que puede elevar, provenientes de la suma de ambos brazos, de la carga que sostienen (datos proporcionados) y de una estimación aproximada del resto de elementos diseñados en este Trabajo de Fin de Grado.

Además, hemos añadido el rendimiento del husillo, y comprobado que, el mejor rendimiento se obtiene en los casos que no existe auto retención, como hemos comentado anteriormente. El rendimiento se calcula de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \delta)}$$

Fórmula 6: Rendimiento del husillo

Los resultados sobre todas las roscas trapezoidales se muestran en la Tabla 5:

Husillo para que haya retención (trapezoidal)	M (N*m)	Rendimiento
TR6x2P1	0,201199073	0,558728737
TR8X1.5	0,199188504	0,420701442
TR10X2	0,255187707	0,438037417
TR10X3	0,305589211	0,55150828
TR12X3	0,336233952	0,499774267
TR12X6P3	0,516054887	0,662378863
TR14X3	0,367218097	0,456857428
TR14X4	0,417603585	0,537606378
TR16X2	0,349143093	0,319474919
TR16X4	0,448311936	0,499774267
TR16X8P4	0,688073182	0,662378863
TR18X4	0,479268625	0,466884274
TR18X8P4	0,716015266	0,633135975
TR20X4	0,510375415	0,438037417
TR20X8P4	0,745020058	0,606277635
TR24X5	0,622398434	0,449139441
TR26X5	0,653559195	0,427469086
TR28X5	0,68478563	0,407787485
TR30X6	0,765563122	0,438037417

Tabla 5: Momento y rendimiento husillo

Finalmente, comprobaremos que el husillo puede soportar esos esfuerzos comparándolo con la presión máxima que soporta su material. Es necesario calcular la presión media y cotejarla con la presión máxima superficial recomendada por el fabricante, que en este caso es 23 MPa. El cálculo de la presión media se realiza de la siguiente manera:

$$P = \frac{F}{\pi * D2 * 0,5 * m}$$

Fórmula 7: Presión media

Donde m es el número de pasos dentro de la tuerca, que podremos sustituir por d. En la Tabla 6 se muestran los resultados.

Husillo para que haya retención (trapezoidal)	Presión media (P) (N/mm2)
TR6x2P1	6,752027889
TR8X1.5	3,84167104
TR10X2	2,475743559
TR10X3	2,621375533
TR12X3	1,768388257
TR12X6P3	1,768388257
TR14X3	1,273239545
TR14X4	1,326291192
TR16X2	0,928403835
TR16X4	0,994718394
TR16X8P4	0,994718394
TR18X4	0,773669862
TR18X8P4	0,773669862
TR20X4	0,61893589
TR20X8P4	0,61893589
TR24X5	0,431815737
TR26X5	0,364675811
TR28X5	0,312068516
TR30X6	0,275082618

Tabla 6: Presión media husillo

Observamos que cualquier rosca en la lista soporta los esfuerzos en este caso. Se ha decidido elegir la rosca TR8x1.5 y TR10x2 (TR6x2P1 no es posible ya que no dispone de auto retención). Ambas roscas elegidas son válidas, pero estos cálculos no tienen en cuenta la longitud del husillo, simplemente que, en posición vertical, el husillo resiste las cargas.

También se ha estudiado el caso en el que el usuario flexione el torso a 90° dejando el sistema en posición horizontal y quedando las cargas en dirección radial al husillo.



Figura 10: Persona con el torso inclinado

Para ello se ha recreado el modelo del husillo en Inventor con sus dimensiones exactas, y se ha añadido la carga y la dirección que tendría con una posición totalmente horizontal para simularlo con el módulo de elementos finitos.

Se ha escogido primero el husillo con rosca TR8x1.5. El cálculo se ha realizado en la peor situación posible, con la carga suspendida del centro del husillo y con los apoyos en los extremos. En este caso se ha realizado con 120 N (350 N es la carga total, pero la he repartido entre ambas varillas y el husillo). El resultado es un coeficiente de seguridad de 0,45 y un desplazamiento de 1,6 mm, resultados mostrados en la Figura 11 y en la Figura 12. Debido a estos valores se ha descartado este husillo

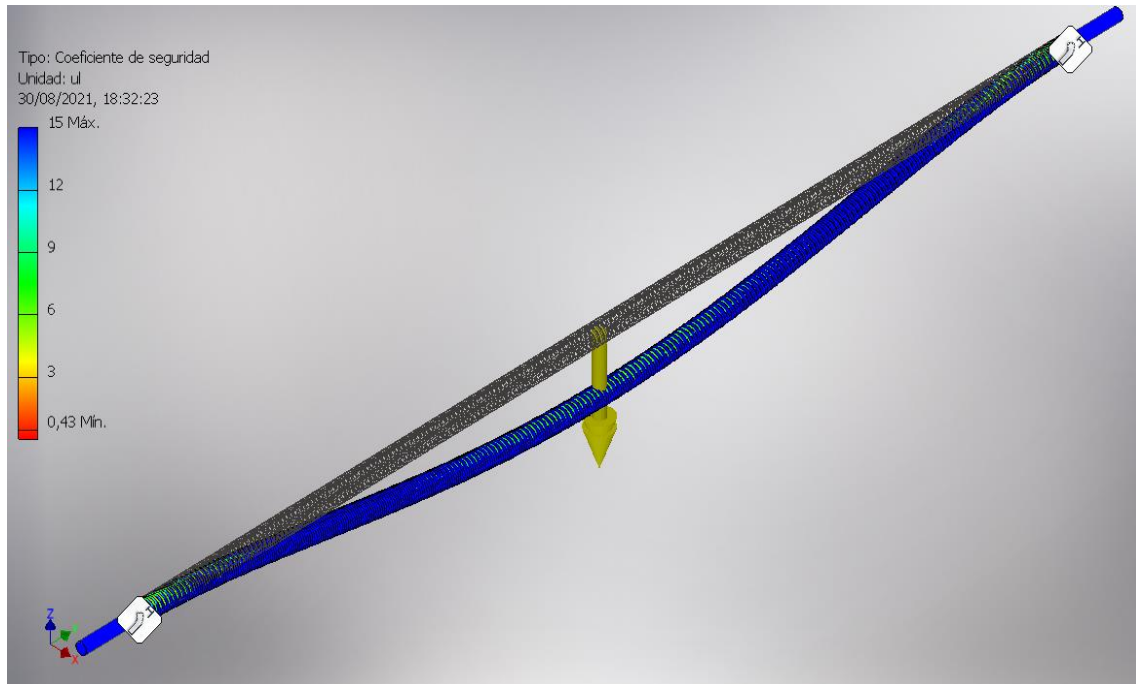


Figura 11: Coeficiente seguridad husillo TR8x1.5

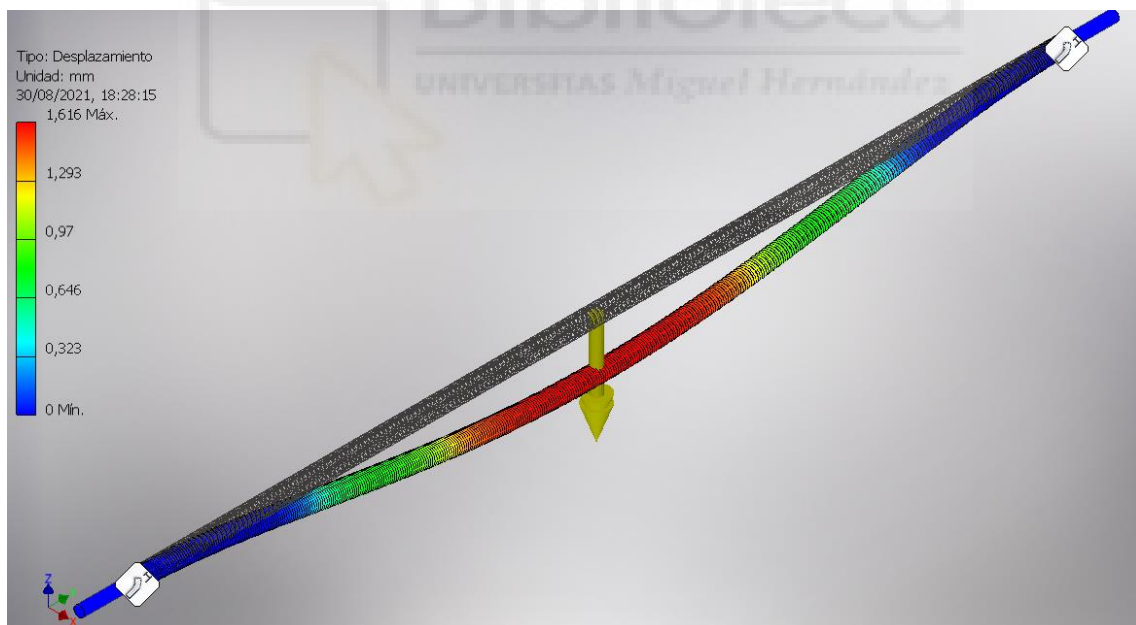


Figura 12: Desplazamiento husillo TR8x1.5

Realizamos el mismo procedimiento para el husillo TR10x2. En este caso el coeficiente de seguridad es mayor, 1.2 (además se encuentra en puntos muy concretos y en la

realidad, esta carga va a estar repartida entre todos los hilos que abarque la tuerca) y un desplazamiento máximo de 0,8 mm. Como consecuencia de estos datos que aparecen en las Figuras 13 y 14, se ha elegido este último husillo.

