



Universidad
de La Laguna

Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología
Sección de Ingeniería Industrial

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Grado

Diseño de un exoesqueleto: brazos

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Alumnos: Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Tutor: Carmelo Militello Militello

Junio, 2015

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Índice General

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Memoria.....	1
Anexo I: Cálculo Analítico.....	41
Anexo II: Simulación.....	84
Anexo III: Catálogo del Actuador.....	152
Planos.....	171
Pliego de Condiciones.....	184
Mediciones y Presupuesto.....	187

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Memoria

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Memoria

1	Hoja de identificación.....	1
2	Abstract.....	2
3	Objeto.....	3
4	Alcance.....	3
5	Antecedentes.....	4
5.1	Exoesqueleto militar “Fortis” de Lockheed Martin.....	4
5.2	Exoesqueleto desarrollado por DARPA.....	5
5.3	HAL Robot.....	6
5.4	Titan Arm.....	6
6	Normas y referencias.....	7
6.1	Normas.....	7
6.2	Bibliografía.....	7
6.3	Programas de cálculo.....	8
7	Requisitos de diseño.....	8
8	El exoesqueleto general.....	8
8.1	Partes del exoesqueleto.....	8
8.2	Interfaces y limitaciones del exoesqueleto.....	11
9	Estudio antropométrico y limitaciones del movimiento.....	13
9.1	Introducción.....	13
9.2	Medidas antropométricas.....	13
9.2.1	Manual de Antropometría Normal Patológica, Pablo Lapunzina & Horacio Aiello, Ed. Masson.....	13
9.3	Valores para el cálculo y diseño.....	16
9.4	Limitaciones al movimiento.....	17
10	Análisis de soluciones.....	20
10.1	Modelo con tubos en fibra de carbono y rótulas de acero.....	20

10.2	Modelo integro en fibra de carbono	21
10.3	Modelo metálico con rótulas macizas.	22
10.4	Modelo metálico con rótulas aligeradas.	23
11	Actuadores.	24
12	Resultados finales.	28
12.1	Antebrazo.	28
12.1.1	Rótula del extremo libre del antebrazo.	29
12.1.2	Rótula del codo.	30
12.1.3	Perfil del antebrazo.	30
12.2	El soporte del antebrazo.	31
12.2.1	Guía.	31
12.2.2	Enganche de la guía.	32
12.2.3	Vástago auxiliar.	32
12.2.4	Reposabrazos.	33
12.3	Pala para el enganche de la carga.	34
12.4	Brazo.	34
12.4.1	Rótula del hombro.	35
12.4.2	Rótula del codo.	36
12.4.3	Tubo exterior del brazo.	36
12.4.4	Tubo interior del brazo.	37
12.5	El actuador.	38
13	Conclusiones.	39

1 Hoja de identificación.

Proyectistas			
Nombre:	Josué Cabrera Delgado	Nombre:	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez
Dirección:	C/Folías nº1 portal 3 2ºA, El Sobradillo	Dirección:	C/ Arzobispo Elías Yanes nº 66, San Lázaro
Localidad:	Santa Cruz de Tenerife	Localidad:	San Cristóbal de La Laguna
C.P.	38107	C.P.	38206
Teléfono:	652668273	Teléfono:	680627058
Email:	alu0100698954@ull.edu.es	Email:	alu0100693447@ull.edu.es

Promotor	
Nombre:	Universidad de La Laguna
Dirección:	Avda. Astrofísico Fco. Sánchez s/n
Localidad:	San Cristóbal de La Laguna
C.P.	38206
Teléfono:	922318303
Email:	cmilite@ull.es

2 Abstract.

This project has been developed to design a mechanical arm, as a part of an exoskeleton, which could be used by a person to pull and push loads up to 441 N (per arm). The exoskeleton involves three different parts: the base, which lets the user move himself forward and backward, the back, which bears the shoulders where the arms are fixed, and the arms, which carry the load.

Firstly, it was necessary to determine the anthropometric proportions of the human body, regarding to the shoulders, the arm, the forearm and the hand. By this reason, some bibliography has been checked. As these measures vary depending on the person (male or female, the age, the height), the arm and the forearm must be adjustable.

Then, according to the anthropometric measures for the design, the forces and moments acting on the arm were calculated by using a free body diagram or force diagram, knowing that the actuators which move the arm are linear and they are articulated at their ends. The actuators are electric, and they were selected by analyzing the advantages and disadvantages of each system between electrical, pneumatic and hydraulic. The electrical actuators show the right characteristics, referring to the load, the speed and the power consumption. The pneumatic actuators were too big and heavy for this prototype, and the hydraulic ones, even though their weight was fewer, could pull the same loads as the electrics, but with higher power consumption.

At the beginning of the design stage, a carbon fibre model and a metallic model were developed. The carbon fibre model had an extraordinary strength with really low weight, but the material and its manufacturing process is too expensive, needing more time and equipment to produce one arm than the metallic model. Finally, the metallic model was selected as the definitive one. This model has different welded tubes and pieces.

In order to analyze the worst load cases for the different parts, arm and forearm, to obtain the stress and strain, a FEM software was used. Also, the stability of the parts has been verified by a buckling analysis.

Finally, a system for supporting the forearm has been designed. This lets the user adjust the right measure. The length of the arm is adjusted by a bolt before using the arm.

3 Objeto.

El presente trabajo fin de grado tiene por objeto el diseño de un brazo mecánico para un exoesqueleto.

El proyecto surge con la idea de facilitar la realización de su trabajo a los operarios de almacén que, durante el mismo, levantan cargas pesadas y con el paso del tiempo sufren problemas de salud derivados.

Por ello se pretende que sea el brazo del exoesqueleto el que soporte las cargas y las transmita al resto de la máquina.

4 Alcance.

Para entender el alcance de este proyecto es necesario contextualizarlo como parte de un proyecto mayor, que es la realización de un exoesqueleto completo. Por ello, ha habido interfaces en el diseño del brazo, especialmente en lo referente al diseño del hombro el cual resulta un punto de unión con la estructura de la espalda, cuya realización queda a cargo de otros ingenieros. Por tanto, el alcance de este proyecto abarca:

- Dimensionado previo general del equipo completo
- Definición de las interfaces de los subconjuntos
- Cálculo y prediseño del brazo.
- Selección de componentes comerciales.
- Diseño 3D asistido por ordenador.
- Simulaciones de la respuesta de los componentes para distintos estados de carga mediante software de elementos finitos.

El diseño se realizará empleando acero y atendiendo a la facilidad de construcción en un futuro.

Este proyecto, por la propia naturaleza del mismo, tendrá como ámbito de aplicación la industria, especialmente en empresas donde sus empleados tengan como cometido la manipulación de cargas pesadas.

Asimismo, no se aplicará la normativa correspondiente a seguridad de máquinas industriales ya que el proyecto trata del análisis de viabilidad constructiva de un prototipo.

5 Antecedentes.

El diseño y fabricación de exoesqueletos o estructuras auxiliares de apoyo al cuerpo humano se ha incrementado en los últimos años pero sin llegar a sobrepasar los límites de lo que se entiende por un prototipo. Así pues, si bien tanto universidades como diferentes empresas han desarrollado sus propios conceptos de “exoesqueleto”, no hay un consenso sobre qué aspectos deben tenerse en cuenta o cómo debe fabricarse. Lo único seguro es que su finalidad es la de asistir al cuerpo humano, o a alguna de sus partes, a ejercer movimientos y mover cargas sin que ello repercuta en la anatomía del usuario. Son pues, elementos que han de servir como apoyo al sujeto, debiendo ajustarse a sus movimientos.

Algunos de los prototipos desarrollados dentro de la última década, y que pueden ayudar a entender algunas de las pautas seguidas para el desarrollo del brazo, se detallan a continuación.

5.1 Exoesqueleto militar “Fortis” de Lockheed Martin.

Desarrollado para el Gobierno de los Estados Unidos por la empresa americana Lockheed Martin, tiene como función asistir al usuario en trabajos rutinarios de mantenimiento y reparación en instalaciones militares, soportando las cargas de máquinas-herramientas principalmente.



Figura 1. Exoesqueleto militar FORTIS (Fuente:
<http://www.lockheedmartin.com/us/products/exoskeleton/FORTIS.html>)

Atendiendo a la fotografía en la que se muestra a un hombre equipado con el exoesqueleto y haciendo uso de él, se entiende que éste es un conjunto sencillo de barras, articulaciones y elementos auxiliares que consiguen transmitir el peso de la herramienta que

acciona el usuario hacia el suelo a través de la estructura auxiliar que dicho exoesqueleto proporciona. Con ello se consigue reducir la carga de trabajo muscular que el operario ha de realizar. No obstante, obsérvese que no existen elementos auxiliares tales como brazos, pues la herramienta queda sujeta mediante un enganche telescópico que transmite la carga a la estructura de las piernas, y ésta al suelo. Este diseño, si bien es sencillo y práctico de cara a trabajos de esta índole, resulta limitado en las cargas que soporta y en los movimientos que puede efectuar el operario. Además, nótese que se requiere igualmente cierta tensión muscular por parte del sujeto para mantener un equilibrio de la estructura.

5.2 Exoesqueleto desarrollado por DARPA.

Desarrollado para usos militares, es similar al exoesqueleto Fortis, pero en este caso su acometida principal es la de asistir al usuario en el transporte de elevadas cargas en su espalda, transfiriendo estas cargas al suelo por medio de una estructura auxiliar.



Figura 2. Exoesqueleto DARPA (Fuente: <http://nologia.com/2013/08/29/los-exoesqueletos-del-darpa-para-crear-super-soldados-del-siglo-xxi/>)

Estos dos exoesqueletos carecen ambos de estructuras para los brazos, pero cuentan con aspectos constructivos interesantes, como el uso de partes separadas para las rótulas y para los elementos de soporte y, en esencia, cumplen la misma función que se desea para el brazo mecánico, soportar las cargas liberando al usuario de dicho esfuerzo.

5.3 HAL Robot.

Desarrollado por la japonesa CYBERDYNE funciona en sí mismo como un traje acoplado al cuerpo, haciendo las funciones de exoesqueleto de manera directa. Asiste al usuario en los movimientos y lo libera de esfuerzos y cargas. Este prototipo está tan desarrollado que incluso cuenta con sensores capaces de leer las señales nerviosas que el cerebro envía a los músculos durante los diferentes movimientos, favoreciendo el correcto funcionamiento del exoesqueleto y habiendo retroalimentación del ciclo movimiento-actuación.



Figura 3. Exoesqueleto HAL (Fuente: <http://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/>)

5.4 Titan Arm.

Desarrollado por estudiantes de la universidad de Pennsylvania, este brazo mecánico permite al usuario soportar una carga de hasta 18 kg por brazo. El brazo asiste al usuario transmitiendo la carga a la espalda, siendo este su peor inconveniente, pues se concentra el peso en dicha zona.



Figura 4. Brazo mecánico TITAN (Fuente: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2521245/Titan-Arm-bionic-exoskeleton-lets-users-lift-extra-40lb-effortlessly.html>)

6 Normas y referencias

6.1 Normas

- UNE-EN ISO 2553:2014 Soldeo y procesos afines. Representación simbólica en los planos. Uniones soldadas.
- UNE 1039:1994 Dibujos técnicos. Acotación. Principios generales, definiciones, métodos de ejecución e indicaciones especiales.
- UNE 1027:1995 Dibujos técnicos. Plegado de planos.
- UNE 157001:2014 Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- UNE EN ISO 14121-1:2008 Seguridad de las máquinas. Evaluación del riesgo.

6.2 Bibliografía.

En este apartado se cita el conjunto de libros, revistas u otros textos considerados durante la realización de este proyecto.

- Manual de Antropometría Normal y Patológica, Pablo Lapunzina y Horacio Aiello, Ed. Masson.
- Resistencia de materiales, Robert L. Mott, Ed. Pearson, 5ª Edición.

- Tratado teórico-práctico de elementos de máquinas, G. Niemann, Ed. Labor S.A.
- Manuales de ayuda de SolidWorks(www.solidworks.com/support)

6.3 Programas de cálculo.

En el presente proyecto se ha utilizado el siguiente software:

- Dimensionado de piezas mediante SolidWorks.
- Simulación computacional mediante SolidWorks Simulation.
- Excel.

7 Requisitos de diseño

Para hacer la máquina lo más funcional posible, ésta debe cumplir con una serie de requisitos de diseño en lo referente a su fabricación y uso. Estos requisitos son:

- El brazo debe ser diseñado de tal forma que se puede adaptar a la medida de los brazos de diferentes personas.
- El conjunto debe ser lo más ligero posible.
- Los elementos sometidos a cargas deben diseñarse con la suficiente seguridad para el uso al que se los someterá, entendiéndose por tal un dimensionamiento de los mismos lejos del régimen plástico de los materiales.

8 El exoesqueleto general.

Como se mencionó con anterioridad, el diseño del brazo mecánico forma parte de un proyecto mayor, abarcando todo un exoesqueleto que dote al usuario de capacidad suficiente para mover cargas sin que se requiera esfuerzo muscular por parte del mismo. A estos efectos, se especifican a continuación las partes de dicho exoesqueleto, sus limitaciones y la integración de las diferentes partes con sus interfaces.

8.1 Partes del exoesqueleto.

El exoesqueleto a diseñar consta de tres partes principales:

- Una base o soporte que sustente los diferentes elementos así como al usuario, y que permita al usuario desplazarse por el espacio de trabajo.
- Una espalda, que se fija a la base y sirve de soporte a los brazos mecánicos, además de tener una función ergonómica.

- Los brazos mecánicos, que serán los elementos que soporten directamente la carga transmitiéndola al resto del exoesqueleto, con actuación externa para que el usuario únicamente se encargue del control de los movimientos no debiendo efectuar esfuerzo alguno.

En la figura 5 se muestra el conjunto del exoesqueleto a modo esquemático y sus subconjuntos.

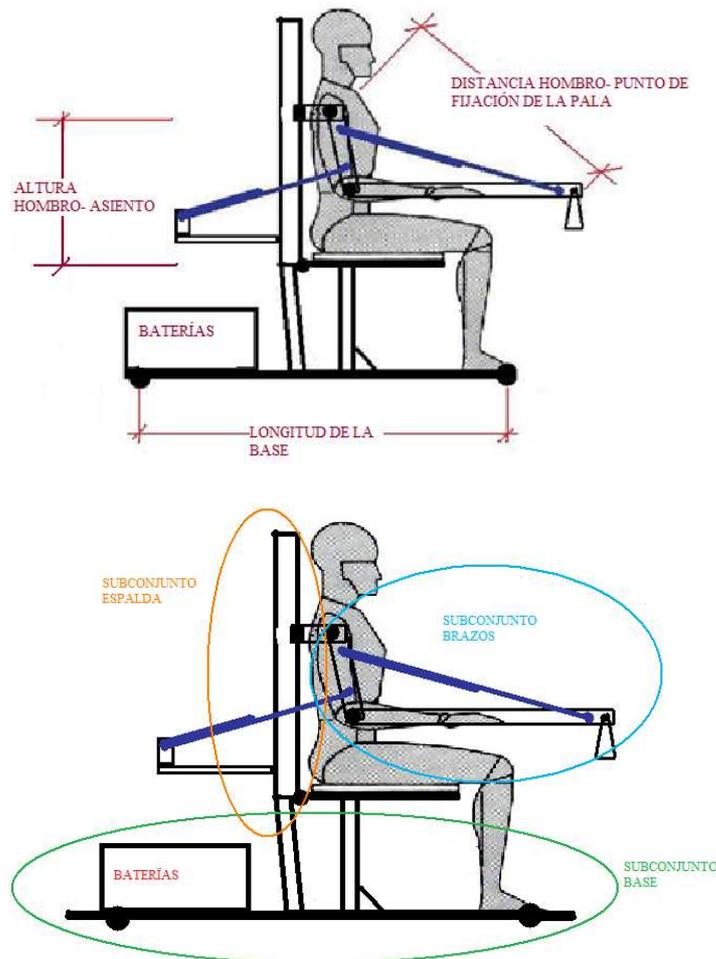


Figura 5. Esquema general del conjunto del exoesqueleto y sus diferentes partes.

Los diferentes subconjuntos y su ensamblaje general tal como se han modelado se muestran a continuación. Puede haber cierta variación de los subconjuntos de espalda y base respecto al diseño final.

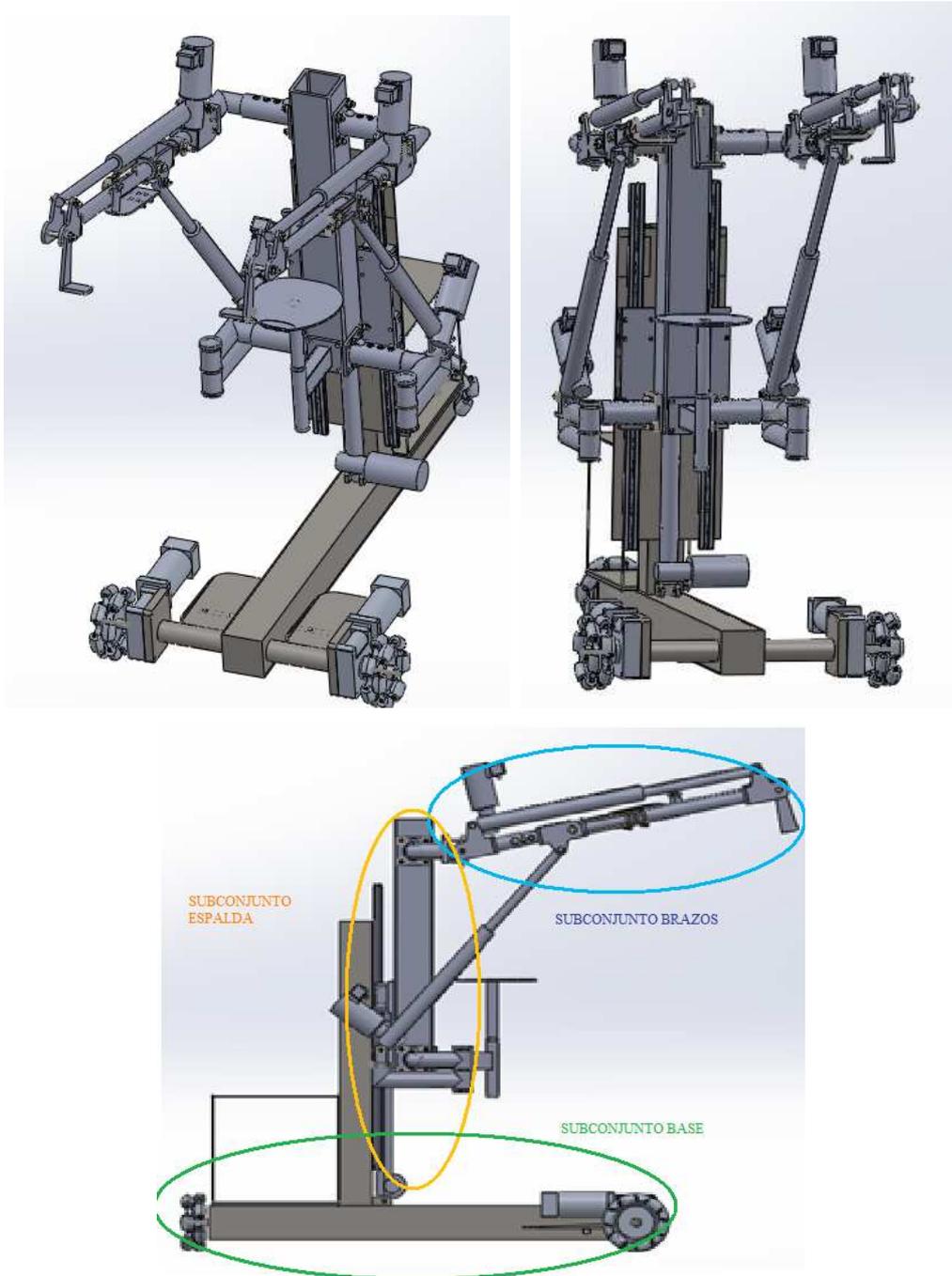


Figura 6. Vista general del exoesqueleto con sus diferentes partes.

El subconjunto de la base está conformado por perfiles metálicos. Cuenta con dos ejes y “omniwheels”, un tipo especial de ruedas que facilita los movimientos especialmente en espacios de trabajo cerrados. Además, cuenta con un compartimento para las baterías que alimentarán los actuadores.

El subconjunto de la espalda está formado por un asiento para el usuario, perfiles que constituyen la estructura de dicho subconjunto y cuenta con regulación entre la altura del asiento y los hombros. En la parte superior, a través de los hombros, se fijan los brazos mecánicos del exoesqueleto. En la parte inferior, se fijan los actuadores que accionan los brazos.

El subconjunto de los brazos está formado por brazo, antebrazo y soporte para el antebrazo, además de la pala que sostendrá la carga.

8.2 Interfaces y limitaciones del exoesqueleto.

Para poder llevar a cabo el diseño del exoesqueleto completo ha sido necesario un trabajo coordinado entre los diferentes grupos de trabajo, pues todos los subconjuntos guardan relación entre sí. Así, por ejemplo, las longitudes y movimientos de los brazos afectan a la estabilidad del conjunto y la resistencia de los elementos de unión de la espalda limita la actuación de los brazos. Además, se producen interfaces entre los diferentes subconjuntos en la etapa de diseño, debiendo adoptar soluciones que satisfagan los requerimientos para ambos. Por ello, ha sido necesario establecer volúmenes de trabajo, disposición de los elementos y recorridos máximos y mínimos. Se han producido las siguientes interfaces entre el subconjunto del brazo y los demás subconjuntos del exoesqueleto:

- Interfaz brazo-espalda: se establece una interfaz de diseño en el hombro, elemento de conexión entre los brazos y la espalda. Para el hombro, ha sido necesario establecer la forma constructiva que permita una articulación del brazo. Se ha tenido en cuenta las dimensiones de los elementos del brazo, las de los actuadores, las medidas de la espalda y la resistencia de los elementos de la unión. Además, la conexión del actuador del brazo a la espalda ha requerido un análisis de las cargas que éste transmite a dichos elementos. Asimismo, la longitud de los brazos guarda relación con la regulación en altura de la espalda, a fin de que haya distancia suficiente para que el usuario recoja una caja desde el suelo. También las medidas de las orejas a las cuales se fija el actuador, para asegurar el suficiente espacio para su colocación.
- Interfaz brazo-base: entre los brazos y la base no se establecen interfaces físicas, pues ambos elementos quedan interconectados siempre a través de la espalda. Sin embargo, se produce una interfaz en lo referente a las dimensiones de ambos subconjunto. En el caso de los brazos, debe satisfacer una longitud mínima que permita al usuario recoger una caja desde el suelo, determinada en cierta medida por las dimensiones de la base.

En el caso de la base, sus dimensiones se ven afectadas por las medidas de los brazos y sus movimientos dado que debe garantizarse la estabilidad del conjunto en las situaciones más desfavorables.

El exoesqueleto debe cumplir ciertos requisitos generales en cuanto a su funcionalidad. Así, se establecen los siguientes:

- La base del exoesqueleto deberá ser la estructura portante del resto de elementos, además de soportar al usuario, transmitiendo las cargas al suelo y dotando de movilidad al usuario.
- La espalda deberá ser regulable, a fin de ajustarse a la medida de diferentes personas.
- Los brazos deberán ser regulables, para poder ajustarse a la medida de distintas personas.

Las limitaciones generales en las dimensiones del exoesqueleto son (véase la figura 5):

Limitaciones de las dimensiones del exoesqueleto⁽¹⁾	
Subconjunto base	
Largo de la base (distancia entre el eje delantero y el eje trasero)	1500 mm
Ancho de la base (distancia entre puntos exteriores del eje delantero)	870 mm
Subconjunto espalda	
Altura asiento-hombros	Regulable entre 450 mm y 650 mm
Distancia entre hombros	Regulable entre 520 mm y 750 mm
Subconjunto brazos	
Longitud brazo y antebrazo en total extensión (distancia entre hombro y punto de fijación de la pala)	Regulable entre 950 mm y 1000 mm

Tabla 1. Limitaciones de las dimensiones generales del exoesqueleto.

⁽¹⁾Las medidas anteriores pueden sufrir ligeras variaciones respecto al diseño final para los subconjuntos de la espalda y la base.

En el siguiente apartado se especifican las limitaciones en las dimensiones del brazo y sus movimientos.

9 Estudio antropométrico y limitaciones del movimiento.

9.1 Introducción.

A continuación, tras especificar los aspectos generales del exoesqueleto y sus diferentes partes, se determinarán las medidas necesarias para los elementos que conforman el brazo del exoesqueleto.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que la máquina a diseñar será usada por una persona. Resulta por ello fundamental un estudio antropométrico donde se definan claramente las dimensiones que deben tener los diferentes elementos, los movimientos y limitaciones que deben imponerse, así como la adecuación del exoesqueleto al cuerpo humano, para garantizar la comodidad en el uso y la seguridad de la persona.

9.2 Medidas antropométricas.

Entre los recursos encontrados, figuran diferentes estudios antropométricos. De todos ellos, el más detallado y el cual se tomará como referencia para las medidas del brazo se especifica a continuación.

9.2.1 Manual de Antropometría Normal Patológica, Pablo Lapunzina & Horacio Aiello, Ed. Masson.

En este libro se establecen las medidas de las diferentes partes del cuerpo humano desde recién nacidos hasta adultos, y por sexos. Debe tenerse en cuenta que en el libro se establecen las medidas hasta los 16 años de edad, la cual se entiende como el final del crecimiento normal en la población en general. Estos datos son recogidos en el libro a partir de diferentes autores. Para los miembros superiores, los brazos, encontramos:

- Longitud total del miembro superior (B+A): “medida entre la prominencia ósea posterolateral del hombro (acromion) hasta la punta del tercer dedo de la mano, con el brazo totalmente extendido y el sujeto en bipedestación”. Esta medida

corresponde a la suma del brazo, el antebrazo y la mano, es decir, la distancia entre el hombro y la punta del tercer dedo para el brazo en total extensión.

- Longitud del brazo (B): “medida entre la prominencia ósea posterolateral del hombro (acromion) y la punta del olécranon, con el antebrazo en flexión a 90° y el sujeto de pie”. Corresponde a la distancia entre el hombro y el codo.
- Longitud del antebrazo (A): “para el antebrazo en un ángulo de flexión de 90°, midiendo entre la porción más prominente del olécranon y la porción distal del radio en su borde lateral”. Corresponde a la distancia entre el codo y la muñeca.
- Longitud total de la mano (M): “medida desde el pliegue palmar distal hasta la punta del tercer dedo o dedo medio, en extensión completa”. Corresponde a la longitud de la mano, desde la muñeca hasta la punta del tercer dedo, con la mano en total extensión.

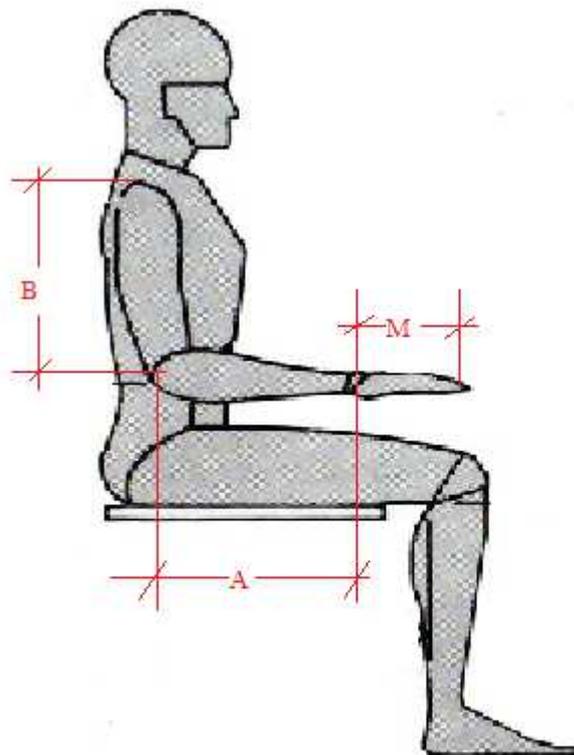


Figura 7. Esquema de las medidas antropométricas.

Longitud total del miembro superior (hombres y mujeres) [cm] <i>Adaptada de Martín y Saller (1962).</i>						
A+B						
Edad	-2σ		Media	$+2\sigma$		
16 años	60		70	79		
Longitud del brazo [cm] <i>Adaptada de Malina (1973) EEUU.</i>						
B						
Edad	Mujeres			Hombres		
16 años	P5	P50	P95	P5	P50	P95
	27,8	30,3	33,5	29,4	32,8	36,0
Longitud del antebrazo [cm] <i>Adaptada de Roche y Malina (1983) EEUU.</i>						
A						
Edad	Mujeres			Hombres		
16 años	P5	P50	P95	P5	P50	P95
	20,7	23,2	25,7	22,6	25,4	28,0
Longitud total de la mano (hombres y mujeres) [cm] <i>Adaptada de Feingold y Bossert (1974) EEUU.</i>						
M						
Edad	P3		P50	P97		
16 años	16,5		18,8	21,2		

Tabla 2. Medidas antropométricas para los brazos (Fuente: Manual de Antropometría Normal y Patológica, Pablo Lapunzina & Horacio Aiello, Ed. Masson)

En la tabla se expresan las variaciones a través de percentiles o de la desviación estándar tanto para hombres como para mujeres.

9.3 Valores para el cálculo y diseño.

En el apartado anterior se muestran las medidas antropométricas y su variabilidad de hombres a mujeres. De cara al diseño resulta necesario establecer los valores adecuados. Dada la diferencia de las dimensiones entre hombres y mujeres, podría considerarse como extremos del intervalo de medidas para el diseño el percentil 5 de las mujeres como valor mínimo y el percentil 95 de los hombres como valor máximo. Así, la mayor parte de la población quedaría cubierta dentro del rango. No obstante, estas medidas están limitadas también por aspectos constructivos. Así, en el caso del brazo, no se tomará como medida mínima el percentil 5 de las mujeres, sino 30 cm, por condiciones de instalación del actuador. Además, para el caso del antebrazo, se establece la medida máxima en 25 cm en lugar del percentil 95 de los hombres. Debe entenderse que la longitud real del antebrazo mecánico es mucho mayor que la del antebrazo del usuario, ya que se requiere mayor longitud por condiciones de recogida de la carga, con lo que es suficiente fijar esa distancia en 25 cm.

Nótese que los valores de los percentiles P95 para el brazo y P5 para el antebrazo se han redondeado a números enteros.

Medidas antropométricas de diseño			
		Dimensión mínima (cm)	Dimensión máxima (cm)
Longitud	hombro-codo (brazo), B	30	35
Longitud	codo-muñeca (antebrazo), A	20	25

Tabla 3. Medidas finales de diseño obtenidas a partir del estudio antropométrico.

Entendiendo que la mayor parte de los usuarios están representados en el conjunto de valores especificado, se dimensionarán las diferentes partes del brazo mecánico de manera que sus longitudes puedan regularse entre estos valores y adecuarse a la medida del usuario.

9.4 Limitaciones al movimiento.

De cara al diseño, es necesario establecer ciertas restricciones a los movimientos del brazo mecánico por cuestiones de seguridad y comodidad del usuario. Otras restricciones, sin embargo, vienen impuestas por condiciones del cálculo. Entiéndase que tanto las medidas adoptadas como los alcances y giros límite de los movimientos están relacionados entre sí, y además se limitan a la elección de los actuadores. Por ello, se especifican a continuación las limitaciones al movimiento.

- Ángulo máximo del brazo bajo la horizontal: ángulo máximo que puede girar el brazo por debajo de la horizontal, respecto al hombro. Su valor está condicionado al espacio necesario para la colocación del actuador.
- Ángulo máximo del brazo sobre la horizontal: ángulo máximo que puede girar el brazo por encima de la horizontal, con respecto al hombro. Su valor está condicionado a la fuerza máxima que debe desarrollar el actuador que acciona el brazo completo.
- Ángulo mínimo entre brazo y antebrazo: menor ángulo que pueden formar entre sí los ejes axiales del brazo y el antebrazo, con respecto al codo. Su valor está condicionado a la extensión completa del brazo humano.
- Ángulo máximo entre brazo y antebrazo: mayor ángulo que pueden formar entre sí los ejes axiales del brazo y el antebrazo, con respecto al codo. Su valor está condicionado, a la contracción máxima admisible del antebrazo por cuestiones de seguridad para el usuario.
- Ángulo máximo entre el eje axial del antebrazo y la horizontal: independientemente del ángulo que forme el brazo con la horizontal, el eje del antebrazo no podrá sobrepasar en ningún caso la vertical como medida límite, es decir, los 90° para evitar que la carga caiga sobre el operario. Su valor está condicionado por cuestiones de seguridad para el usuario.
- Ángulo máximo de apertura de los brazos: ángulo que forma el eje longitudinal del brazo con el plano de la espalda, medido en el plano horizontal. Su valor se limita por cuestiones de utilización, para facilitar la recogida de la carga, y por estabilidad del conjunto.
- Ángulo máximo de cierre de los brazos: ángulo que forma el eje longitudinal del brazo con el plano de la espalda, medido en el plano horizontal. Su valor se limita por cuestiones de cálculo de los hombros y las articulaciones de fijación del actuador a la espalda.

Limitaciones al movimiento			
	Brazo	Antebrazo	Conjunto del brazo.
Ángulo máximo del brazo bajo la horizontal	-60°		
Ángulo máximo del brazo sobre la horizontal	40°		
Ángulo mínimo entre brazo y antebrazo		0°	
Ángulo máximo entre brazo y antebrazo		90°	
Ángulo máximo entre el eje axial del antebrazo y la horizontal		90°	
Ángulo máximo de apertura de los brazos			20°
Ángulo máximo de cierre de los brazos			10°

Tabla 4. Limitaciones al movimiento del brazo.

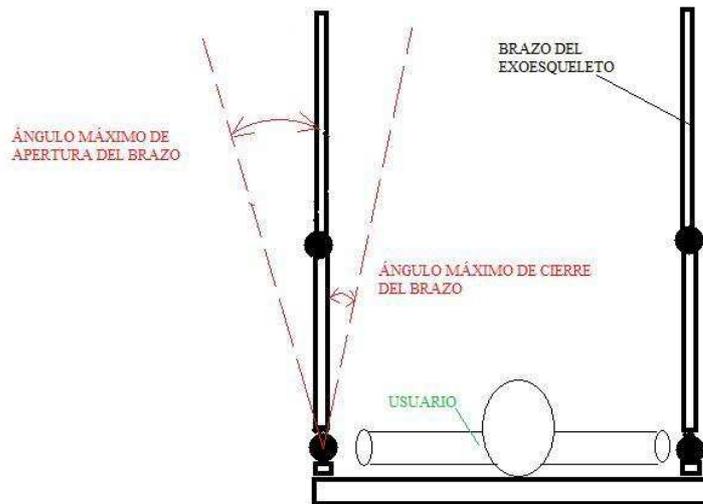


Figura 8. Esquema de los ángulos de apertura y cierre de los brazos desde una vista superior del conjunto.