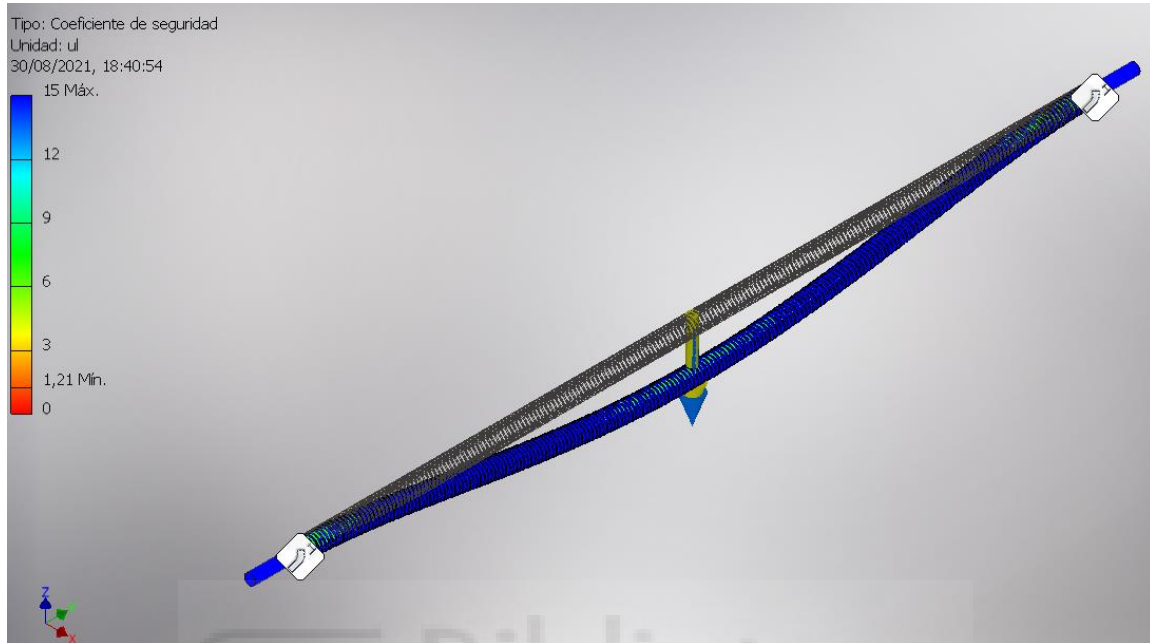


Figura 13: Coeficiente de seguridad TR10x2

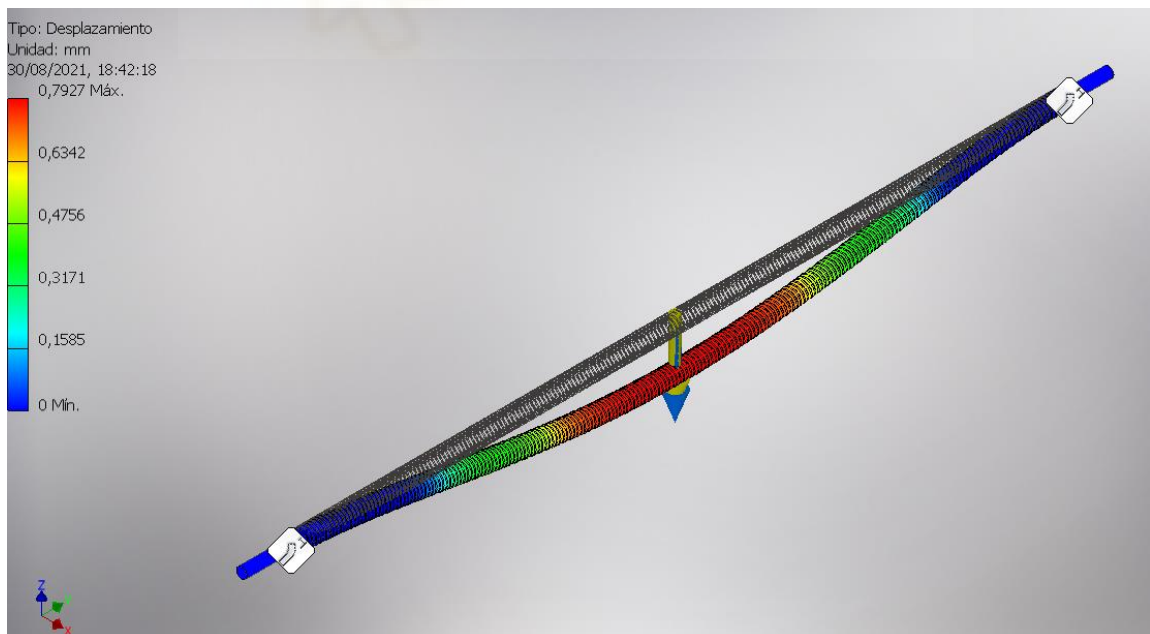


Figura 14: Desplazamiento husillo TR10x2

Para el contacto entre las varillas y el patín se han seleccionado un par de cojinetes que facilitan el deslizamiento cuando se produce el movimiento. Lo único a tener en cuenta es que tengan un coeficiente de fricción más bajo que el que tenemos en la tuerca. Las propiedades de estos cojinetes son las siguientes:

Propiedades generales	
Densidad	1,49 g/cm ³
Color	Amarillo
Absorción máx. de humedad (a 23 °C/73 °F, 50% r.h.)	0,3 Wt.-%, método de prueba DIN 53495
Máx. absorción de humedad	1,3 Wt.-%
Coefficiente de fricción, deslizamiento dinámico contra acero	0,06 - 0,18 μ
Valor pv máx. (en seco)	0,34 MPa · m/s
Máxima radiación radioactiva	3 · 10 ² Gy

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad	2,400 MPa, método de prueba DIN 53457
Resistencia a la flexión (a 20 °C/68 °F)	73 MPa, método de prueba DIN 53452
Carga de presión	60 MPa

Tabla 7: Características del cojinete de fricción

Gracias a los cálculos anteriormente descritos para el husillo, se dispone del par que es necesario para mover el conjunto, que como podemos observar en Tabla 5 es de 0,25 N*m para el husillo TR10 x 2. Optaremos por un motor eléctrico paso a paso ya que son más económicos. A pesar de que dichos motores tienen la desventaja de moverse entre posiciones predeterminadas, que distan entre sí un ángulo dado por las características del motor, no supone un contratiempo, ya que estos pasos son despreciables frente a los 2 mm que sube el conjunto cada 360° de vuelta del husillo.

Se ha seleccionado un motor con 0,5 N*m donde los pasos son de 1,8° cada uno. Las características son las siguientes:

Step angle	1,8° ± 5%
Rotor inercia	82g.cm ²
Masa	0,36 kg
Rated Voltage	3,06 V
Rated Current	1,7 A
Holding Torque	560 mNm
Detent Torque	24 mNm

Tabla 8: Características motor eléctrico

Los requisitos iniciales propuestos imponían una velocidad de traslación del sistema de elevación. Es importante comprobar que este motor es capaz de realizar el par necesario en el punto en el que se cumple la velocidad de traslación mínima, que se ha especificado como 18 mm/s, expresado en mm/min son 1080 mm/min. Con cada giro del husillo el patín avanza 2 mm, por lo que la velocidad de rotación como mínimo debe quedar en 540 rpm. Comprobamos con las tablas de torque/rpm de la Figura 31 si al menos el par es 0,25 N*m a 540 rpm.