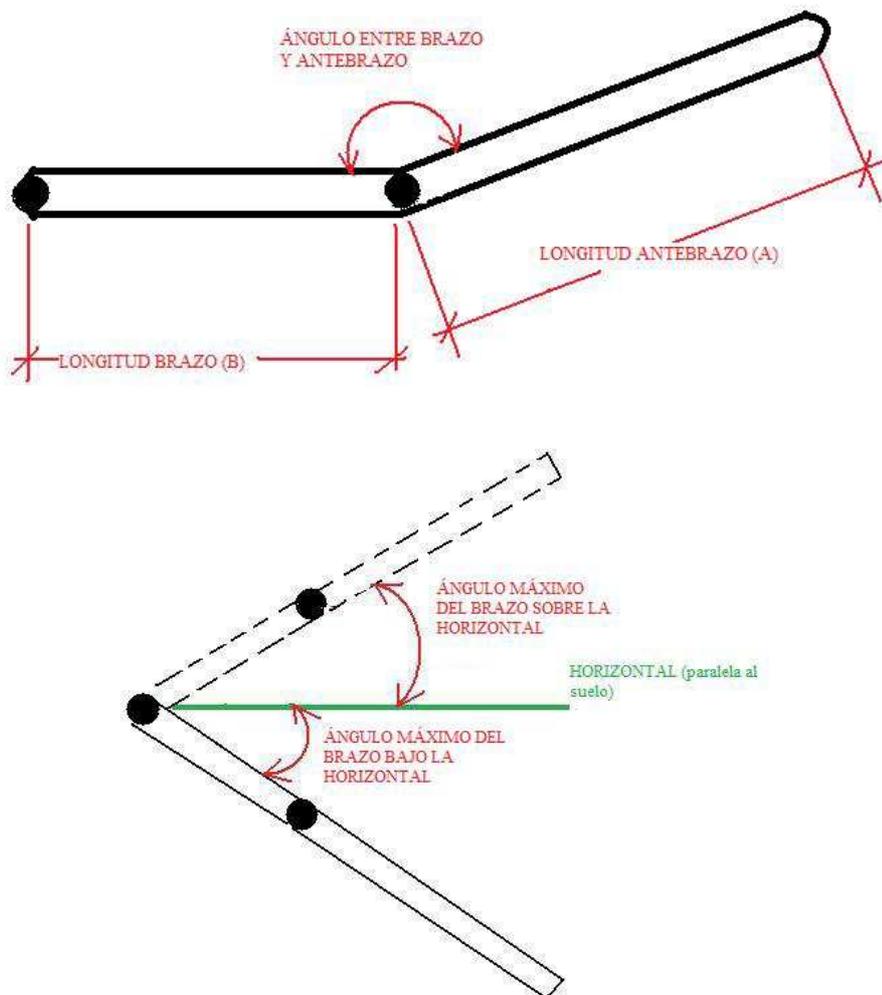


Figura 9. Esquema de los ángulos de actuación del brazo.

10 Análisis de soluciones

En este apartado se indican las diferentes alternativas estudiadas y se justifica la solución final adoptada.

Durante el desarrollo del proyecto se han formulado diferentes ideas para cumplir con los requerimientos del mismo, analizando en detalle cada opción y teniendo en cuenta sus aspectos positivos y negativos. Debido a ello, se ha seguido un proceso de retroalimentación y mejora, con diferentes diseños y modificaciones respecto a la idea original.

Inicialmente, se planteó estudiar dos alternativas al diseño, una fabricación íntegra en metal de los diferentes elementos, y una fabricación con materiales compuestos. Estas alternativas se detallan a continuación.

10.1 Modelo con tubos en fibra de carbono y rótulas de acero.

En una de las primeras ideas de cómo debía ser el brazo, se dio forma en acero a las rótulas para después unirlos mediante dos tubos de fibra de carbono comerciales. Este diseño tenía a su favor la ligereza del brazo, pero la principal desventaja radicaba en transmitir correctamente los esfuerzos entre los tubos y las rótulas. No obstante, esto puede llevarse a cabo encamisando los tubos de fibra mediante cilindros metálicos. Por otro lado, si bien pueden emplearse tubos de carbono comerciales, las rótulas tal y como están planteadas requerirían un proceso de mecanizado o una fabricación por fundición. Este modelo tiene mayor complejidad de fabricación y un costo más elevado del que se seleccionó definitivamente.



Figura 10. Modelo inicial de fibra de carbono con rótulas metálicas

10.2 Modelo integro en fibra de carbono

Otro de los modelos planteados durante la fase de diseño fue un modelo íntegramente de fibra de carbono. En este modelo, tanto las rótulas como los tubos son exclusivamente de fibra de carbono. Al igual que el modelo con tubos de carbono y rótulas de acero, este modelo tiene como punto fuerte su ligereza y resistencia, y además no presenta grandes dificultades en las uniones para la transmisión de esfuerzos. No obstante, para fabricar este modelo es necesario un molde con la matriz del mismo sobre el que se depositan las capas de fibra y resina, o bien realizar un molde en el que se dispongan todas las capas de fibra y luego se aplique vacío de modo que la resina se infiltre entre las capas de fibra de carbono. Una vez fabricada la forma principal del perfil, se requeriría, mediante otro proceso, añadir las orejas para los actuadores. Finalmente, la unión de las rótulas se llevaría a cabo a través de algún pegamento.

Finalmente, se descartó la elección de este modelo debido a su mayor complejidad de fabricación.



Figura 11. Modelo integro en fibra de carbono.

10.3 Modelo metálico con rótulas macizas.

Este modelo resulta muy similar a la solución final adoptada. En él, se realizaron las rótulas como un único sólido, tanto para el brazo como el antebrazo, y se planteó una unión de soldadura a tubos comerciales de diferentes diámetros y espesores. El modelo no presentaba ningún problema de unión ni de transmisión de cargas.

Además, este sistema presentaba facilidades a la hora de regular las extensiones de los elementos, ya que se podía disponer un sistema auxiliar de soporte para el antebrazo y, para el brazo se podía llevar a cabo la regulación mediante un pasador o tornillo.

A pesar de todo, este modelo también se descartó debido al coste de fabricación de las rótulas y el desperdicio de material que supone, dado el proceso de mecanizado necesario.

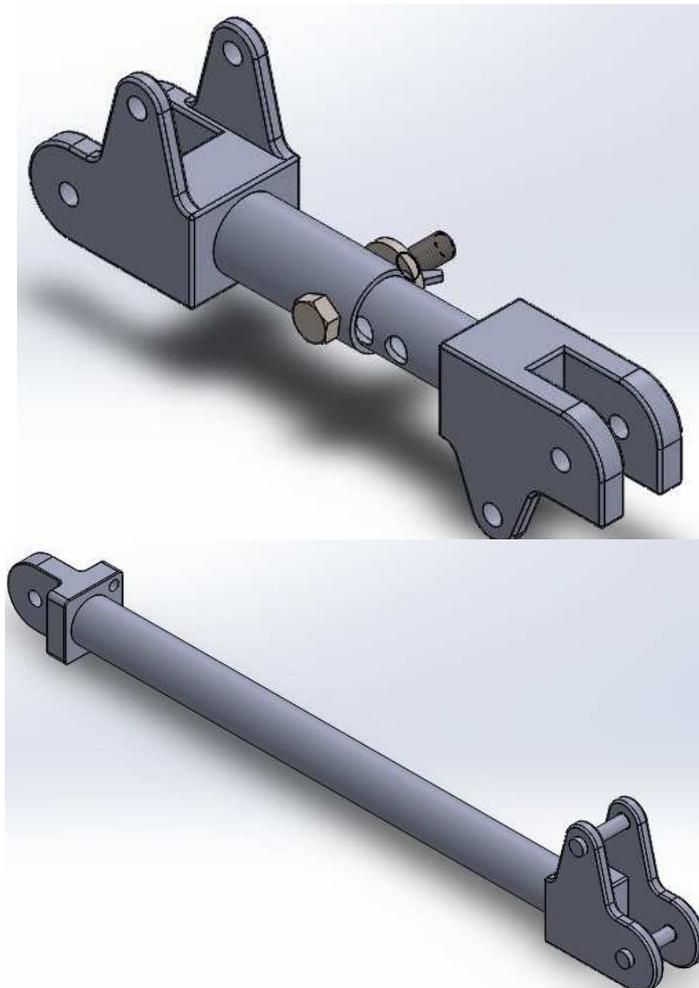


Figura 12. Modelo metálico con rótulas macizas, brazo y antebrazo.

10.4 Modelo metálico con rótulas aligeradas.

La solución final adoptada es una variación de la anterior, pero que reduce considerablemente los costes y facilita su fabricación.

Los tubos utilizados y la forma de regular el brazo ha sido la misma que en el brazo con las rótulas macizas. Para la reducción de costes en la fabricación se han modificado las rótulas que, en lugar de macizas, se han diseñado en tres piezas fácilmente soldables entre sí, siguiendo una estructura similar todas ellas. En el frontal de cada rótula, se ha dispuesto una chapa rectangular de entre 10 y 12 mm de espesor a la cual se sueldan perpendicularmente sendas chapas de 10 mm de espesor que cuentan con la forma adecuada y los taladros necesarios para conectar los actuadores y articular los diferentes elementos. La forma que adoptan estas piezas permite una fácil mecanización.

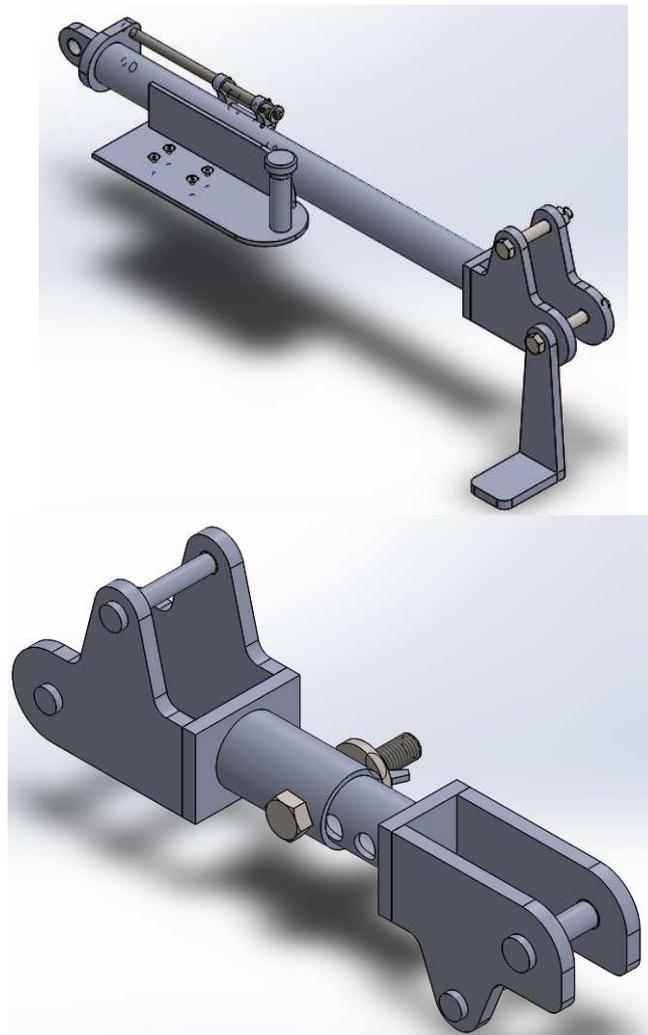


Figura 13. Modelo metálico optimizado, con rótulas aligeradas. Antebrazo (con soporte para el antebrazo) y brazo.

11 Actuadores.

En cuanto a los actuadores que pueden emplearse para accionar los elementos del brazo, existen tres tipos fundamentales a tener en cuenta: actuadores de accionamiento neumático, actuadores de accionamiento hidráulico y actuadores eléctricos.

Estos actuadores serán fundamentalmente lineales en el caso de los neumáticos e hidráulicos y si bien para los eléctricos pudieran ser también rotativos, se considerarán también actuadores lineales por cuestiones constructivas y de cálculo, pues un actuador eléctrico rotativo colocado en las diferentes rótulas requeriría un par considerable para garantizar el movimiento de los elementos. Para los diferentes fabricantes consultados no se han encontrado actuadores de este tipo con suficientes garantías de uso, y de haberlos, resultarían demasiado voluptuosos para su colocación en las rótulas. Cabe destacar que, en principio, se seleccionarán actuadores ya existentes si estos son válidos para las condiciones de operación del brazo, por aspectos económicos.

En primer lugar, es necesario llevar a cabo algún tipo de discriminación entre los tres tipos de actuadores mencionados (neumáticos, hidráulicos y eléctricos) que permita establecer cuál de ellos es óptimo para el accionamiento del brazo.

- Actuadores neumáticos: si bien esta parece ser la mejor opción a primera vista, pues los actuadores neumáticos empujan cargas ciertamente considerables, son limpios, y se consiguen con ellos velocidades bastante altas, los cálculos imposibilitan el uso de estos actuadores. Hay que tener en cuenta que en neumática las presiones de trabajo máximas están alrededor de los 10 bar, algo más podría conseguirse pero no es lo habitual. Para estas presiones, y con las cargas que ha de soportar el actuador, podemos determinar el diámetro del émbolo del mismo. Para el caso del actuador del antebrazo, por ejemplo, la carga máxima que debe ejercer el actuador se da para el brazo y antebrazo totalmente extendidos en línea con la horizontal. Así pues, teniendo en cuenta las dimensiones del brazo y sus partes y la carga a elevar, se establece una fuerza a soportar por el actuador de 4000 N, aproximadamente. Pues bien, para esos 4000 N y con una presión de 10 bar (1 MPa), se establece un diámetro del émbolo del pistón:

$$1 \frac{N}{mm^2} = \frac{4000 N}{\frac{\pi}{4} D^2}; D = 71,36 mm$$

Se necesitaría un émbolo de más de 7 cm de diámetro para llevar a cabo esa fuerza, a lo que habría que sumar el espesor de las paredes del cilindro. Esta solución, por tanto, parece poco recomendable, pues los actuadores necesarios son demasiado voluminosos. También es cierto que existen cilindros tándem que consiguen con menores diámetros mayores fuerzas de actuación, pero sus diseños están aplicados a usos de nivel industrial, siendo difícil su adaptación al prototipo del brazo. Por otra parte, si bien los cálculos muestran la imposibilidad de emplear actuadores neumáticos, también hay que resaltar que, dada la compresibilidad del aire, el control de la velocidad de estos actuadores es también más complicado que en otro tipo de actuadores. Además, se requiere un equipo de preparación del aire que cuente con secador, pues el vapor de agua existente puede dar lugar a corrosiones en el sistema.

- Actuadores hidráulicos: tras descartar el uso de actuadores neumáticos, la solución inmediata siguiente son los de tipo hidráulico, cuyo funcionamiento es exactamente el mismo pero con mayores presiones de trabajo, lo cual soluciona el inconveniente de obtener diámetros de cilindro elevados. No obstante, si bien parece una buena solución, y tiene sus ventajas, como principales inconvenientes destacan: requieren una instalación más costosa y compleja que otro tipo de actuadores como los actuadores eléctricos, requiriendo un circuito cerrado de aceite para su funcionamiento con un cárter, lo cual no es lo más recomendable para una máquina a la que se quiere dotar de autonomía de movimiento. Además, en este tipo de circuitos las fugas de aceite son comunes, y las velocidades que se alcanzan no son tan altas como en los neumáticos debido a la viscosidad del fluido de trabajo, siendo estas velocidades similares a las de los actuadores eléctricos.
- Actuadores eléctricos: este tipo de actuadores, si bien tienen una eficiencia limitada por el sistema que se emplea para transformar el movimiento del motor eléctrico en un movimiento lineal, tienen ciertas ventajas. Pueden emplearse tanto con corriente alterna como continua, de manera que pueden equiparse en una máquina alimentada por baterías, y de requerirse actuadores de alterna para una mayor potencia basta con colocar un transformador. Además, su uso es totalmente limpio, pues no hay fluido de trabajo en este caso. Para el uso que se le daría, soporta las cargas que ha de empujar con velocidades similares a las de los actuadores hidráulicos y su mantenimiento y montaje resultan mucho más simples que en los casos anteriores. Finalmente, el control de su movimiento puede programarse mediante PLC directamente, sin

necesidad de un circuito de válvulas como ocurría con los neumáticos y los hidráulicos. Asimismo, si bien el coste de estos actuadores puede llegar a ser elevado, no requiere una instalación más allá del propio actuador. La gran limitación de este tipo de actuador es el espacio que ocupan, pues si bien los diámetros están en valores razonables y comparables al otro tipo de actuadores, aquí las longitudes son un aspecto fundamental en la selección de los mismos. Esta longitud determinará, en cierta medida, la posición en la que se colocan las “orejas” para su enganche a los brazos.

Se han encontrado diferentes actuadores eléctricos lineales en el mercado, de los que el más adecuado al diseño es un modelo de la marca MECVEL, por las razones que se exponen a continuación:

1. Para las cargas que debe ejercer el actuador es válido tanto para el antebrazo como para el brazo.
2. Las velocidades del actuador, para el rango de cargas en el que actúa, son aceptables en comparación con otros fabricantes, e incluso mejores en ciertos casos.
3. Son los actuadores más compactos encontrados hasta el momento que satisfagan las condiciones de carga y velocidad requeridas. Este aspecto es uno de los más influyentes en la elección de este actuador pues, si bien se encuentran en el mercado otros actuadores y todos ellos válidos en cuanto a carga y velocidad, la longitud del actuador resulta fundamental a la hora de establecer la posición de los enganches sobre el brazo. Hay que tener en cuenta que la longitud retraída del actuador depende directamente de la carrera, para asegurar una camisa sobre la que sobresale el vástago del mismo. Así pues, existe una longitud mínima para cada tipo de actuador que se suma a la carrera necesaria para dar la longitud total del actuador retraído y, en ese aspecto, el actuador de la marca MECVEL supone el más compacto. Este aspecto es especialmente importante en el antebrazo, donde la limitación para la colocación de los enganches es la propia longitud de los elementos. Este aspecto, al influir en la colocación de los enganches lo hace también en el cálculo y en los resultados obtenidos.

Características principales de los tipos de actuadores		
	Principales ventajas	Principales desventajas
Neumáticos	Grandes velocidades. Fluido de trabajo limpio.	Fuerzas de trabajo limitadas a presiones de 10 bar. Requiere una instalación costosa. Requiere el uso de un compresor de aire (baja eficiencia de estos equipos).
Hidráulicos	Grandes fuerzas, dadas las altas presiones de trabajo. Fácil control de la fuerza y de la velocidad mediante válvulas.	Se trabaja con un fluido no limpio, como en el caso del aire. Requiere una instalación costosa, y el uso de una bomba hidráulica.
Eléctricos.	No requieren fluido de trabajo, y no se requieren instalaciones complejas más allá del cableado necesario. Fácil control del movimiento mediante programación a través de un PLC.	Pueden tener eficiencias reducidas dependiendo del sistema mecánico que incorporen.

Tabla 5. Comparación entre los diferentes tipos de actuadores.

12 Resultados finales.

El diseño final del brazo mecánico se muestra a continuación.

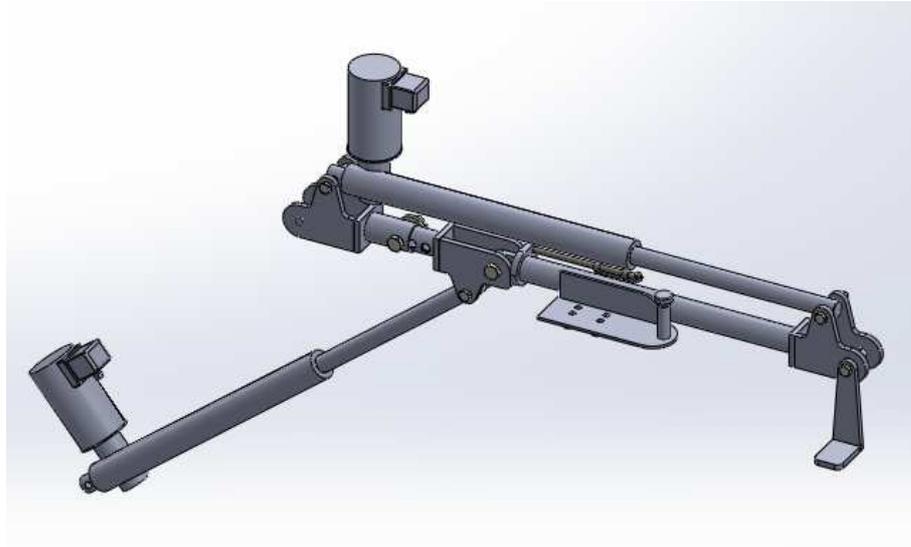


Figura 14. Modelo final del brazo con sus correspondientes actuadores para brazo y antebrazo.

En la figura anterior se muestra el modelo final del brazo mecánico. Figuran tanto el brazo, el antebrazo como el soporte del antebrazo y la pala para recoger la carga. También se muestran los actuadores que accionan el brazo y el antebrazo. A continuación, en los siguientes apartados, se detallan cada una de las partes que conforman el brazo.

12.1 Antebrazo.

El antebrazo estará formado por 3 piezas distintas unidas rígidamente a través de soldadura, dos rótulas y un perfil circular. Las rótulas estarán compuestas a su vez por tres elementos de chapa. El antebrazo estará libre en uno de sus extremos y unido al brazo por la rótula del codo. Además, unido a él se dispondrá un sistema auxiliar sobre el que apoyará el antebrazo de la persona que lo maneje. La longitud del antebrazo entre extremos útiles (codo-pala) será de 650 mm.

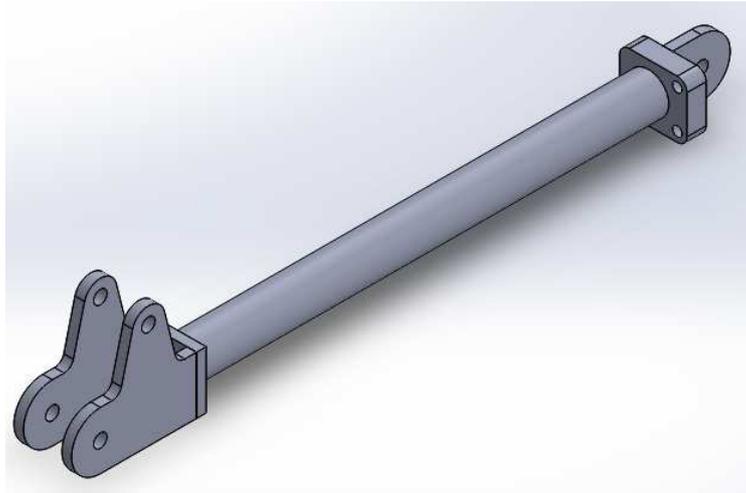


Figura 15. Modelo final metálico, antebrazo.

12.1.1 Rótula del extremo libre del antebrazo.

Será la encargada de recibir soportar la pala que recoge la carga. Mediante soldadura se une al tubo del antebrazo. La pieza consta de tres placas con un espesor de 10 mm. Dos de ellas dispondrán de taladros de 14 mm de diámetro dónde apoyarán bujes de bronce de aluminio que facilitarán el movimiento relativo del bulón que permite fijar el actuador que acciona el antebrazo. Mediante los otros taladros se fijará la pala que soporta la carga, también a través de un bulón. Las distancias entre agujeros quedan determinadas por criterios de cálculo. Las tres placas que conforman la pieza se unirán mediante soldadura.

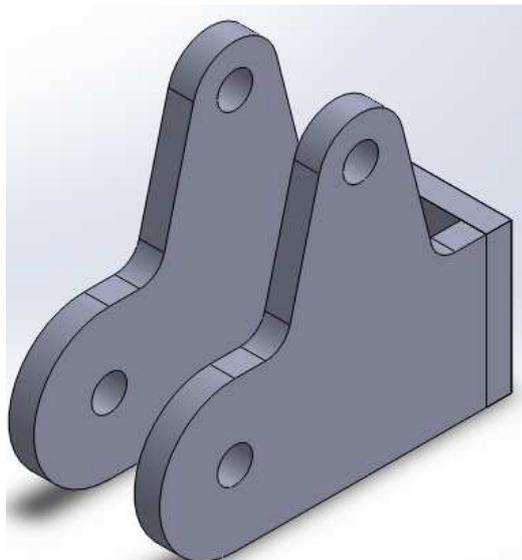


Figura 16. Modelo final metálico, rótula del extremo libre del antebrazo.

12.1.2 Rótula del codo.

Estará formada por dos placas, una de 12 mm de espesor y que contendrá un taladro de 16 mm de diámetro que servirá para como rótula del codo mediante un buje y un bulón. Ambas piezas se sueldan a tope. Sobre la placa frontal se mecanizan dos taladros roscados para las guías del soporte para el antebrazo.

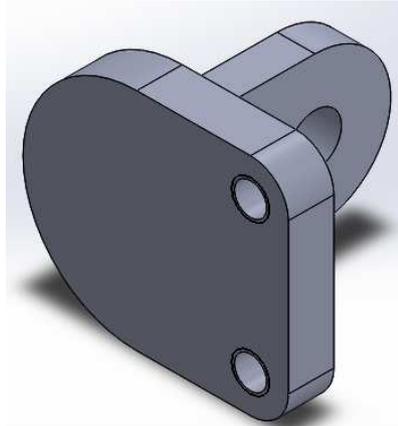


Figura 17. Modelo final metálico, rótula del codo para el antebrazo.

12.1.3 Perfil del antebrazo.

Este tubo será un perfil circular comercial cuya longitud es de 490 mm, eligiéndose un diámetro externo de 42,4 mm y un espesor de pared de 3,2 mm. El tubo irá soldado por uno de sus extremos a la rótula del codo y en el otro extremo a la rótula del extremo libre del antebrazo.

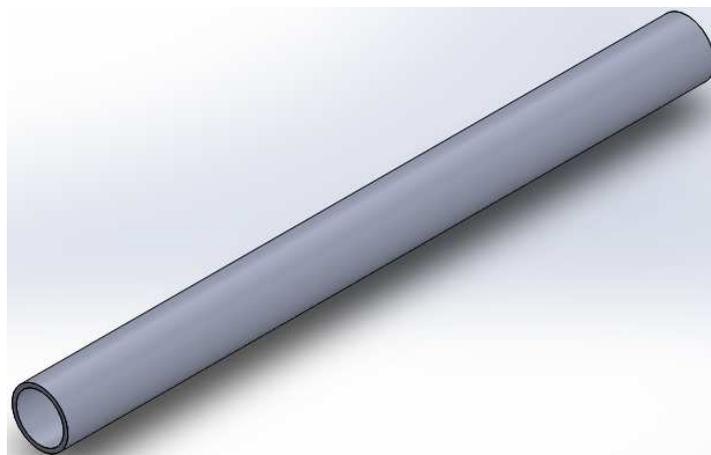


Figura 18. Modelo final metálico, perfil circular del antebrazo.

12.2 El soporte del antebrazo.

A continuación, se describen los elementos que conforman el soporte del antebrazo, en el cual el usuario puede apoyar el mismo, y que se fijará a la rótula del codo.

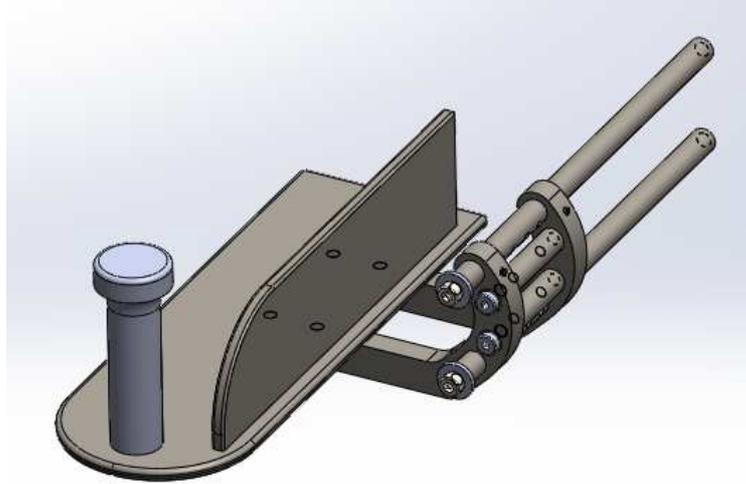


Figura 19. Modelo final metálico, soporte del antebrazo.

El reposabrazos deslizará sobre unas guías roscadas y montadas sobre la rótula del codo del antebrazo. La posición del mismo se fija mediante tornillo prisionero. La unión entre las diferentes partes se lleva a cabo a través de uniones desmontables mediante tornillos, salvo para el reposabrazos, compuesto de dos placas metálicas y un elemento auxiliar para el agarre que han de soldarse.

12.2.1 Guía.



Figura 20. Modelo final metálico, guía para el soporte del antebrazo.

Las guías sobre las que desliza el reposabrazos serán dos varillas metálicas de 10 mm de diámetro. Contarán con un roscado exterior en uno de sus extremos, para su unión a la rótula del codo. En el otro extremo se dispondrá un taladro para fijar, mediante tornillo, una arandela que sirva de tope de seguridad que evite la salida del reposabrazos en caso de fallo del prisionero. En la parte lateral de la guía se mecanizarán unos taladros de poca profundidad en los que se alojará la cabeza del tornillo prisionero y que permitirán regular la posición del reposabrazos sobre la guía, a saltos de 10 mm, para adecuarla a la comodidad del usuario.

12.2.2 Enganche de la guía.

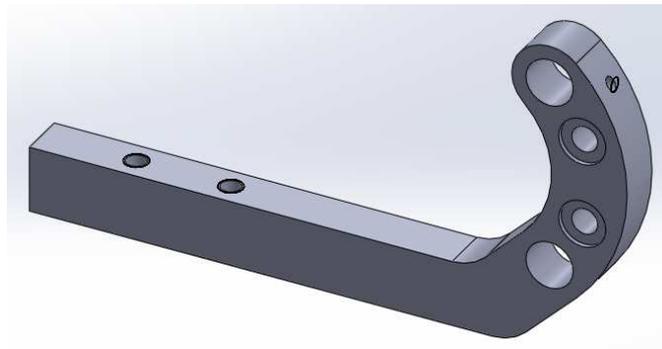


Figura 21. Modelo final metálico, enganche que desliza sobre las guías y sujeta el reposabrazos.

El enganche es la pieza que deslizará sobre las dos guías de las que dispone el soporte del antebrazo. Soportará el reposabrazos, el cual se fija por medio de tornillos a los taladros roscados dispuestos en el saliente del enganche. La parte curva de la pieza permite su disposición junto al perfil circular del antebrazo. En la parte superior, entre la cara exterior de la pieza y el orificio en el cual encajaría la guía, se dispondrá un taladro roscado para el tornillo prisionero. Además, dos taladros permitirán unir ambas guías a través de vástagos auxiliares.

12.2.3 Vástago auxiliar.



Figura 22. Modelo final metálico, vástago auxiliar que une los dos enganches que soportan el reposabrazos.

El vástago auxiliar será una varilla de 10 mm de diámetro, y con la longitud adecuada. Tendrá dos taladros roscados, uno a cada extremo, en sus caras planas que permitan fijar los enganches que deslizan sobre las guías por medio de tornillos. De esta manera, los dos enganches se conformarán como un conjunto rígido que se mueve de manera solidaria sobre las guías.

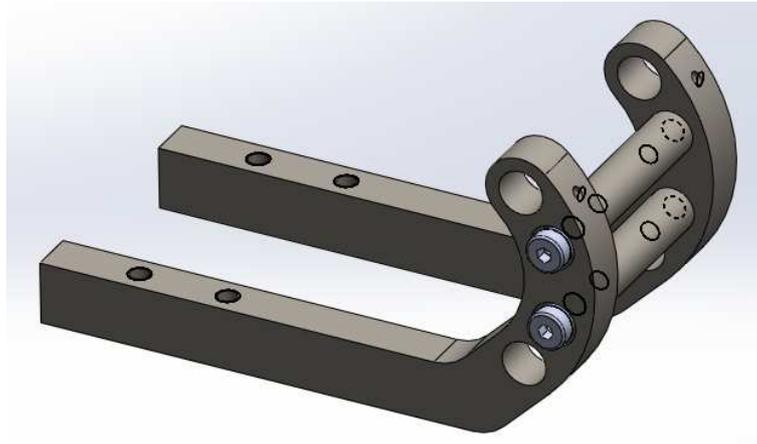


Figura 23. Modelo final metálico, vista de los enganches sobre los que se dispone el reposabrazos.

En el montaje que se muestra en la figura 23 se colocarán arandelas Grover de seguridad para la unión atornillada con el fin de evitar que los tornillos pierdan apriete y se cause el desarme de las distintas piezas.

12.2.4 Reposabrazos.

Para que el usuario descansa el brazo durante el manejo de la máquina se dispondrá un reposabrazos.

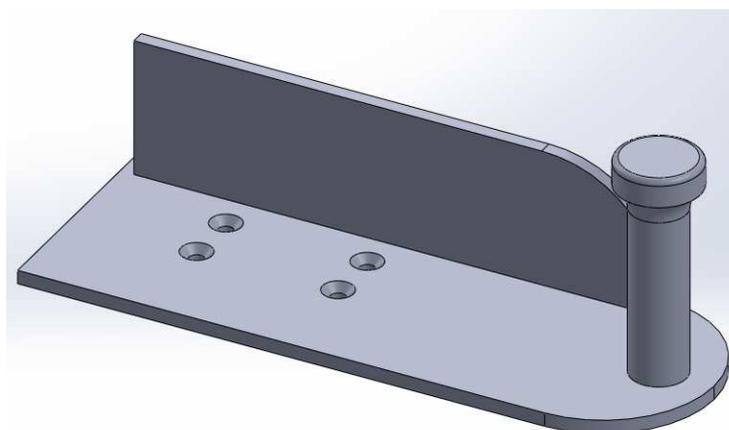


Figura 24. Modelo final metálico, reposabrazos.