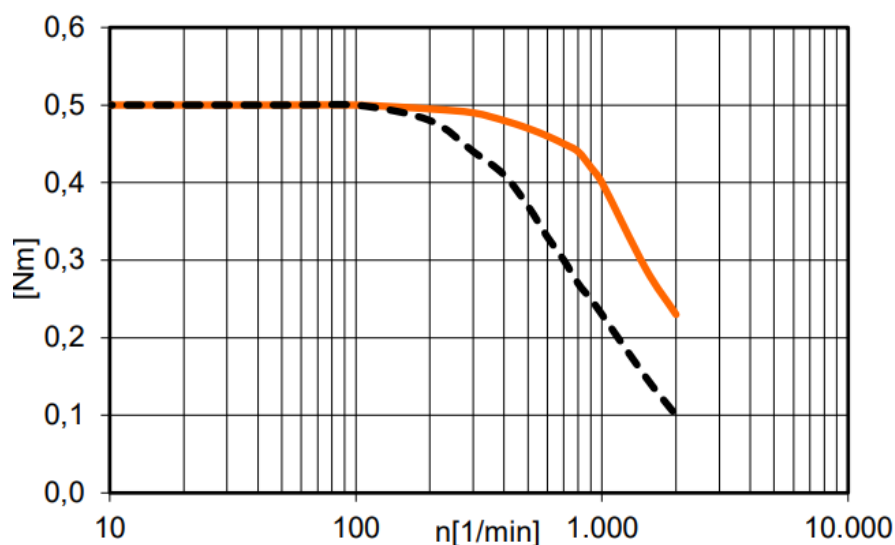


Figura 15: Curva torque/rpm motor eléctrico

Podemos observar como a 500 rpm el par es superior a $0,35 \text{ N}\cdot\text{m}$, por lo que la velocidad mínima está garantizada. A $0,25 \text{ N}\cdot\text{m}$ la velocidad de rotación está entre 800 y 900 rpm, consiguiendo una velocidad de 1600 mm/min o 26,7 mm/s

Se ha diseñado una chapa en perfil de U para fijar el motor eléctrico y atacar al husillo por la parte superior (el diseño es simétrico y si fuera necesario se podría montar por la parte inferior del sistema). La conexión de ambos ejes (del husillo y del motor eléctrico) se hace a través de un acoplamiento rígido para una transmisión de par directa. Este acoplamiento rígido ya tiene la reducción necesaria para adaptarse a ambos ejes, con un diámetro de 8 mm en el caso del husillo y de 5 mm en el caso del motor eléctrico. En la Figura 16 se observa en detalle estos elementos descritos

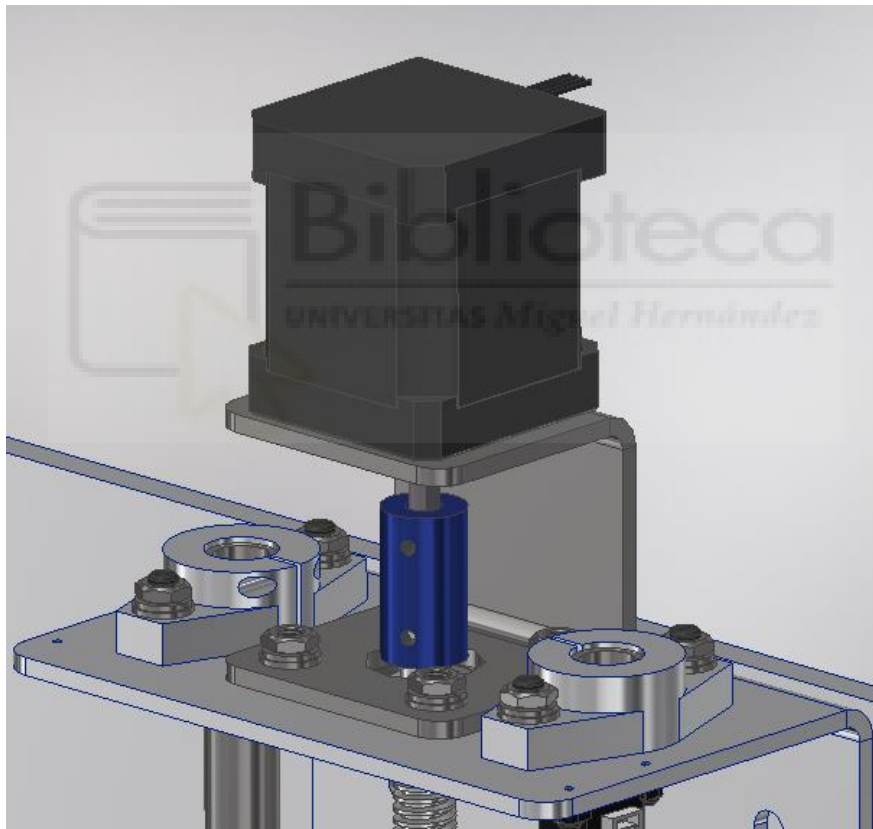


Figura 16: Fijación motor eléctrico

Para el correcto funcionamiento del husillo, se han incorporado 2 rodamientos en ambos extremos del husillo. Estos rodamientos se han apoyado en el inicio de la rosca

trapezoidal, comprobando las medidas máximas características del rodamiento. En la Figura 17 se muestra esta solución

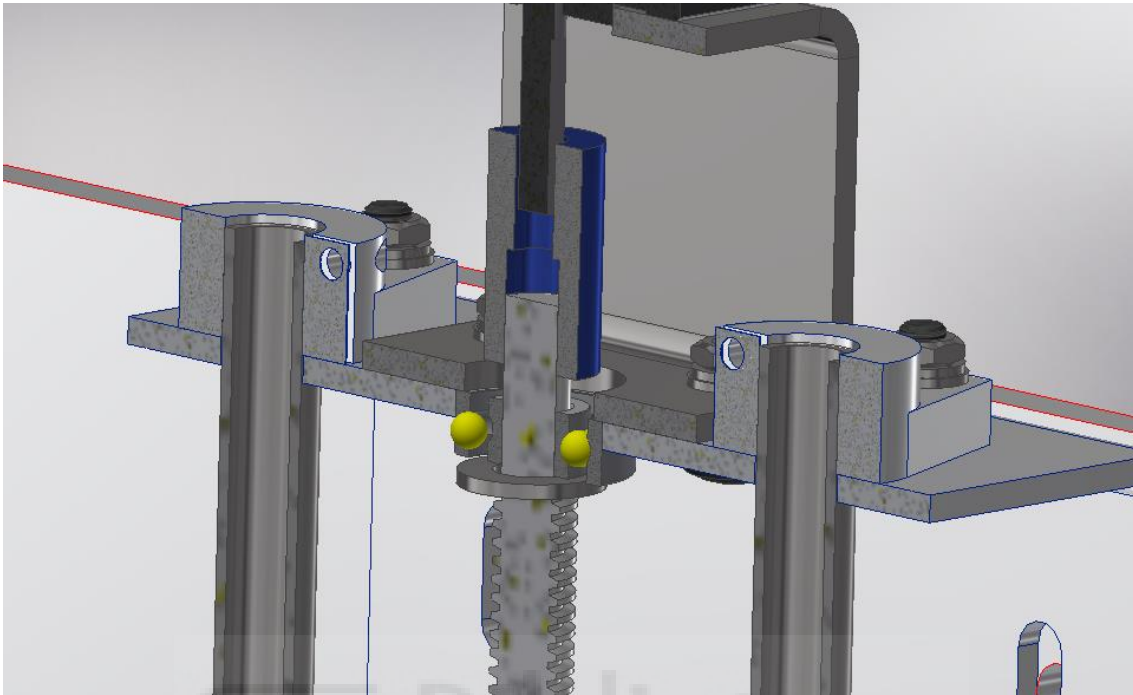


Figura 17: Fijación rodamiento superior

Para el extremo inferior o el extremo donde no esté instalado motor eléctrico, se ha colocado una chapa de acero inoxidable como cierre del rodamiento. Esta chapa se encuentra por debajo de los componentes comerciales que sujetan las varillas, como podemos observar en la Figura 18

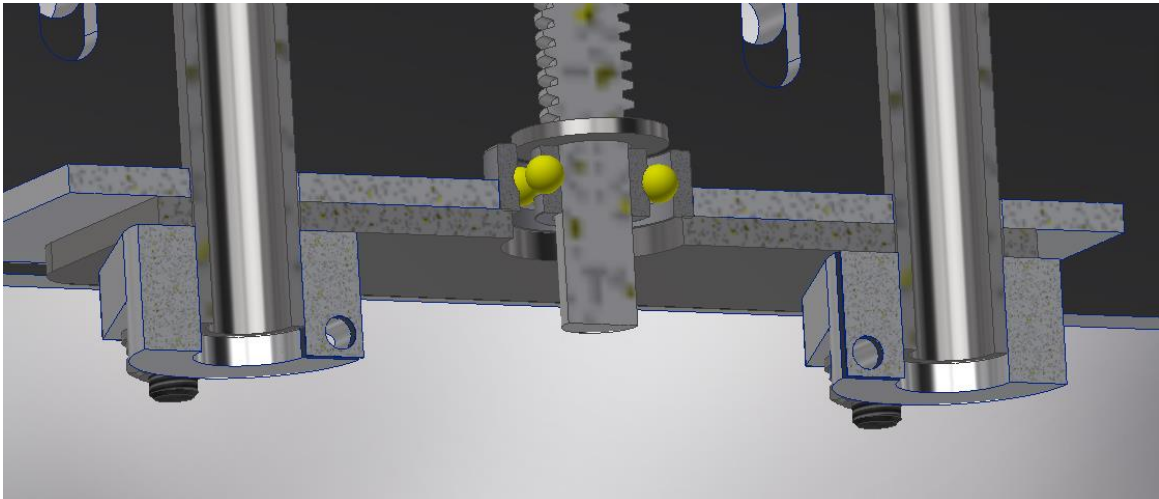


Figura 18: Fijación rodamiento inferior

Comprobamos en la Tabla 9 que soporta las cargas estáticas y la velocidad de rotación de forma holgada, datos que hemos obtenido anteriormente en la elección del motor y del husillo

DATOS DEL CÁLCULO

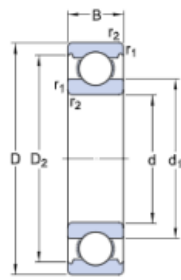
C	3.45 kN	Capacidad de carga dinámica básica
C_0	1.37 kN	Capacidad de carga estática básica
P_u	0.057 kN	Carga límite de fatiga
	75 000 r/min	Velocidad de referencia
	48 000 r/min	Velocidad límite
k_f	0.025	Factor de cálculo
f_0	12	Factor de cálculo

MASA

	0.012 kg	Rodamiento de masa
--	----------	--------------------

Tabla 9: Características rodamiento

Las medidas del rodamiento que se ha utilizado son las siguientes



DIMENSIONES

d	8 mm	Diámetro del agujero
D	22 mm	Diámetro exterior
B	7 mm	Ancho
d ₁	≈ 12.15 mm	Diámetro del resalte del aro interior
D ₂	≈ 19.2 mm	Diámetro del rebaje del resalte del aro exterior
r ₁	min. 0.3 mm	Dimensión del chaflán del aro exterior

Tabla 10: Medidas rodamiento

Al husillo le acompañan 2 varillas que funcionan de guía para la subida y bajada del patín central. Además, estas varillas funcionan como rigidificación del conjunto, conectando la chapa superior e inferior. Son varillas huecas, de diámetro 12mm y espesor 1mm. En un primer momento se consideró que fueran varillas macizas con los extremos roscados, pero se descartó por peso y coste mayor.

Para el anclaje de dichos elementos, se ha utilizado unos soportes comerciales que las fijan de forma lateral y abrazan la varilla con una buena superficie de contacto para su correcta sujeción. En la Figura 19 se pueden observar ambos elementos.

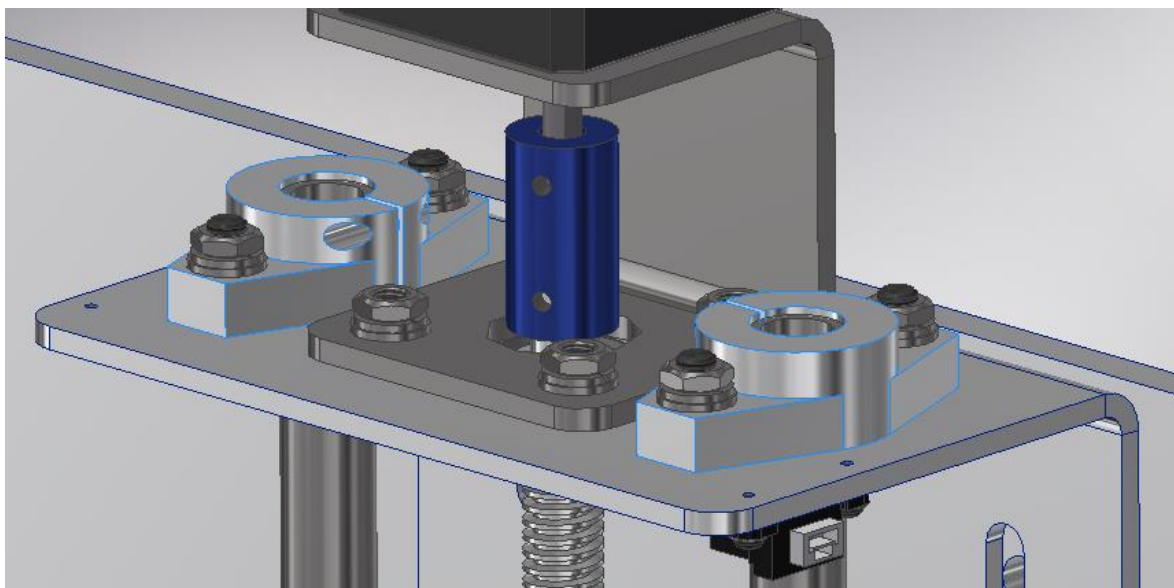


Figura 19: Fijación varillas

El patín central que interactúa con el husillo y efectúa el movimiento de traslación a lo largo del sistema de elevación es una pieza fundamental en el desarrollo del conjunto. Para su diseño, se ha recurrido a un núcleo de plástico, donde se acomodará la tuerca del husillo y los cojinetes de las varillas. La Figura 20 muestra como es dicha pieza

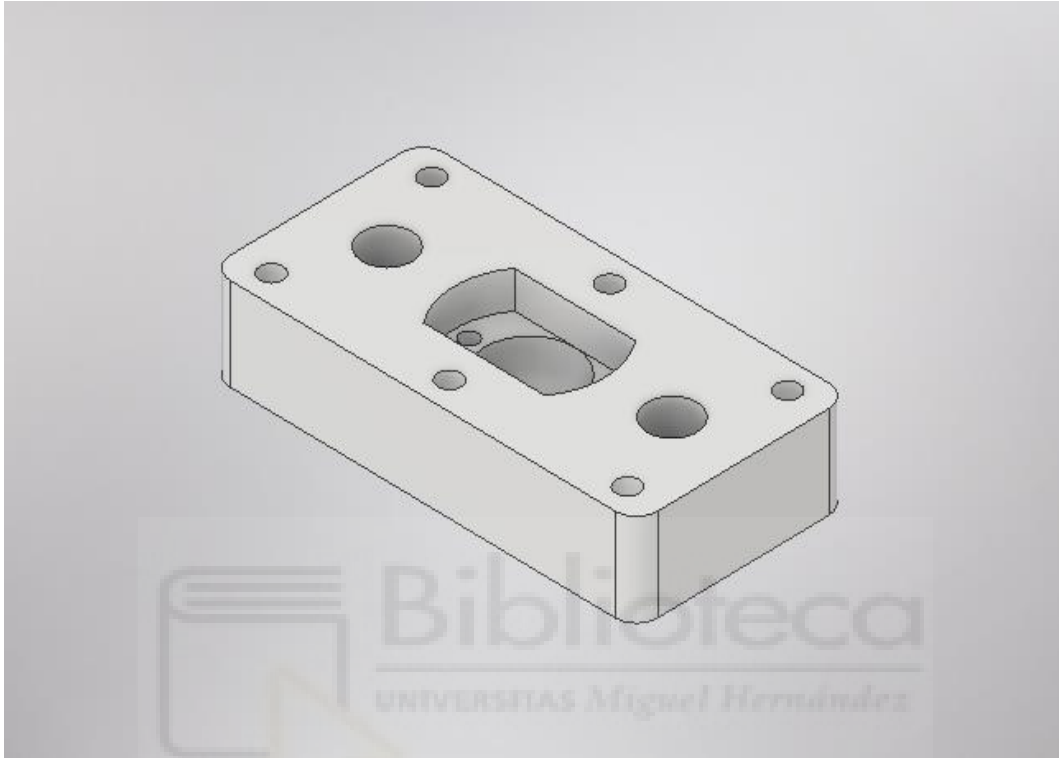


Figura 20: Núcleo patín central

Este núcleo de plástico irá rodeado de 2 chapas de aluminio plegadas. Estas chapas tienen 2 funciones: Por un lado, con pernos que atraviesan de extremo a extremo, realizan el cierre del núcleo de plástico y retienen los elementos que en él van incrustados. Por otro lado, a estas chapas se fija la placa que soportará ambos brazos robóticos. En la vista seccionada de la Figura 21 se puede distinguir el patín central y los elementos que en él van incrustados. La Figura 22 muestra las chapas que realizan el cierre del núcleo