El reposabrazos estará formado por dos placas metálicas soldadas. La placa lateral evitará atrapamientos del antebrazo de la persona entre el tubo y los elementos móviles del soporte del antebrazo. La placa inferior contará con taladros avellanados en su cara superior, con el fin de ocultar la cabeza de los tornillos por los cuales se fija. Además, se dispondrá un elemento auxiliar para el agarre por parte del usuario, soldado a la placa inferior del reposabrazos.

12.3 Pala para el enganche de la carga.

Con el objetivo de sujetar la carga, se dispondrá una pala metálica que se unirá mediante un perno al extremo libre del antebrazo.



Figura 25. A la izquierda, modelo final metálico de la pala para el enganche de la carga; a la derecha, modelo de caja a levantar mediante el brazo.

La pala tiene la longitud suficiente para asegurar que la caja no contacta con el antebrazo, y cuenta con un saliente en el extremo para asegurar la carga. En la figura 25 se muestra una caja tipo con sus aberturas laterales a través de las cuales se fijaría la caja mediante la pala.

12.4 Brazo.

Estará formado por la rótula del hombro, la rótula del codo, tubo interior y tubo exterior, además de los diferentes materiales de tornillería. Dada su regulación, la longitud variará entre los 300 mm y los 350 mm (entendiendo por ésta la distancia entre la rótula del hombro y la rótula del codo) con dos saltos de 25 mm cada uno, habiendo tres posiciones: a los 300 mm, a los 325 mm y a los 350 mm.

El brazo estará dividido en dos mitades, una parte compuesta por la rótula del hombro, formada a su vez por diferentes piezas y unida mediante soldadura al tubo externo del brazo, y la rótula del codo, también formada por diferentes piezas que se soldarán al tubo interno del brazo. Ambas mitades quedarán fijadas mediante un tornillo y una tuerca de mariposa, de manera que uno de los tubos encaja y desliza dentro del otro.

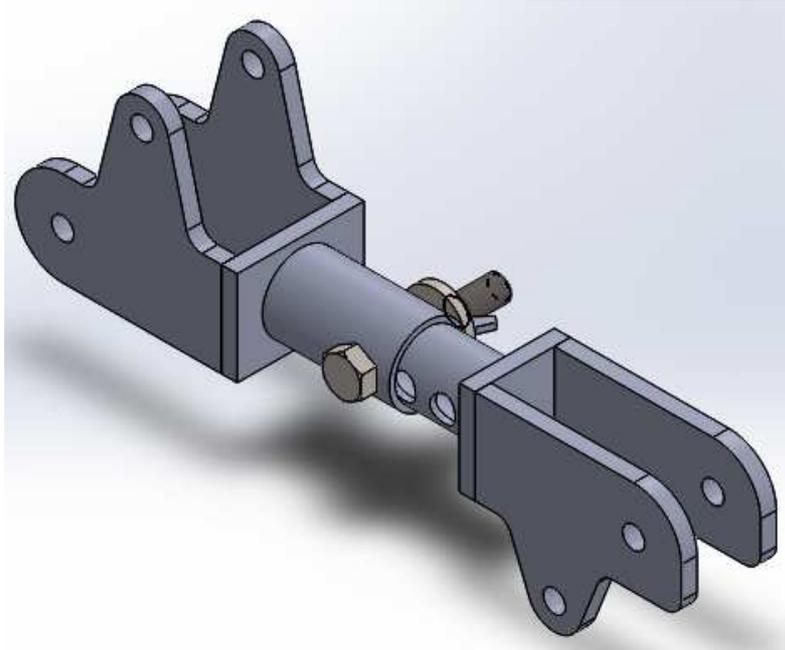


Figura 26. Modelo final metálico, brazo.

12.4.1 Rótula del hombro.

Será la encargada de unir el brazo a la estructura del hombro, y estará unida mediante soldadura al tubo externo del brazo. La pieza constará de dos placas con un espesor de 10 mm y en la que se practicarán diversos taladros para la conexión con el actuador y el hombro mediante bulones. Estas dos placas, a su vez, se soldarán a tope a una tercera placa de acero rectangular de 10 mm de espesor.

Será esta placa rectangular a la que vaya finalmente soldado el tubo para formar una de las mitades del brazo.

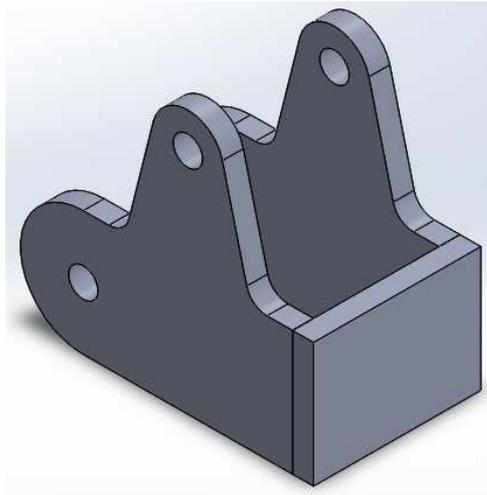


Figura 27. Modelo final metálico, rótula del hombro para el brazo.

12.4.2 Rótula del codo.

Esta rótula, al igual que la del hombro, constará de dos placas iguales con un espesor de 10 mm, y diversos taladros que permitan la conexión con el actuador que acciona el brazo y la formación de la rótula del codo, mediante un bulón.

Al igual que en la rótula del hombro estas dos placas se han unido a una tercera placa de acero rectangular con un espesor de 10 mm a través de soldadura a tope.

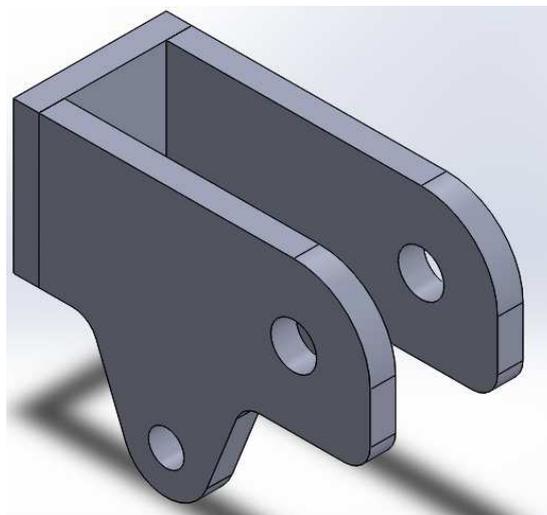


Figura 28. Modelo final metálico, rótula del codo para el brazo.

12.4.3 Tubo exterior del brazo.

Este perfil del brazo será un tubo comercial y tendrá una longitud de 80 mm, eligiéndose un diámetro externo de 48,3 mm y un espesor de 3,6 mm. Además se le practicará un taladro de 16 mm de diámetro que permitirá la unión de ambas partes del brazo mediante un tornillo y

una tuerca de mariposa. El tubo se soldará a la rótula del hombro por el extremo más alejado del taladro.

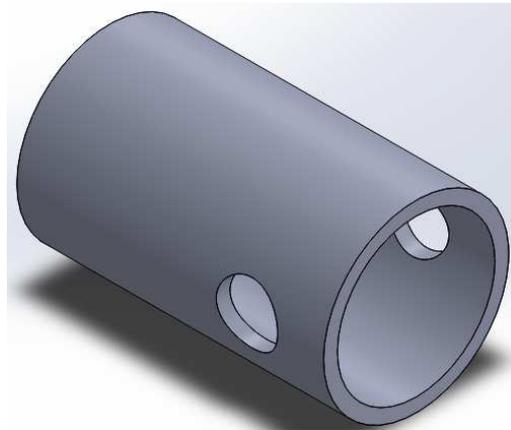


Figura 29. Modelo final metálico, tubo exterior para el perfil del brazo.

12.4.4 Tubo interior del brazo.

También para este perfil se ha optado por un tubo comercial, pero en este caso será necesario tornearlo exteriormente para darle la medida necesaria de diámetro externo. El tubo seleccionado del catálogo tiene un diámetro externo de 42,4 mm y un espesor de 4,5 mm, pero una vez se haya mecanizado tendrá un diámetro externo de 41,1 mm y un espesor de 3,85 mm. La longitud del tubo será de 85 mm. Para que el brazo sea ajustable se realizarán tres taladros pasantes de igual diámetro, 16 mm, con una distancia entre centros de 25 mm. Desplazando este tubo longitudinalmente dentro del tubo externo se obtendrán 3 posiciones diferentes de uso. El tubo se unirá mediante soldadura a la rótula del codo.

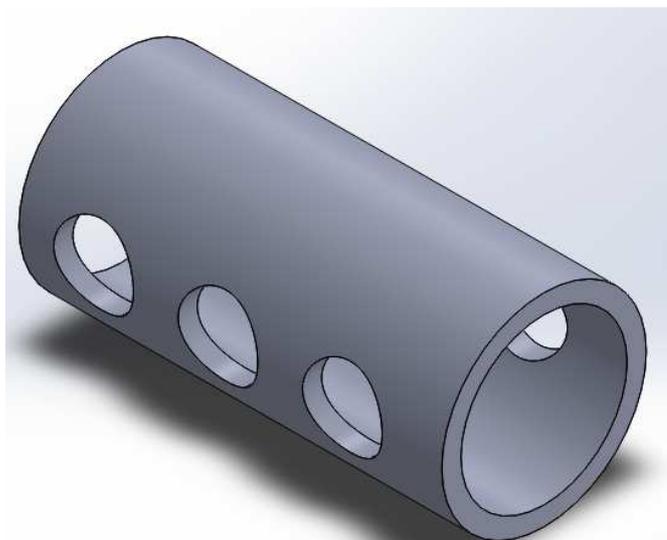


Figura 30. Modelo final metálico, tubo interior para el perfil del brazo.

12.5 El actuador.

Finalmente el actuador elegido será el modelo ALI 4-/M23/24DC de la marca MECVEL. Se emplearán dos actuadores por brazo, uno para el accionamiento del brazo y otro para el accionamiento del antebrazo.

Características del actuador	
Modelo	ALI 4-/M23/24DC
Fuerza máxima (N)	4100
Velocidad (mm/s)	13
Tamaño motor	D85
Velocidad de giro del motor (rpm)	3000
Ratio de reducción	1:16
Diámetro de rosca (mm)	18
Paso (mm)	4
Eficiencia	0,26
Carrera necesaria (mm)	370 (para el antebrazo), 417 (para el brazo)

Tabla 6. Características mecánicas del actuador.



Figura 31. Imagen del actuador seleccionado, las medidas reales pueden diferir.

13 Conclusiones.

Una vez determinado el modelo final para el brazo, podemos establecer ciertas conclusiones respecto al diseño del mismo. De entre los modelos estudiados, el modelo en metal aligerado resulta el de mayor viabilidad constructiva atendiendo a parámetros económicos y de cálculo. A continuación se establece una tabla de requerimientos con el fin de justificar la adecuación y el cumplimiento por parte del modelo final de los requisitos impuestos en el apartado 6 de esta memoria.

Tabla de requerimientos.	
Requisito	Cumplido
El brazo debe ser ajustable al usuario	SI
El brazo debe ser lo más ligero posible	SI
Los elementos trabajarán con coeficientes de seguridad altos y sin alcanzar el régimen plástico para los materiales	SI

Tabla 7. Tabla de requerimientos para el modelo final del brazo.

Los requisitos impuestos inicialmente para el modelo se cumplen. Se cuenta con regulación de la longitud tanto para el brazo como para el antebrazo, permitiendo al usuario ajustar la medida correcta. Además, se ha diseñado un brazo lo más ligero posible, aligerando las rótulas y empleando perfiles circulares huecos en el brazo y antebrazo. El peso del conjunto brazo, antebrazo, soporte del antebrazo y pala es de 11,8 kg (acorde a las piezas modeladas por ordenador, supóngase un error de +- 5%) para todos los elementos en acero. El peso de cada actuador, para las carreras seleccionadas, está entre 3 y 4 kg (según el fabricante) dependiendo de la configuración final del actuador.

Finalmente, y como se muestra en el “Anexo II Simulación”, para los distintos estados de carga analizados todos los elementos trabajan siempre por debajo del límite elástico, asegurando que no se producen deformaciones plásticas de los mismos.

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Anexo I: Cálculo Analítico

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Anexo I: Cálculo Analítico

1	Introducción.....	44
2	Definición de los parámetros del cálculo.....	45
2.1	Con accionamiento anterior del antebrazo.....	45
2.1.1	Puntos.....	46
2.1.2	Distancias.....	46
2.1.3	Ángulos.....	47
2.2	Con accionamiento posterior del antebrazo.....	48
2.2.1	Puntos.....	48
2.2.2	Distancias.....	49
3	Determinación de la posición del actuador del antebrazo.....	49
3.1	Actuador que acciona el antebrazo desde su cara anterior.....	49
3.2	Actuador que acciona el antebrazo desde su cara posterior.....	50
3.3	Actuador que acciona el brazo.....	52
4	Sistema coordinado y matriz de rotación.....	53
5	Cálculo a partir de las ecuaciones del equilibrio.....	54
5.1	Antebrazo con accionamiento desde su cara anterior.....	55
5.1.1	Fuerzas.....	55
5.1.2	Vectores.....	55
5.1.3	Equilibrio de momentos.....	56
5.1.4	Equilibrio de fuerzas.....	58
5.1.5	Momento flector en la sección.....	58
5.2	Antebrazo con accionamiento desde su cara posterior.....	59
5.2.1	Fuerzas.....	60
5.2.2	Vectores.....	60
5.2.3	Equilibrio de momentos.....	60

5.2.4	Equilibrio de fuerzas.....	62
5.2.5	Momento flector en la sección.....	62
5.3	Brazo.....	63
5.3.1	Fuerzas.....	63
5.3.2	Vectores.....	63
5.3.3	Equilibrio de momentos.....	64
5.3.4	Equilibrio de fuerzas.....	66
5.3.5	Momento flector en la sección.....	66
5.4	Longitud del actuador.....	67
6	Resultados al cálculo analítico.....	68
6.1	Valores de partida para el cálculo.....	68
6.2	Fuerzas máximas que deben ejercer los actuadores.....	69
6.2.1	Actuador que acciona el antebrazo desde su cara anterior.....	69
6.2.2	Actuador que acciona el brazo.....	70
6.2.3	Fuerzas y momentos flectores máximos.....	70
6.3	Longitudes y carreras de los actuadores.....	71
6.4	Aceleraciones, velocidades y tiempos de actuación.....	73
6.4.1	Aceleraciones en el brazo.....	73
6.4.2	Velocidad estimativa de actuación.....	75
6.4.3	Tiempos de actuación.....	76
6.5	Estado de cargas en los elementos.....	76
7	Soldadura y pernos.....	77
7.1	Soldaduras a tope.....	77
7.2	Soldaduras en ángulo.....	77
7.3	Pernos.....	79

1 Introducción.

Mediante el presente documento se pretende justificar el cálculo necesario de los elementos objeto de diseño de este proyecto.

Para modelar y llevar a cabo el correspondiente estudio de tensiones en las diferentes partes que conforman los brazos del exoesqueleto es necesario determinar unas medidas iniciales de las secciones que conforman las piezas que den una idea de las dimensiones en las que manejarse. Un punto de partida que se establece a partir del cálculo en elasticidad y resistencia de materiales.

Las dos partes que conforman el brazo, antebrazo y brazo en sí mismo, se comportan como vigas, estando sometidas por tanto a flexión, además de poder darse tracción o compresión junto con esta.

De esta manera, se requiere un estudio de las distintas partes, atendiendo a los tipos de unión que se darán entre ellas y a las medidas que conforman los elementos para así, partiendo de un cálculo analítico, dimensionar correctamente las piezas.

En primer lugar, se simplifican tanto el brazo como el antebrazo como elementos lineales que se comportan como vigas y cuyo movimiento se describe dentro de un plano. Así pues, se establece el correspondiente diagrama de cuerpo libre para cada elemento, determinando las cargas que sobre el actúan y estableciendo las correspondientes ecuaciones del equilibrio. Antes de ello, es necesario determinar, mediante un análisis vectorial, el movimiento que describen los elementos para así conocer los ángulos que los actuadores que los controlan forman con respecto a estos.

Tras estudiar los posibles accionamientos para brazo y antebrazo se ha determinado que, si bien ambos pueden accionarse anterior o posteriormente, para el caso del brazo la diferencia se limita únicamente a la orientación en la que se coloca el enganche al cual se fija el actuador. Para el antebrazo no obstante, si bien es válido lo anterior en el caso de accionamiento desde la cara anterior, cuando se requiere un accionamiento desde la cara posterior se hace necesario modificar la forma que el antebrazo adopta para garantizar la posible colocación del actuador. En principio, ambas formas de actuación del antebrazo tienen sus ventajas e inconvenientes, pero no destaca una razón de peso que dé a pensar que es preferible una u otra opción. A continuación, se detalla el cálculo de ambas opciones,

teniendo en cuenta que el brazo se accionará en cualquiera de los casos desde la cara posterior por motivos constructivos.

2 Definición de los parámetros del cálculo.

2.1 Con accionamiento anterior del antebrazo.

Primeramente, resulta necesario definir los distintos elementos, sus dimensiones, y como están conectados entre sí para, posteriormente, establecer las hipótesis de cálculo.

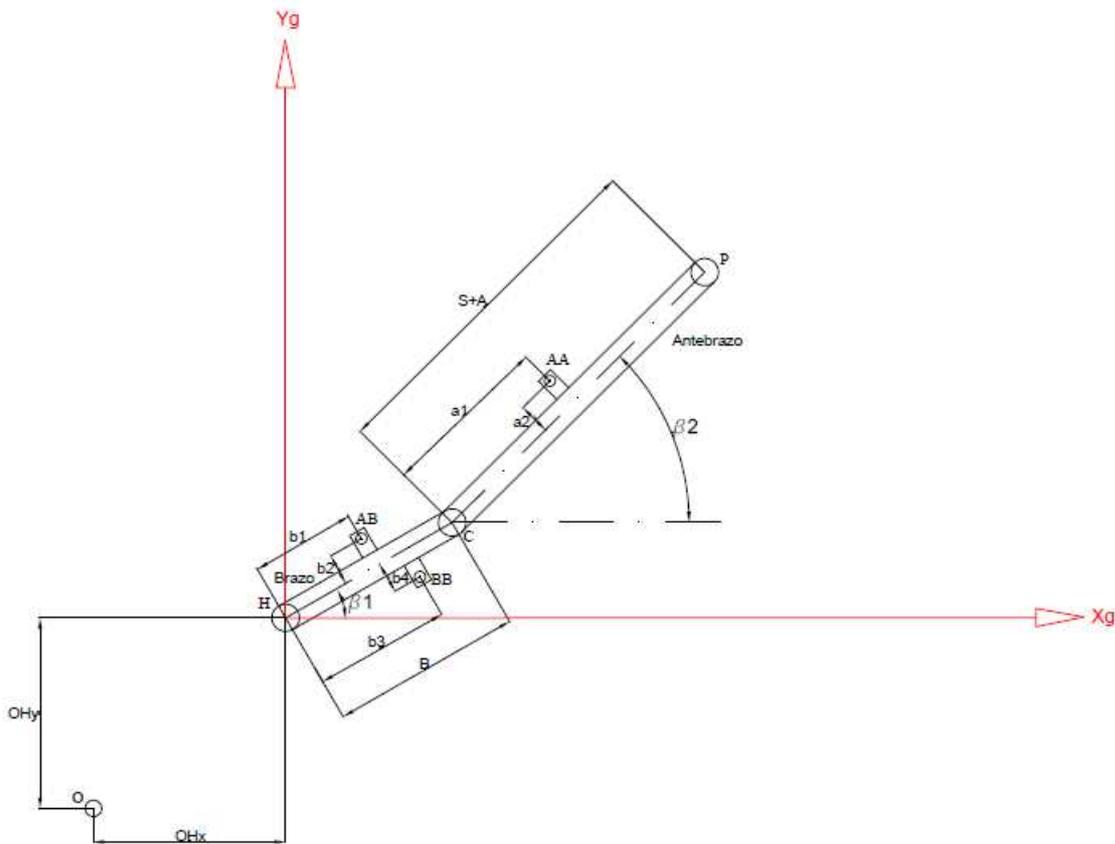


Figura 32. Medidas generales para el cálculo analítico, brazo con accionamiento anterior del antebrazo.

La figura 32 es un esquema en el que se representan el brazo y el antebrazo, con sus medidas y los diferentes puntos a tener en cuenta en el cálculo. Todas las uniones, tanto entre piezas como en los enganches con los actuadores son articulaciones, de manera que en ellas se limitan los desplazamientos pero no las rotaciones, no habiendo transmisión de momentos entre los diferentes elementos conectados. De acuerdo con el esquema:

2.1.1 Puntos.

- Punto O: corresponde al punto de la espalda al cual se fija el actuador que acciona el brazo. Su posición es fija en el plano.
- Punto H: corresponde al hombro, punto en el cual articula todo el brazo. Su posición es fija en el plano.
- Punto BB: corresponde a la “oreja” en la cual se engancha el actuador que acciona el brazo.
- Punto C: corresponde a la articulación del codo, punto a partir del cual rota el antebrazo.
- Punto AB: corresponde a la “oreja” en el brazo en la que engancha el actuador que acciona el antebrazo.
- Punto AA: corresponde a la “oreja” en el antebrazo en la que engancha el actuador que acciona el mismo.
- Punto P: punto de aplicación de la carga, que coincide con el extremo de la estructura del antebrazo.

2.1.2 Distancias.

- OHx: distancia desde el punto de articulación del hombro al punto de enganche O del actuador del brazo medida sobre la horizontal.
- OHy: distancia desde el punto de articulación del hombro al punto de enganche O del actuador del brazo medida sobre la vertical.
- B: longitud total del brazo.
- b1: distancia entre el punto H y el punto AB medida sobre el eje longitudinal del brazo, corresponde a la distancia a la que se coloca la “oreja” para el actuador del antebrazo con respecto al hombro.
- b2: distancia entre el punto H y el punto AB medida perpendicularmente al eje longitudinal del brazo, corresponde a la altura que sobresale la “oreja” sobre el brazo.
- b3: distancia entre el punto H y el punto BB medida sobre el eje longitudinal del brazo, corresponde a la distancia a la que se coloca la “oreja” para el actuador del brazo con respecto al hombro.
- b4: distancia entre el punto H y el punto BB medida perpendicularmente al eje longitudinal del brazo, corresponde a la altura que sobresale la “oreja” sobre el brazo.

- S+A: corresponde a la longitud total como suma de las longitudes del antebrazo más un saliente.
- A: longitud del antebrazo.
- S: longitud del saliente.
- A efectos de cálculo, se toma el conjunto S+A pues, independientemente de la medida de cada uno, este se conforma como una pieza única.
- a1: distancia entre el punto C y el punto AA medida sobre el eje longitudinal del antebrazo, corresponde a la distancia a la que se coloca la “oreja” con respecto al codo.
- a2: distancia entre el punto C y el punto AA medida perpendicularmente al eje del antebrazo, corresponde a la altura que sobresale la “oreja” sobre el antebrazo.

2.1.3 Ángulos.

- Beta1: ángulo que forma el eje longitudinal del brazo con respecto a la horizontal, en el sistema mostrado en la figura 32.
- Beta2: ángulo que forma el eje longitudinal del antebrazo con respecto a la horizontal, en el sistema mostrado en la figura 32.

Con las distancias y ángulos anteriormente mencionados se puede definir de manera clara y unívoca la posición de cualquiera de los puntos citados y que se describen en la figura 32. Tanto el brazo como el antebrazo se accionan a través de actuadores lineales, el actuador del brazo enclavado entre las posiciones O-BB y el actuador del antebrazo entre las posiciones AB-AA. En ambos casos, en los puntos de enganche el actuador se articula, de tal manera que no se transmiten momentos entre el actuador y sus enganches. Así, el actuador actúa únicamente a tracción y/o compresión. Este aspecto es importante de cara al cálculo, pues de empotrarse en alguna de las “orejas” no podría resolverse el problema solo a partir de las ecuaciones del equilibrio, pues no sería isostático. De cara al cálculo, es necesario conocer la posición exacta del actuador, y el ángulo que forma bien con el sistema coordinado global que aparece en la figura 32 o bien con el sistema coordinado local asociado a cada elemento (acorde con la figura 37), con el fin de descomponer la fuerza que este ejerce y determinar su valor.

2.2 Con accionamiento posterior del antebrazo.

Como se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de accionar el antebrazo desde su parte posterior, lo que requiere un diseño del elemento diferente y modifica el cálculo. Así pues, esta variante quedaría definida en la siguiente figura:

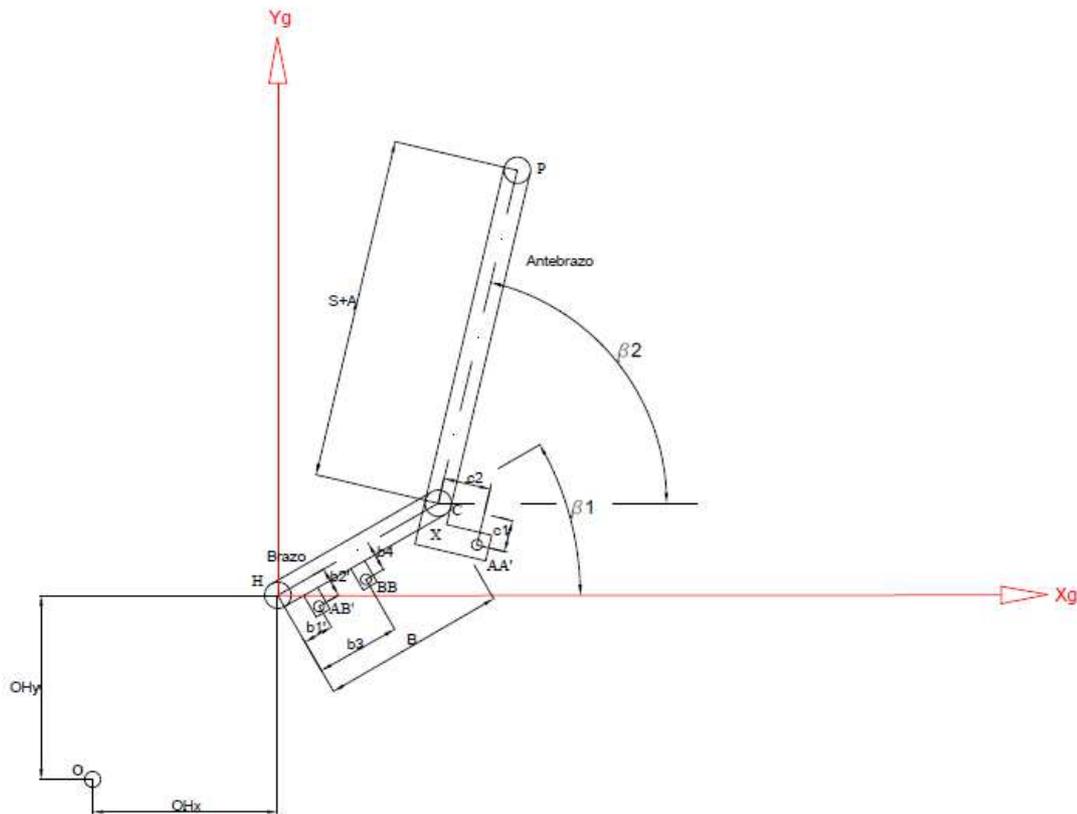


Figura 33. Medidas generales para el cálculo analítico, brazo con accionamiento posterior del antebrazo.

Nótese que, en este caso, existe una prolongación de antebrazo más allá del punto C (articulación del codo). Además, la oreja AB' donde se engancha el actuador del antebrazo sobre el brazo ahora queda en la cara posterior de éste, al contrario que en el caso anterior. Todos los puntos, medidas y ángulos especificados en la figura 33 están ya descritos en el apartado 2.1., salvo aquellos que se detallan a continuación.

2.2.1 Puntos.

- Punto AA' : punto de enganche del actuador que acciona el antebrazo, en el antebrazo.
- Punto AB' : punto de enganche del actuador que acciona el antebrazo, en el brazo. Es análogo al punto AB especificado en el apartado 2.1., pero en este caso queda en la cara posterior del brazo.

- Punto X: punto de encuentro entre los elementos que conforman la prolongación del antebrazo, y que queda definido a través de las distancias c_1 y c_2 .

2.2.2 Distancias.

- c_1 : distancia entre el punto C y el punto AA' medida paralelamente al eje longitudinal del antebrazo.
- c_2 : distancia entre el punto C y el punto AA' medida perpendicularmente al eje longitudinal del antebrazo.
- b_1' : distancia entre el punto H y el punto AB' medida paralelamente al eje longitudinal del brazo, corresponde a la distancia a la que se coloca la "oreja" con respecto al hombro.
- b_2' : distancia entre el punto H y el punto AB' medida perpendicularmente al eje longitudinal del brazo, corresponde a la altura que sobresale la "oreja" sobre el brazo.

3 Determinación de la posición del actuador del antebrazo.

Un análisis vectorial permite, con los ángulos y medidas definidos, conocer para cualquier giro del mecanismo el posicionamiento de los actuadores.

3.1 Actuador que acciona el antebrazo desde su cara anterior.

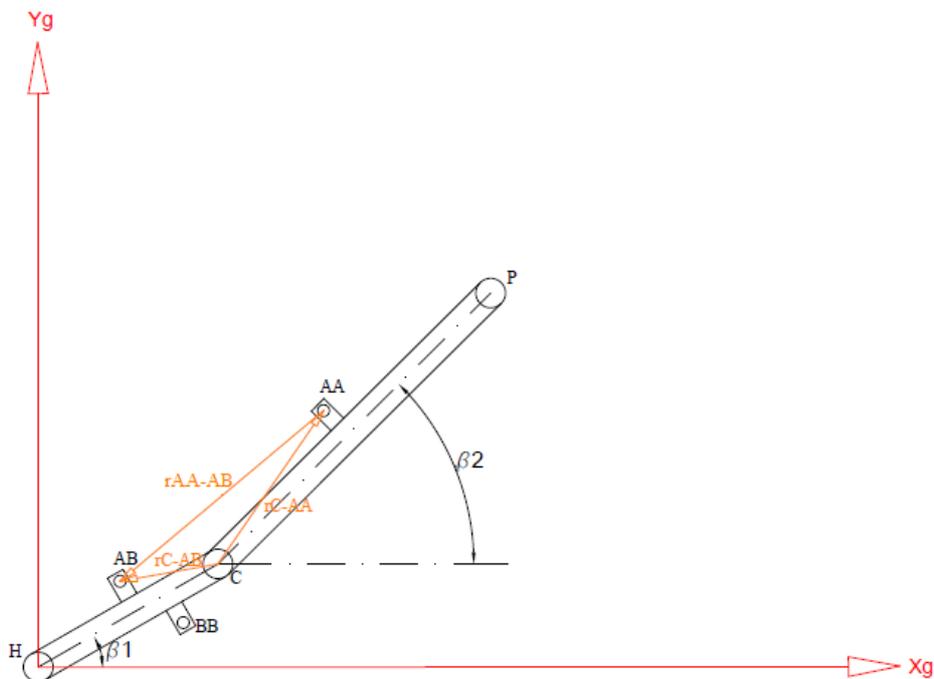


Figura 34. Determinación de la posición del actuador del antebrazo con accionamiento anterior.

Un análisis vectorial permite conocer la posición que ocupa el actuador que acciona el antebrazo. Los vectores por los cuales dicha posición queda definida son:

- Vector r_{C-AB} : vector que une los puntos C y AB, determina la posición de la “oreja” AB respecto al punto C en función del ángulo Beta 1 que gira el brazo. Sus componentes son:

$$\overrightarrow{r_{C,AB}} = [-(B - b_1) \cdot \cos \beta_1 - b_2 \cdot \sin \beta_1] \vec{i} + [-(B - b_1) \cdot \sin \beta_1 + b_2 \cdot \cos \beta_1] \vec{j}$$

- Vector r_{C-AA} : vector que une los puntos C y AA, determina la posición de la “oreja” AA respecto al punto C en función del ángulo Beta 2 que gira el antebrazo. Sus componentes son:

$$\overrightarrow{r_{C,AA}} = [a_1 \cdot \cos \beta_2 - a_2 \cdot \sin \beta_2] \vec{i} + [a_1 \cdot \sin \beta_2 + a_2 \cdot \cos \beta_2] \vec{j}$$

- Vector r_{AA-AB} : vector que une los puntos de enganche del actuador que acciona el antebrazo (AB y AA), y que permite determinar la posición exacta de dicho actuador.

$$\overrightarrow{r_{AA,AB}} = \overrightarrow{r_{C,AB}} - \overrightarrow{r_{C,AA}}$$

El vector r_{AA-AB} define la posición del actuador que acciona el antebrazo pudiendo, a partir de este, obtener la descomposición en el sistema coordenado global de la fuerza que ejerce el mismo.

3.2 Actuador que acciona el antebrazo desde su cara posterior.

De nuevo, por análisis vectorial es posible determinar la posición que ocupa el actuador en función del movimiento de los elementos brazo y antebrazo.

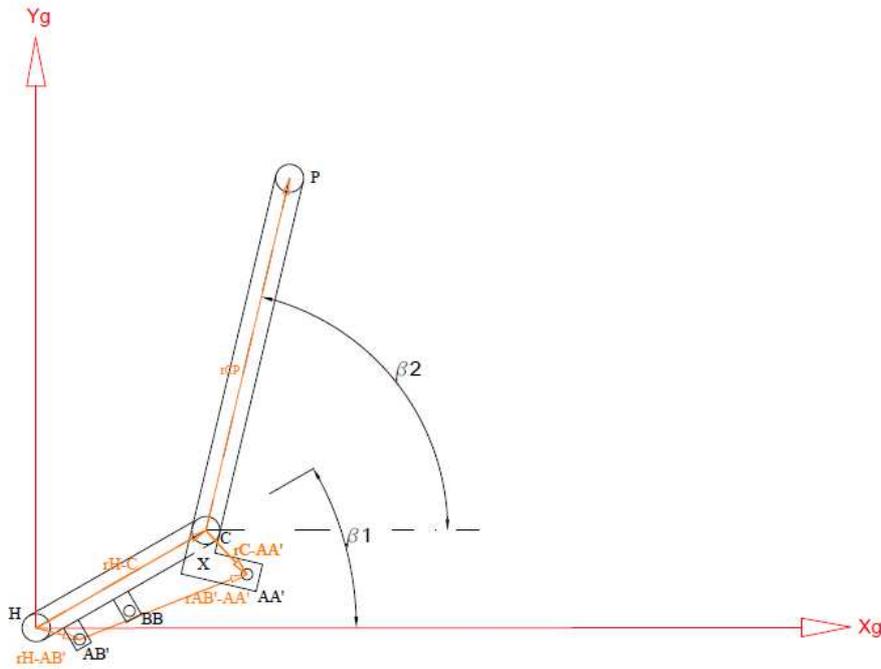


Figura 35. Determinación de la posición del actuador para el antebrazo con accionamiento posterior.