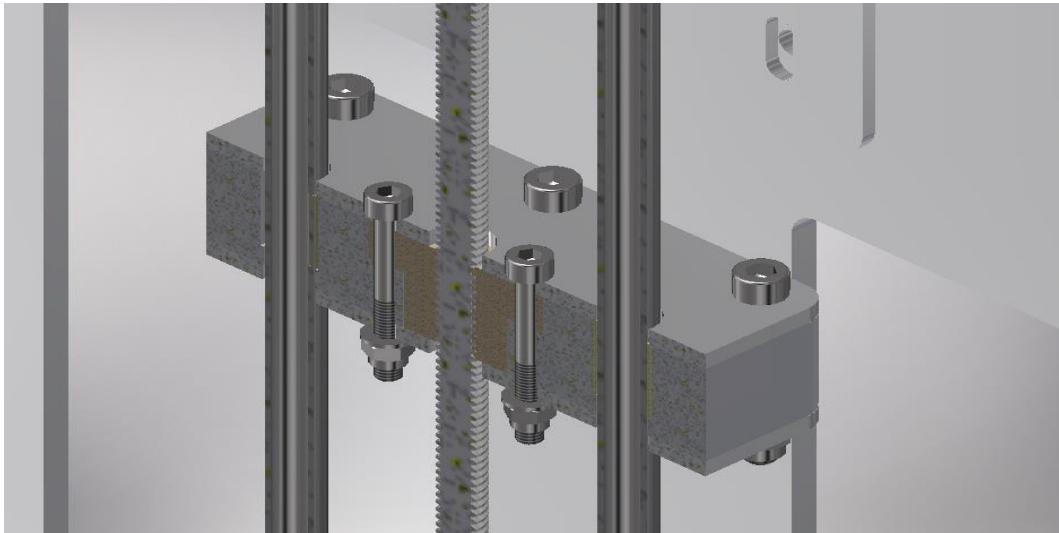


Figura 21: Vista seccionada patín central

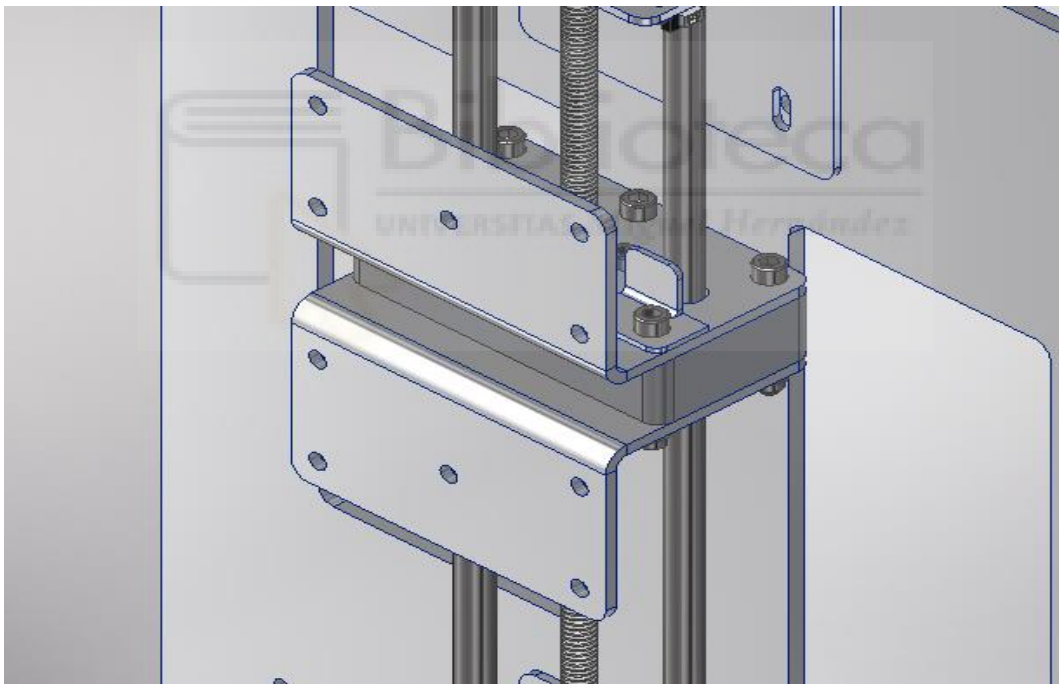


Figura 22: Chapas patín central

El diseño y el dimensionamiento de la chapa que une ambos brazos robóticos de forma solidaria y que se fija a las chapas del patín central se encuentra en la sección 2.2.2 Dimensionamiento de componentes

Para detectar el final del recorrido del patín central se han añadido 2 sensores ópticos (Figura 23). Estos 2 sensores se han colocado en ambas chapas fijas (superior e inferior) y funcionan detectando una pequeña chapa plegada en ambas caras del patín, que se muestra en la Figura 24. Así podremos detectar y parar el avance de los brazos robóticos antes del tope.



Figura 23: Sensor final de carrera

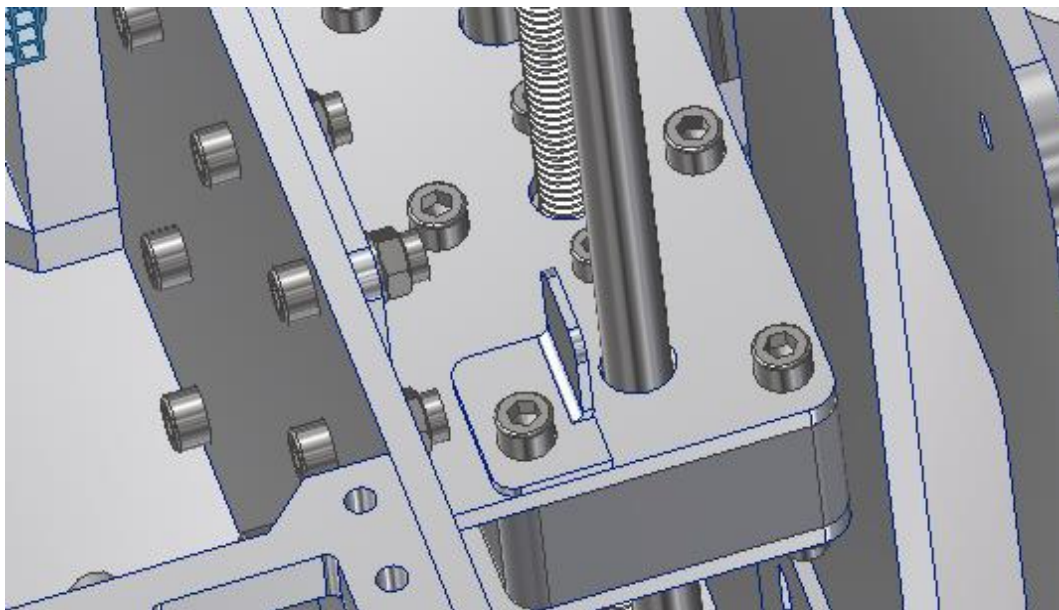


Figura 24: Chapa detección final de carrera

-2.2.2 Dimensionamiento de los componentes

Existen varios componentes principales que son críticos a la hora de soportar las cargas. En este apartado se realizan varias simulaciones con dichas cargas y en las posiciones más desfavorables del sistema

- **Placa para la sujeción de brazos**

Esta placa une ambos dos brazos de forma solidaria para que el movimiento de traslación sea al unísono. Se fija a la parte central con el patín. Se ha utilizado Aluminio en busca de ligereza para el conjunto.

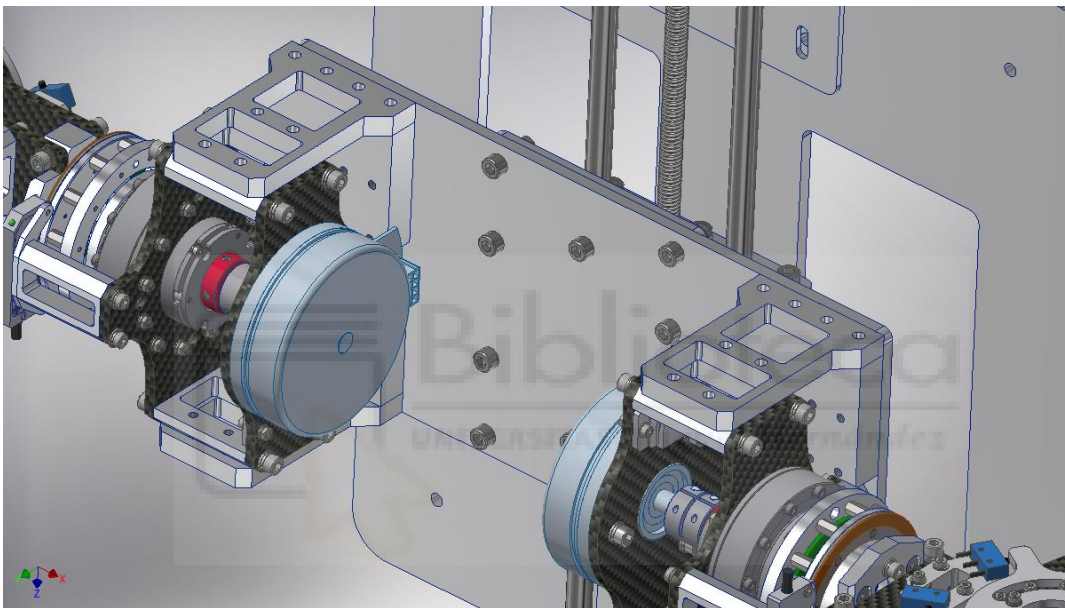


Figura 25: Placa sujeción brazos

Las medidas de esta placa son 335 mm x 160 mm en su cara frontal, determinadas por la distancia a la que se tienen que colocar los brazos y por la anchura de la base que está diseñada. El grosor de la placa determinará la resistencia de este componente para soportar los esfuerzos. Se ha realizado la simulación en el caso más desfavorable: con los brazos robóticos totalmente extendidos y la carga de 3 kg máxima sujeta en el extremo. La carga correspondiente al brazo, 120 N (en la simulación, la flecha roja), se ha colocado a 400 mm de la cara frontal de la base, la mitad de la distancia total del brazo robótico, y a 335 del centro por cada lateral. Además, se ha añadido el valor de la gravedad y

colocado las fijaciones en las que va a estar sujeto. El grosor de la placa es de 4 mm y los resultados son los siguientes:

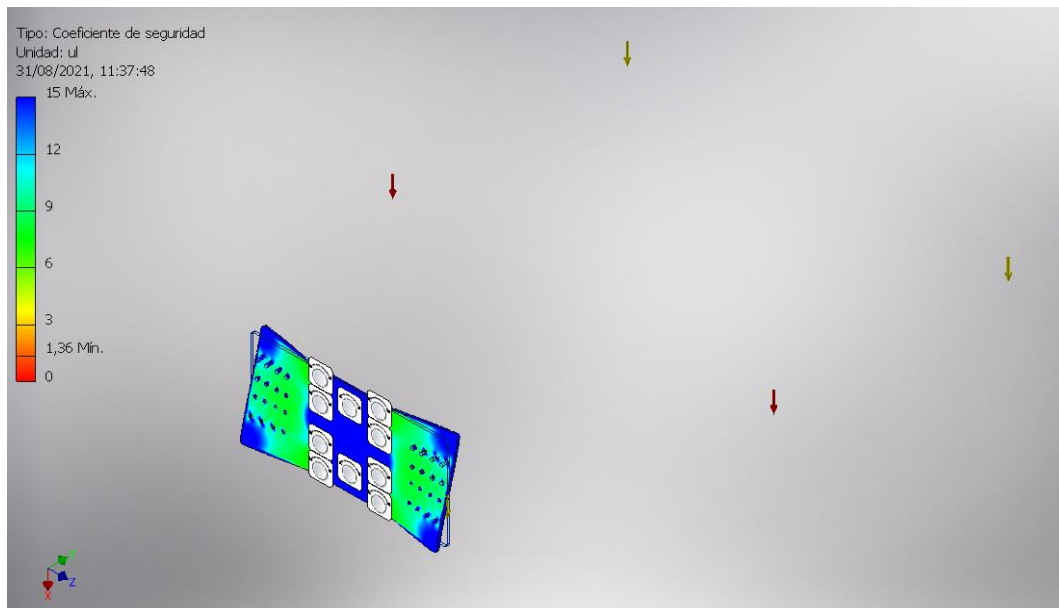


Figura 26: Coeficiente seguridad placa sujecion 4mm

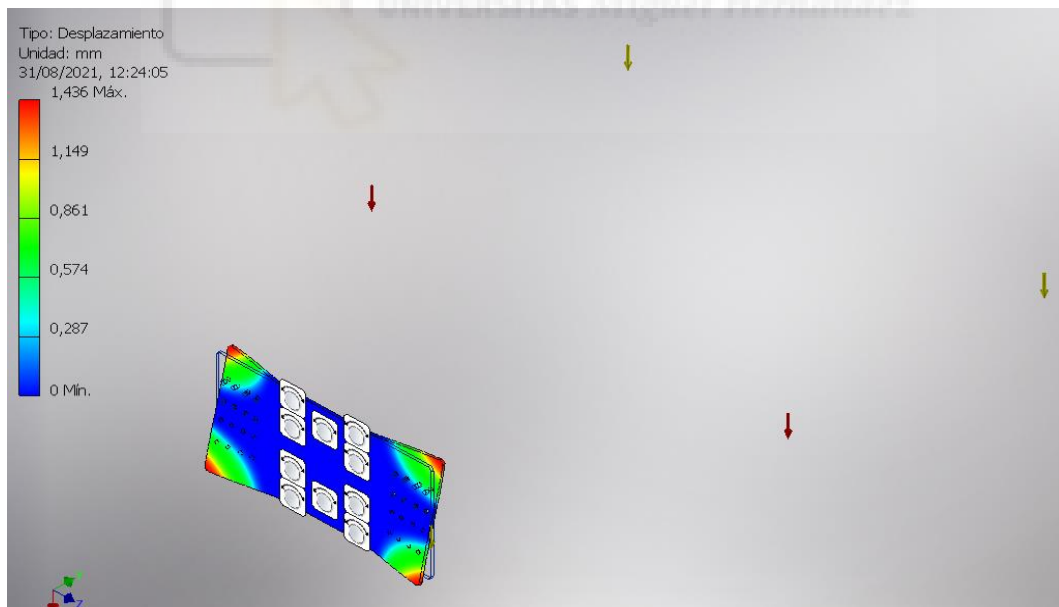


Figura 27: Desplazamiento placa sujecion 4 mm

El coeficiente de seguridad queda en 1.4 y el desplazamiento de la placa llega a 1,5 mm en su valor máximo como se puede observar en las Figuras 26 y 27. Estos valores se encuentran muy al límite de la resistencia de la pieza, así que se repite la simulación, aumentando este componente a un espesor de 6 mm, y repitiendo todos los procesos de reparto de cargas, fijaciones, etc. Los resultados son los siguientes

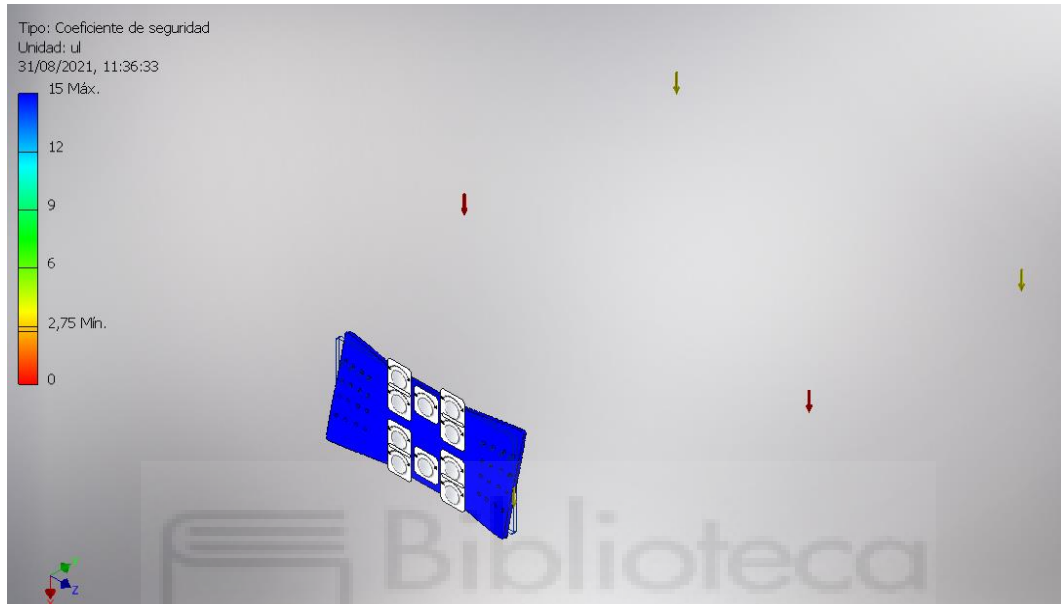


Figura 28: Coeficiente de seguridad placa sujeción 6 mm

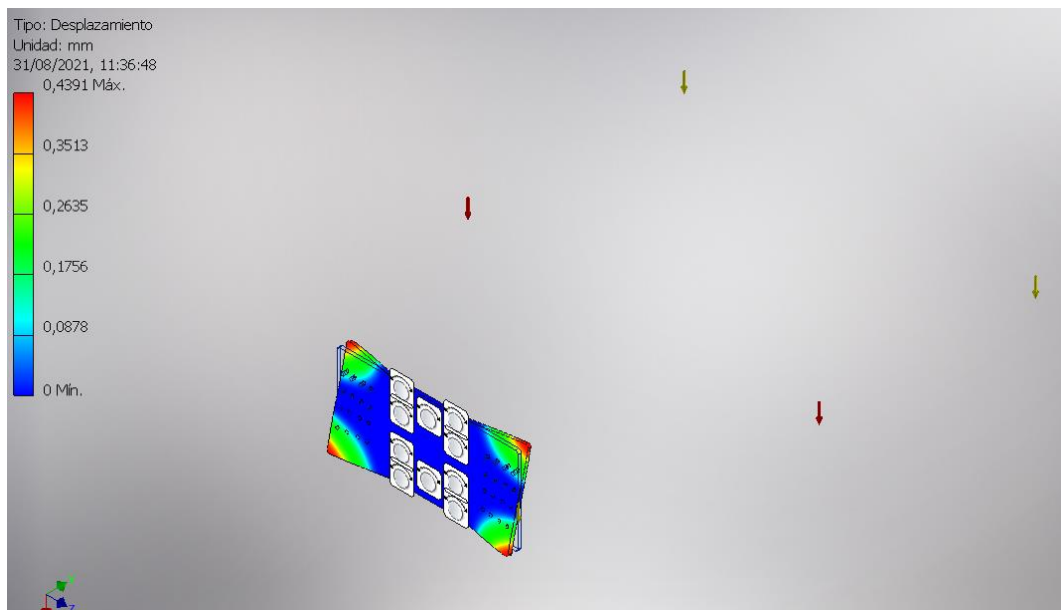


Figura 29: Desplazamiento placa sujeción 6 mm

En este caso, el máximo desplazamiento es de 0,44 mm y el coeficiente de seguridad dado es de 2,75 (Figura 28 y 29), valores más que correctos para la fabricación. Así queda el diseño de esta placa de sujeción de los brazos