De la figura anterior se tienen los siguientes vectores:

- Vector $r_{H-AB'}$: vector que une el punto H (articulación del hombro) con el punto AB' en el cual engancha el actuador que acciona el antebrazo. Tiene las siguientes componentes:

$$\overrightarrow{r_{H, AB'}} = [b1' \cdot \cos(\beta_1) + b2' \cdot \sin(\beta_1)]\vec{i} + [b1' \cdot \sin(\beta_1) - b2' \cdot \cos(\beta_1)]\vec{j}$$

- Vector r_{H-C} : vector que recorre la longitud del brazo, desde el punto H (articulación del hombro) hasta el punto C (articulación del codo). Tiene las siguientes componentes:

$$\overrightarrow{r_{H, C}} = B \cdot \cos(\beta_1)\vec{i} + B \cdot \text{seno}(\beta_1)\vec{j}$$

- Vector $r_{C-AA'}$: vector que une el punto C (articulación del codo) con el punto AA' de enganche del actuador que acciona el antebrazo. Tiene las siguientes componentes:

$$\overrightarrow{r_{C, AA'}} = [-c1 \cdot \cos(\beta_2) + c2 \cdot \sin(\beta_2)]\vec{i} + [-c1 \cdot \sin(\beta_2) - c2 \cdot \cos(\beta_2)]\vec{j}$$

- Vector $\overrightarrow{r_{AB',AA'}}$: vector que une los puntos AB' y AA' de enganche del actuador que acciona el antebrazo. Corresponde con la posición que ocupa el actuador en sí mismo. Viene dado por:

$$\overrightarrow{r_{AB',AA'}} = \overrightarrow{r_{C,AA'}} + \overrightarrow{r_{H,C}} - \overrightarrow{r_{H,AB'}}$$

3.3 Actuador que acciona el brazo.

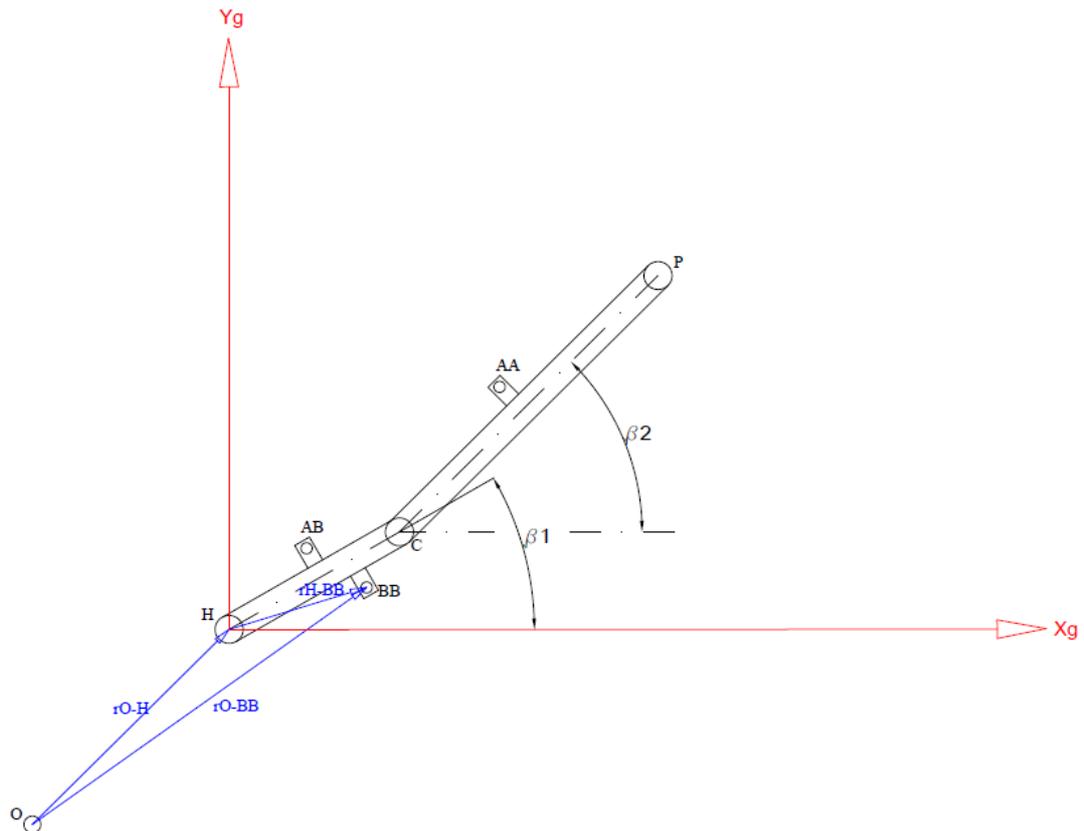


Figura 36. Determinación de la posición del actuador del brazo.

En la figura 36, y para las mismas medidas indicadas en la figura 32, se establecen los vectores que determinan la posición del actuador que acciona el brazo.

- Vector $r_{O,H}$: vector que une los puntos O y H, este vector tiene componentes fijas, pues tanto el punto O como el punto H permanecen fijos en el plano. Su descomposición es la siguiente:

$$\overrightarrow{r_{O,H}} = OH_x \vec{i} + OH_y \vec{j}$$

- Vector $r_{H,BB}$: vector que une los puntos H y BB, determina la posición de la “oreja” en la cual se engancha el actuador del brazo en función del giro que realice éste. Sus componentes son:

$$\overrightarrow{r_{H, BB}} = [b3 \cdot \cos \beta_1 + b4 \cdot \sin \beta_1] \vec{i} + [b3 \cdot \sin \beta_1 - b4 \cdot \cos \beta_1] \vec{j}$$

- Vector r_{O-BB} : determina la posición del actuador que acciona el brazo, uniendo los puntos O y BB.

$$\overrightarrow{r_{O, BB}} = \overrightarrow{r_{O, H}} + \overrightarrow{r_{H, BB}}$$

Conocido el vector r_{O-BB} puede determinarse el ángulo que el actuador forma con la horizontal del sistema coordenado global y las componentes en X e Y de la fuerza que ejerce sobre el enganche en el punto BB.

4 Sistema coordenado y matriz de rotación.

El sistema coordenado global se establece tal y como se muestra en las figuras 32 y 33, donde los ángulos que giran tanto al brazo como el antebrazo se toman como positivos en sentido antihorario, y negativos en sentido horario. El sistema coordenado local, para cada elemento, se toma a partir de su eje longitudinal y de la perpendicular a este, tal y como se define en la figura 37. De acuerdo con el sistema coordenado global X, Y y Z forman un sistema dextrógiro con i, j y k, respectivamente, donde Z (k) es el eje perpendicular al plano que forman X e Y, en el sentido en que sale del papel.

La matriz de rotación permite relacionar el sistema coordenado global con el sistema coordenado local de cada elemento. Acorde con la figura 37 esta matriz tiene la forma:

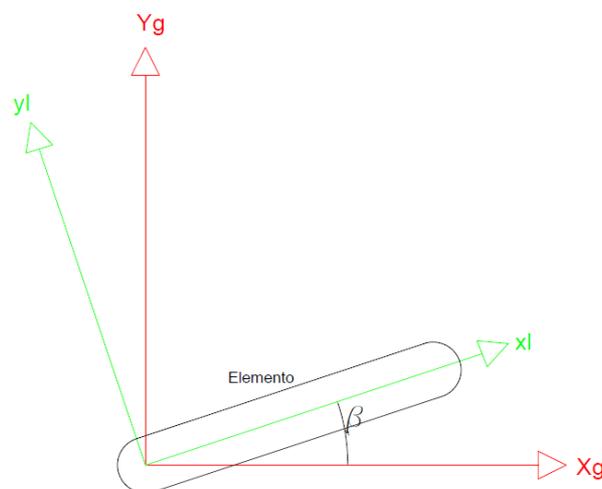


Figura 37. Relación entre el sistema coordenado local del elemento y el sistema coordenado global del conjunto.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

Y viene de relacionar los ejes coordenados locales con los ejes coordenados globales:

$$\begin{aligned} xl &= Xg \cos \beta + Yg \sin \beta \\ yl &= -Xg \sin \beta + Yg \cos \beta \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} xl \\ yl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xg \\ Yg \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación tiene la misma forma para brazo y antebrazo, pero empleando el ángulo Beta que define la rotación de cada uno.

$$R_{brazo} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{bmatrix}$$

$$R_{antebrazo} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & \sin \beta_2 \\ -\sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix}$$

Esta matriz de rotación permite expresar el campo de fuerzas actuante sobre el antebrazo respecto a sus ejes locales, es decir, como fuerzas expresadas en las direcciones ortogonales que conforman los ejes x e y locales, de la siguiente manera:

$$[fl] = [R][Fg]$$

A través de las fuerzas en ejes locales podrán determinarse los diagramas de momento flector, esfuerzo normal y esfuerzo cortante si fuera necesario.

5 Cálculo a partir de las ecuaciones del equilibrio.

A partir del análisis vectorial realizado puede establecerse un análisis de fuerzas en los elementos, planteando las ecuaciones del equilibrio en cada uno.

Analíticamente se requiere satisfacer las siguientes condiciones de equilibrio:

- Resultante de fuerzas sobre el elemento igual a cero.
- Equilibrio de momentos.

5.1 Antebrazo con accionamiento desde su cara anterior.

En la figura 38 se muestran las fuerzas actuantes en el antebrazo, que corresponden a la carga que se soporta en su extremo, la fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo y las reacciones que surgen en la articulación del codo. Se plantea el análisis en un sistema coordinado global, estableciendo el equilibrio de fuerzas en ambas direcciones, X e Y, y el equilibrio de momentos con respecto a la articulación del codo, punto C. Así pues:

5.1.1 Fuerzas.

- P: carga que se soporta en el extremo del elemento del antebrazo.
- FAA: fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo.
- FCx: fuerza de reacción en el codo, en la dirección X del sistema coordinado global.
- FCy: fuerza de reacción en el codo, en la dirección Y del sistema coordinado global.
- También se especifican en la figura 38 los vectores asociados a las cargas que ejercen momentos con respecto al punto C.

5.1.2 Vectores.

- Vector r_{C-P} : vector que une el punto C (articulación del codo) con el extremo en el que se sujeta la carga, punto P.

$$\overrightarrow{r_{C,P}} = [(S + A) \cdot \cos \beta_2] \vec{i} + [(S + A) \cdot \sin \beta_2] \vec{j}$$

- Vector r_{C-AA} : definido en el apartado 3.1.

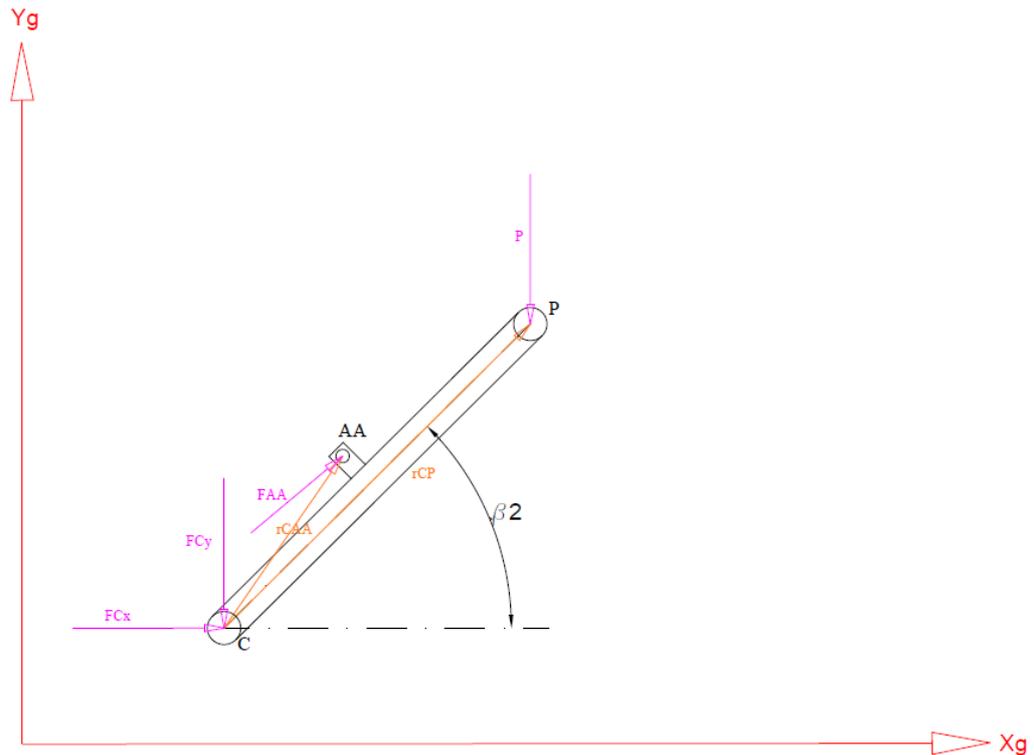


Figura 38. Diagrama de cuerpo libre para el antebrazo con accionamiento anterior.

5.1.3 Equilibrio de momentos.

Del equilibrio de momentos puede determinarse la fuerza que debe realizar el actuador que acciona el antebrazo. Para ello, se tiene en cuenta que el momento que ejerce cada fuerza respecto al punto C viene dado como producto vectorial de la fuerza por el vector que une el codo y el punto de aplicación de la carga.

- El momento que ejerce la carga P respecto al punto C:

$$\overline{M, P} = \overline{r_C, P} \times \vec{P}$$

La carga P tiene las componentes:

$$\vec{P} = 0 \vec{i} - P \vec{j}$$

Luego:

$$\overline{M, P} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ (S + A) \cdot \cos \beta_2 & (S + A) \cdot \sin \beta_2 & 0 \\ 0 & -P & 0 \end{bmatrix}$$

A partir del determinante de la matriz se obtiene el momento que genera la carga P respecto al punto C:

$$\overline{M, \vec{P}} = -P \cdot (S + A) \cdot \cos \beta_2 \vec{k}$$

- Momento que genera la fuerza del actuador que acciona el antebrazo, respecto al punto C:

$$\overline{M, \vec{FAA}} = \overline{r_{C, AA} \times \vec{FAA}}$$

La fuerza FAA tiene las componentes:

$$\vec{FAA} = FAA \cdot \left[\frac{r_{AA, AB_x}}{\|r_{AA, AB}\|} \vec{i} + \frac{r_{AA, AB_y}}{\|r_{AA, AB}\|} \vec{j} \right]$$

De manera que el momento generado por la fuerza del actuador sobre el punto AA respecto al punto C es:

$$\overline{M, \vec{FAA}} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ a1 \cdot \cos \beta_2 - a2 \cdot \sin \beta_2 & a1 \cdot \sin \beta_2 + a2 \cdot \cos \beta_2 & 0 \\ FAA \cdot \frac{r_{AA, AB_x}}{\|r_{AA, AB}\|} & Faa \cdot \frac{r_{AA, AB_y}}{\|r_{AA, AB}\|} & 0 \end{bmatrix}$$

De nuevo, el determinante de la matriz nos da el momento, en este caso:

$$\overline{M, \vec{FAA}} = \left[[a1 \cdot \cos \beta_2 - a2 \cdot \sin \beta_2] \cdot Faa \cdot \frac{r_{AA, AB_y}}{\|r_{AA, AB}\|} - [a1 \cdot \sin \beta_2 + a2 \cdot \cos \beta_2] \cdot FAA \cdot \frac{r_{AA, AB_x}}{\|r_{AA, AB}\|} \right] \vec{k}$$

Como debe satisfacerse la condición de equilibrio de momentos:

$$\sum M_C = M, P + M, FAA = 0$$

Y partir de aquí obtenemos el valor del módulo de la fuerza necesaria en el actuador que acciona el antebrazo para equilibrar el sistema, FAA.

5.1.4 Equilibrio de fuerzas.

Una vez obtenido el valor de la fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo, se calculan las reacciones que se generan en la articulación del codo a partir del equilibrio de fuerzas como suma de vectores. De esta manera:

$$\vec{P} + \overrightarrow{FAA} + \overrightarrow{FC} = 0$$

Es decir:

$$\begin{bmatrix} 0 & FAAx & FCx \\ -P & FAAy & FCy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{bmatrix} = 0$$

5.1.5 Momento flector en la sección.

Conocidas todas las fuerzas actuantes sobre el antebrazo, es posible determinar los momentos flectores que se generan en cada punto a partir de su correspondiente diagrama. Para ello, es conveniente obtener las fuerzas que actúan sobre el elemento con respecto a su sistema coordenado local. Esto se logra por medio de la matriz de rotación, la cual vincula el sistema coordenado global con el sistema coordenado local.

Una vez rotadas las fuerzas hasta el sistema local, el diagrama de momentos puede calcularse por equilibrio de las secciones. En este caso, avanzando desde el punto C (articulación del codo) hasta el extremo libre, punto P:

- $M(C) = 0$
- $M(AA^-) = -f_{C,y} \cdot a_1$
- $M(AA^+) = -f_{C,y} \cdot a_1 - f_{AA,x} \cdot a_2$
- $M(P) = -f_{C,y} \cdot (S + A) - f_{AA,x} \cdot a_2 - f_{AA,y} \cdot (S + A - a_1) = 0$

Nótese que la fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo, al actuar excéntrica respecto al eje de este, genera un momento puntual aplicado en el punto en el cual se coloca la “oreja” a la que se fija, generando por lo tanto un salto en el diagrama de momento.