- **Placa para soporte de la base**

Esta placa soporta todo el conjunto y va anclado al sistema de sujeción para la espalda. Sus medidas son 450 mm x 400 mm determinadas por la posición de la mochila de sujeción y por los requisitos para que los brazos robóticos recorran de la parte lumbar hasta por encima de los hombros. Se ha seleccionado aluminio para contener el peso y se ha aligerado la pieza en la parte central de manera que no afecte a la rigidez. Por ser el componente principal he seleccionado inicialmente un espesor de 8 mm y he repetido el proceso de cálculo de esfuerzos, añadiendo, a parte de las cargas antes mostradas en la placa de sujeción de los brazos (120 N correspondientes al brazo en la parte central y 30 N en los extremos por la carga), la carga del resto del sistema diseñado (80 N en la parte central de la placa). Además, se ha añadido el valor de la gravedad y la fijación en las 4 esquinas donde se va a fijar con varios pernos. Los resultados son los siguientes:

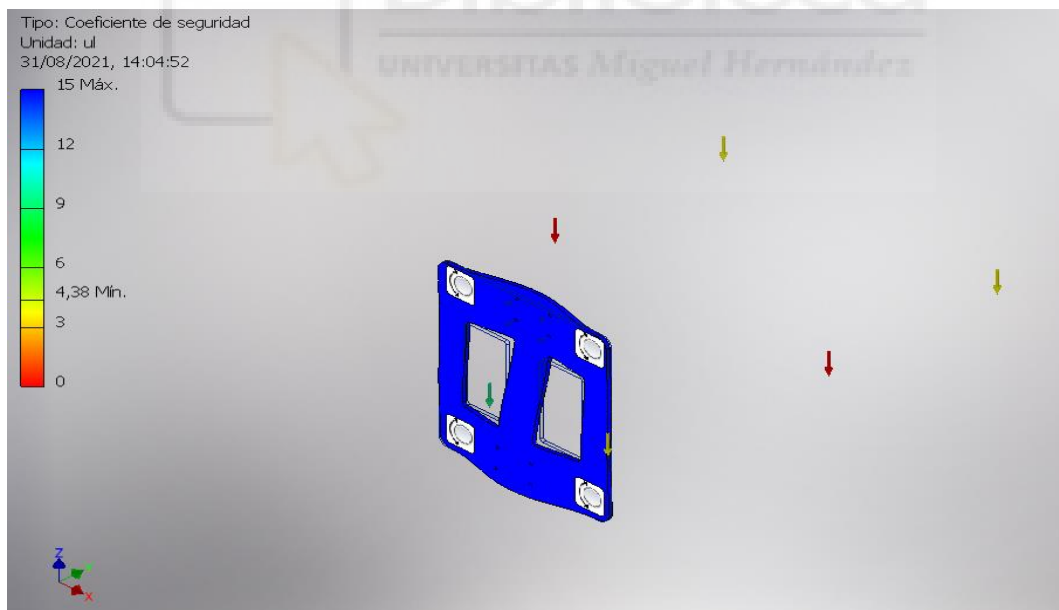


Figura 30: Coeficiente seguridad placa de la base de 8 mm

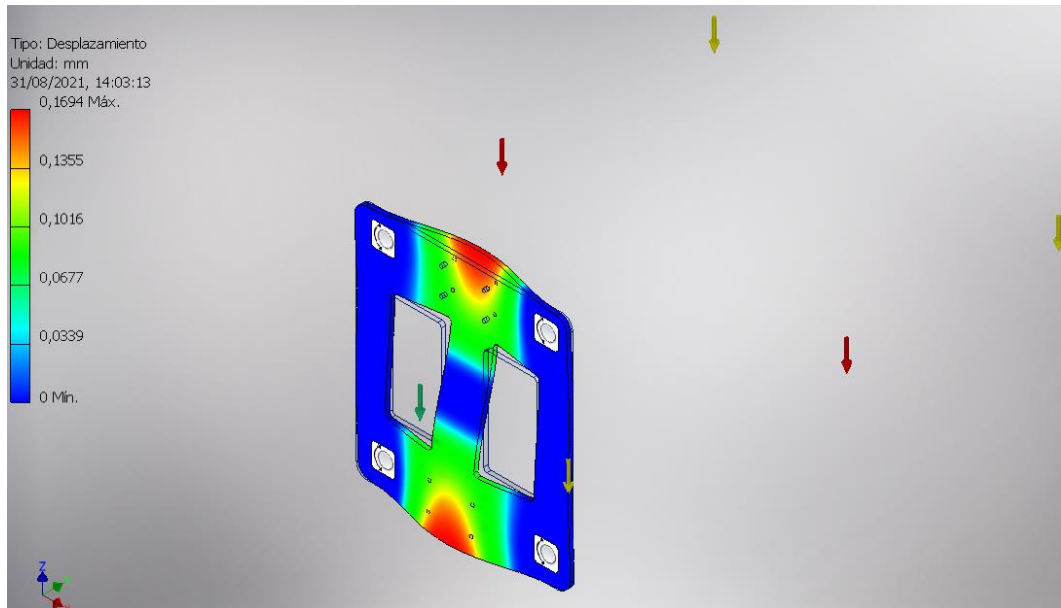


Figura 31: Desplazamiento placa de la base de 8 mm

Por lo visto en las Figuras 30 y 31, el valor máximo de desplazamiento es de 0,17mm y el coeficiente de seguridad es superior a 4, por lo que se puede optimizar más este componente para que sea más liviano y resista igualmente los esfuerzos dados. Por lo tanto, se modifica el espesor a 6mm sin modificar otras cotas o la distribución de esta placa. Tampoco modificamos las cargas que se han incluido. El resultado es el siguiente:

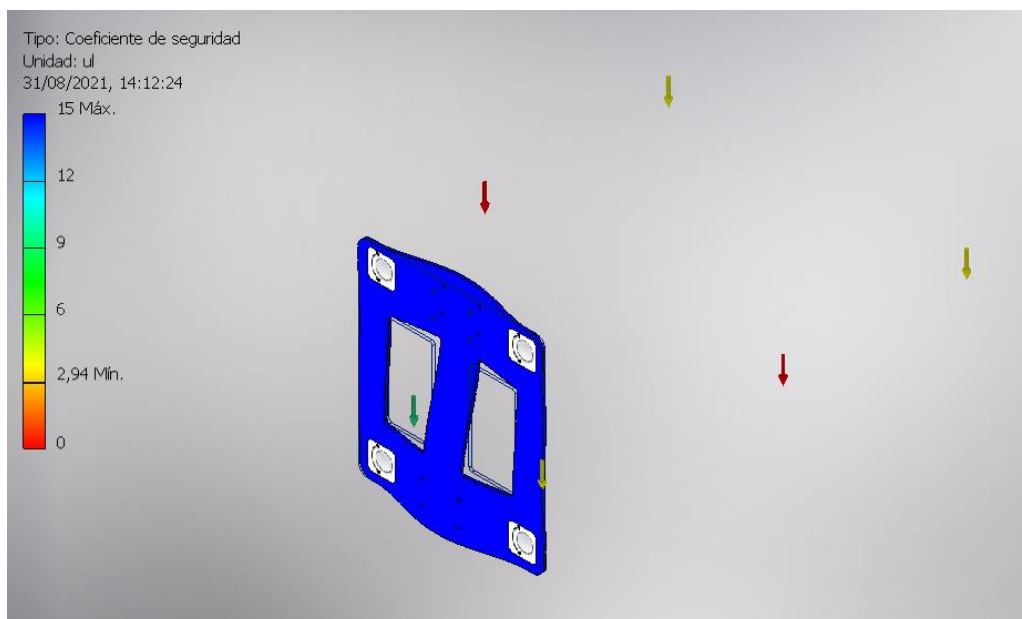


Figura 32: Coeficiente de seguridad placa base 6mm

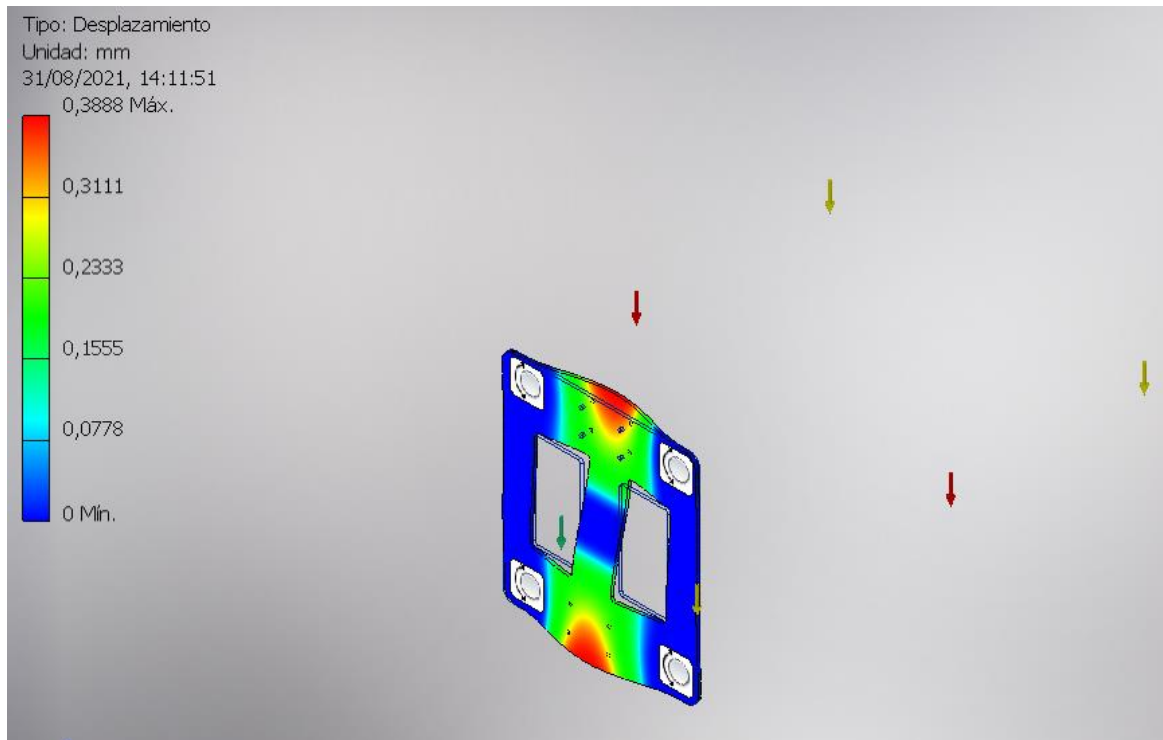


Figura 33: Desplazamiento placa base 6mm

El desplazamiento máximo que se da es de 0,39 mm y el coeficiente de seguridad es de 2,9 (Figuras 32 y 33 respectivamente). Por lo tanto la placa sigue siendo válida para la aplicación pero se ha reducido el coste y el peso de este elemento.

2.2.3 Prototipo final

Recapitulando lo explicado anteriormente, la tarea de elevación de los brazos robóticos queda asignada a un husillo central, trapezoidal TR10x2 de 450 mm de largo en acero. El movimiento lo realiza un patín central deslizando sobre un par de varillas a ambos lados del husillo. El motor eléctrico, de 0,5 Nm, es tipo paso a paso y se encuentra en la parte superior del sistema accionando el husillo. El conjunto diseñado tiene un peso de 6 kg y es capaz de soportar 35 kg de peso (requisitos del proyecto). Las dimensiones externas del sistema de elevación son 550 mm x 400 mm x 100mm. En la Figura 34 se encuentra representado el conjunto



Figura 34: Conjunto completo sistema de elevación

En la Figura 35 se muestra el conjunto completo sobre el modelo de persona

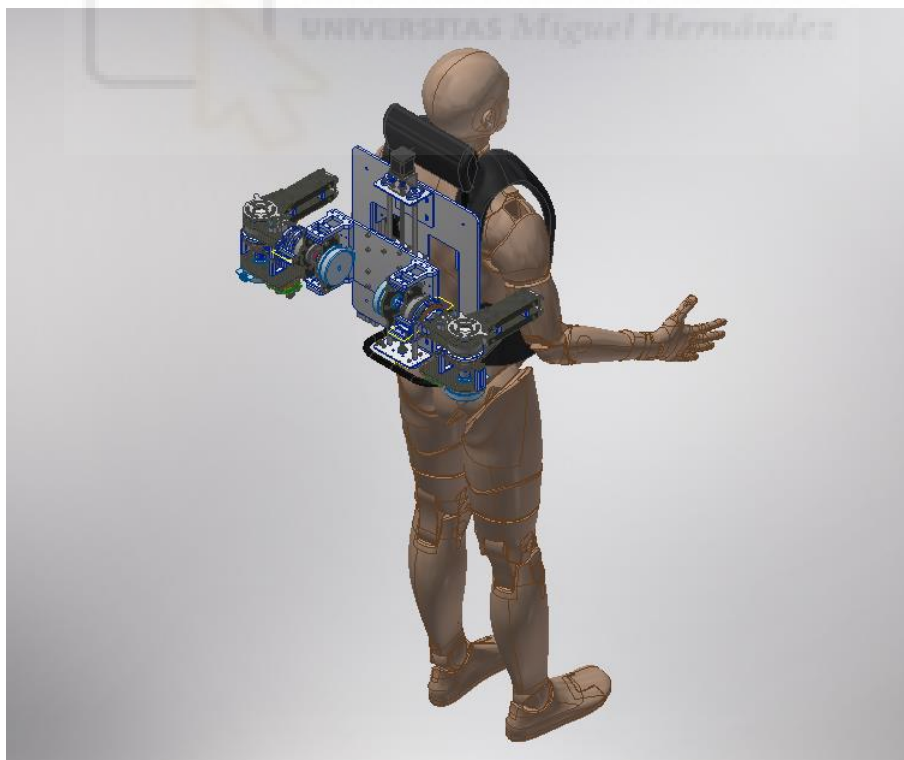


Figura 35: Conjunto sistema de elevación y persona

CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este documento se recoge el proceso de desarrollo de un sistema de elevación de brazo robótico para tareas industriales. Dichos brazos robóticos se han diseñado en el proyecto SecondArms, que surge con la intención de reducir posibles trastornos músculo esqueléticos que aparecen al llevar a cabo tareas industriales. Para la elección del sistema de elevación, se ha tenido en cuenta varias posibles soluciones, escogiendo la más óptima en la búsqueda de un sistema compacto, sencillo y liviano. Finalmente, se ha elegido un sistema de tuerca y husillo central, a través del cual un patín central se desliza, ejerciendo así el movimiento.

Para trabajos futuros, queda pendiente la validación de este sistema con un prototipo real, ya que, por problemas en la entrega de algunas materias primas, no disponemos de todos los materiales para su construcción, y así poder observar posibles aspectos a mejorar durante sus pruebas.



Referencias

- [1] M. F. V. Fernández, «Riesgos de trastornos musculoesqueléticos en la población laboral española,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2014.
- [2] D. Van Eerd, C. Munhall, E. Irvin, D. Rempel, S. Brewer y A. J. van der Beek, «Effectiveness of workplace interventions in the prevention of upper extremity musculoskeletal disorders and symptoms: an update of the evidence,» *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 73, nº 1, pp. 62-70, 2016.
- [3] A. Blanco, J. M. Catalán, J. A. Díez, J. V. García, E. Lobato y N. García-Aracil, «Electromyography assessment of the assistance provided by an upper-limb exoskeleton in maintenance tasks,» *Sensors*, vol. 19, nº 15, p. 3391, 2019.
- [4] A. Blanco, D. Martínez, J. M. Catalán, J. V. García, S. Ezquerro, J. A. Díez y N. García-Aracil, «Oxygen consumption in industrial tasks assisted by an active upper-limb exoskeleton,» de *2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Nueva York, 2020, pp. 576-580.
- [5] D. Martínez-Pascual, F. García-Verdú, F. J. Verdú-García, M. Arnau-Papí, L. D. Lledó-Pérez, F. López-Labrador, M. Á. Bernal y N. García-Aracil, «Análisis de planificación de trayectorias libres de colisiones con el operador humano en sistemas robóticos de tipo supernumerario,» de *XLII Jornadas de Automática*, Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2021, pp. 419-426.