Debe entenderse que los esfuerzos de flexión son la sollicitación más importante en el elemento, junto con la tracción o compresión que pudieran darse.

De acuerdo con las fuerzas que actúan sobre el elemento del antebrazo y los momentos que estas generan en la pieza, se establece el siguiente diagrama de momentos:

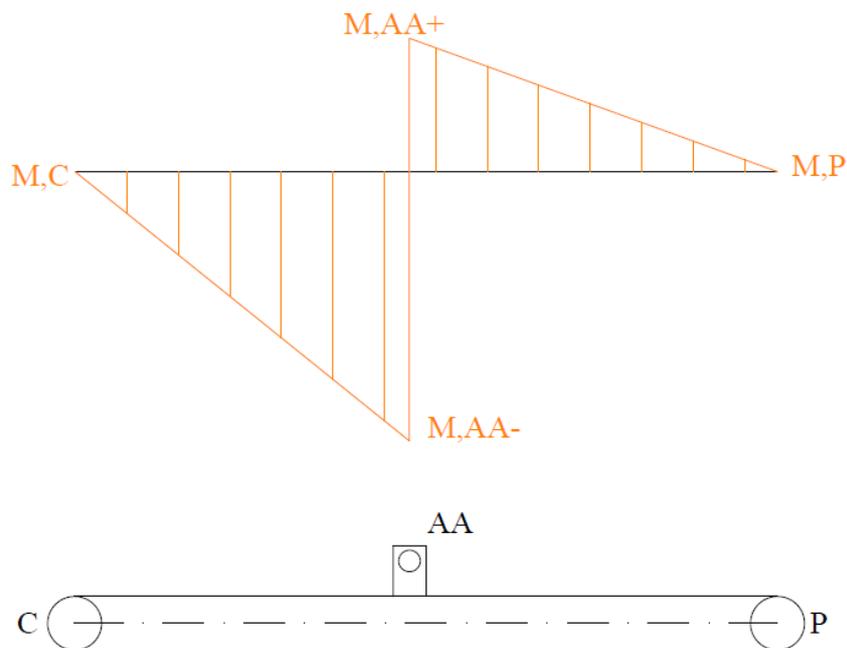


Figura 39. Forma del diagrama de momento flector para el antebrazo con accionamiento anterior en su posición más desfavorable.

5.2 Antebrazo con accionamiento desde su cara posterior.

En la siguiente figura se establece el diagrama de cuerpo libre para el antebrazo, además de los vectores asociados a las cargas que generan momentos respecto al punto C:

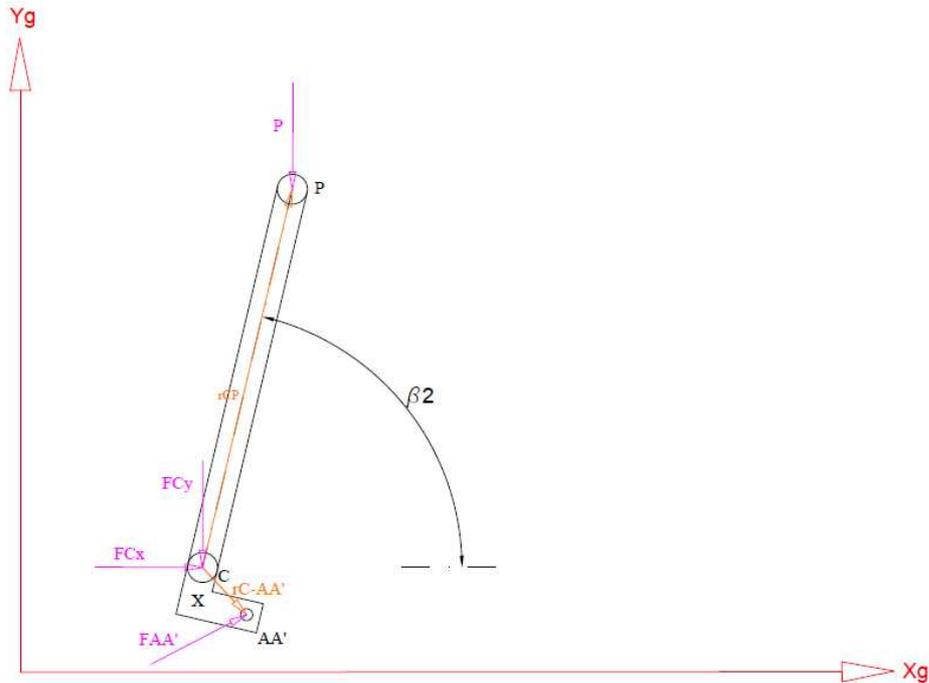


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre para el antebrazo con accionamiento posterior.

5.2.1 Fuerzas.

- P: carga que se sujeta en el extremo libre del elemento del antebrazo.
- FCx: fuerza de reacción que se da en el codo, según la dirección X del sistema coordinado global.
- FCy: fuerza de reacción que se da en el codo, según la dirección Y del sistema coordinado global.
- FAA': fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo sobre el enganche en el punto AA'.

5.2.2 Vectores.

- Vector r_{C-P} : ya definido en el apartado 5.1.2.
- Vector $r_{C-AA'}$: definido anteriormente en el apartado 3.2.

5.2.3 Equilibrio de momentos.

A partir del equilibrio de fuerzas respecto al punto C puede determinarse el valor de la fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo, FAA'.

- Momento que ejerce la carga P respecto a C:

$$\overline{M, P} = \overline{r_{C, P}} \times \overline{P}$$

La carga P tiene las componentes:

$$\vec{P} = 0 \vec{i} - P \vec{j}$$

Luego:

$$\overline{M, \vec{P}} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ (S + A) \cdot \cos \beta_2 & (S + A) \cdot \sin \beta_2 & 0 \\ 0 & -P & 0 \end{bmatrix}$$

El determinante de la matriz nos permite obtener el momento:

$$\overline{M, \vec{P}} = -P \cdot (S + A) \cdot \cos \beta_2 \vec{k}$$

- Momento que genera la fuerza que ejerce el actuador en AA' respecto a C:

$$\overline{M, FAA'} = \overline{r_{C, AA'} \times FAA'}$$

La fuerza FAA':

$$\overline{r_{FAA'}} = FAA' \cdot \left[\frac{r_{AB', AA'x}}{\|r_{AB', AA'}\|} \vec{i} + \frac{r_{AB', AA'y}}{\|r_{AB', AA'}\|} \vec{j} \right]$$

Luego:

$$\overline{M, FAA'} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ -c1 \cdot \cos(\beta_2) + c2 \cdot \sin(\beta_2) & -c1 \cdot \sin(\beta_1) - c2 \cdot \cos(\beta_1) & 0 \\ \frac{r_{AB', AA'x}}{\|r_{AB', AA'}\|} & \frac{r_{AB', AA'y}}{\|r_{AB', AA'}\|} & 0 \end{bmatrix}$$

Y calculando el determinante:

$$\overline{M, FAA'} = \left[[-c1 \cdot \cos(\beta_2) + c2 \cdot \sin(\beta_2)] \frac{r_{AB', AA'y}}{\|r_{AB', AA'}\|} - [-c1 \cdot \sin(\beta_1) - c2 \cdot \cos(\beta_1)] \frac{r_{AB', AA'x}}{\|r_{AB', AA'}\|} \right] \vec{k}$$

Y finalmente, de la ecuación de equilibrio de momentos obtenemos el valor de FAA':

$$\sum M_C = M, P + M, FAA' = 0$$

5.2.4 Equilibrio de fuerzas.

Obtenido el valor de la fuerza FAA', por equilibrio de fuerzas hallamos las reacciones en el punto C:

$$\vec{P} + \vec{FAA'} + \vec{FC} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 & FAA'x & FCx \\ -P & FAA'y & FCy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{bmatrix} = 0$$

5.2.5 Momento flector en la sección.

Finalmente, calculadas todas las fuerzas actuantes sobre el antebrazo es posible determinar el diagrama de momentos correspondiente, rotando las fuerzas al sistema local a través de la matriz de rotación.

De tal manera, desde AA' en adelante tenemos los siguientes momentos:

- $M(AA') = 0$
- $M(X) = fAA',x \cdot c2$
- $M(C) = fAA',x \cdot c2 - fAA',y \cdot c1$
- $M(P) = fAA',x \cdot c2 - fAA',y \cdot c1 - fC,y \cdot (S + A) = 0$

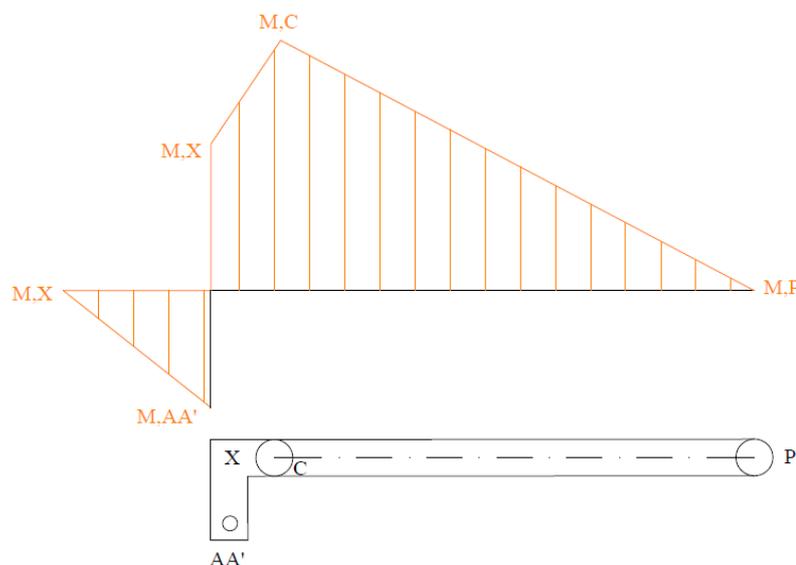


Figura 41. Forma del diagrama de momento flector para el antebrazo con accionamiento posterior en su posición más desfavorable.

5.3 Brazo.

Para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre el brazo pueden tomarse dos caminos: una vez conocidas las reacciones que se dan en el punto C (articulación del codo) rotarlas al sistema coordinado local del brazo y analizar únicamente el elemento del brazo en su sistema local, o bien analizar el conjunto brazo y antebrazo en un sistema global. Nótese que la fuerza que ejerce el actuador que acciona el antebrazo se equilibra con reacciones en el punto C, luego puede tomarse como objeto de estudio el brazo y antebrazo completos, determinando las reacciones que se dan en el punto H (articulación del hombro) y la fuerza que debe ejercer el actuador del brazo en el punto BB. Se ha optado por realizarlo de esta manera, por sencillez en el cálculo, donde únicamente aparecerán dos fuerzas, analizando el conjunto en el sistema coordinado global. De acuerdo con la figura 42:

5.3.1 Fuerzas.

- P: carga que se sujeta en el extremo libre del elemento del antebrazo.
- FBB: fuerza que ejerce el actuador que acciona el brazo sobre la “oreja” en el punto BB.
- FHx: fuerza de reacción que se da en el hombro en la dirección X del sistema coordinado global.
- FHy: fuerza de reacción que se da en el hombro en la dirección Y del sistema coordinado global.

5.3.2 Vectores.

- Vector r_{H-P} : vector que une el punto H (articulación del hombro) con el punto P en el cual se sujeta la carga.

$$\overline{r_{H,P}} = [B \cdot \cos \beta_1 + (S + A) \cdot \cos \beta_2] \vec{i} + [B \cdot \sin \beta_1 + (S + A) \cdot \sin \beta_2] \vec{j}$$

- Vector r_{H-BB} : ya definido en el apartado 3.3.

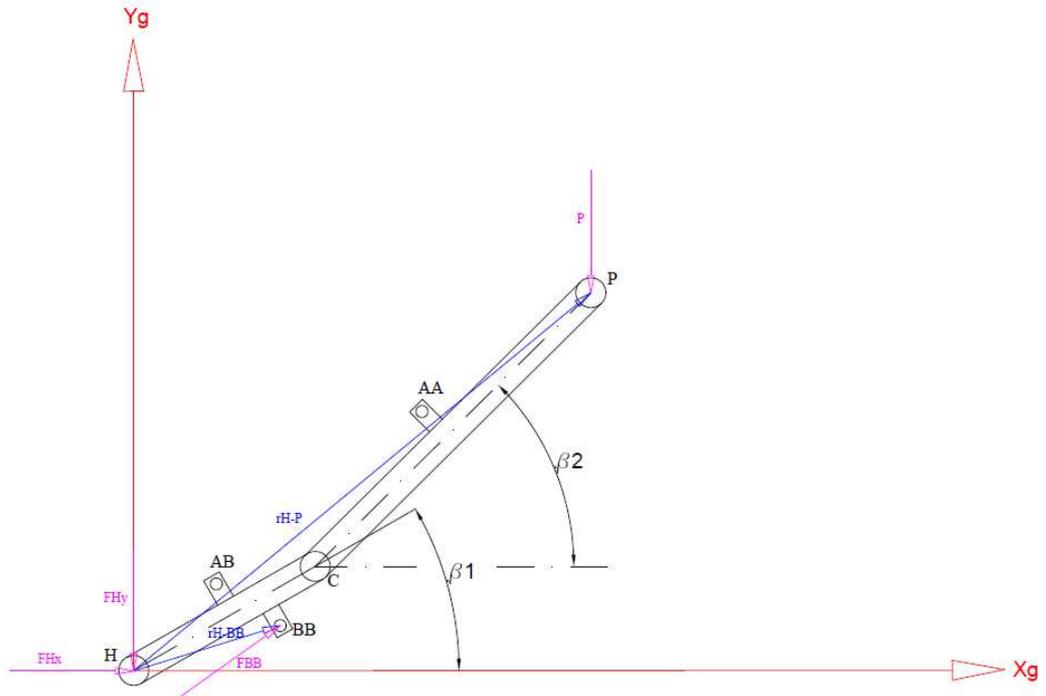


Figura 42. Diagrama de cuerpo libre para el brazo.

5.3.3 Equilibrio de momentos.

A partir del equilibrio de momentos al conjunto del brazo puede determinarse la fuerza que ejerce el actuador que acciona el brazo en la “oreja” BB. El equilibrio de momentos se toma respecto al punto H.

- Momento que ejerce la carga respecto a H:

$$\overline{M, \vec{P}} = \overline{r_{H, \vec{P}}} \times \vec{P}$$

La carga P con las componentes:

$$\vec{P} = 0 \vec{i} - P \vec{j}$$

Luego:

$$\overline{M, \vec{P}} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ B \cdot \cos \beta_1 + (S + A) \cdot \cos \beta_2 & B \cdot \sin \beta_1 + (S + A) \cdot \sin \beta_2 & 0 \\ 0 & -P & 0 \end{bmatrix}$$

$$\overline{M, \vec{P}} = -P \cdot [B \cdot \cos \beta_1 + (S + A) \cdot \cos \beta_2] \vec{k}$$

- Momento que ejerce la fuerza del actuador que acciona el brazo respecto a H:

$$\overline{M, FBB} = \overline{r_{H, BB}} \times \overline{FBB}$$

La fuerza FBB tiene las componentes:

$$\overline{FBB} = FBB \cdot \left[\frac{r_{O, BB_x}}{\|r_{O, BB}\|} \vec{i} + \frac{r_{O, BB_y}}{\|r_{O, BB}\|} \vec{j} \right]$$

De manera que el momento generado por el actuador respecto al punto C es:

$$\overline{M, FBB} = \det \begin{bmatrix} i & j & k \\ b3 \cdot \cos \beta_1 + b4 \cdot \sin \beta_1 & b3 \cdot \sin \beta_1 - b4 \cdot \cos \beta_1 & 0 \\ FBB \cdot \frac{r_{O, BB_x}}{\|r_{O, BB}\|} & FBB \cdot \frac{r_{O, BB_x}}{\|r_{O, BB}\|} & 0 \end{bmatrix}$$

De nuevo, a partir del determinante de la matriz obtenemos el momento, en este caso:

$$\overline{M, FBB} = \left[[b3 \cdot \cos \beta_1 + b4 \cdot \sin \beta_1] \cdot FBB \cdot \frac{r_{O, BB_x}}{\|r_{O, BB}\|} - [b3 \cdot \sin \beta_1 - b4 \cdot \cos \beta_1] \cdot FBB \cdot \frac{r_{O, BB_x}}{\|r_{O, BB}\|} \right] \vec{k}$$

Y de satisfacer la condición de equilibrio de momentos se obtiene el valor de la fuerza que ejerce el actuador que acciona el brazo:

$$\sum M_H = M, P + M, FBB = 0$$

5.3.4 Equilibrio de fuerzas.

Una vez conocido el valor de FBB, por equilibrio de fuerzas pueden determinarse las reacciones en el punto H (articulación del hombro):

$$\vec{P} + \overrightarrow{FBB} + \overrightarrow{FH} = 0$$

Es decir:

$$\begin{bmatrix} 0 & FBBx & FHx \\ -P & FBBy & FHy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{bmatrix} = 0$$

5.3.5 Momento flector en la sección.

Halladas FHx y FHy, puede determinarse el diagrama de momentos en el brazo pues, se conocen las fuerzas que actúan en C y en el enganche AB, calculadas anteriormente para el antebrazo y cuyo valor, en módulo, es igual para el brazo aunque vectorialmente con sentido contrario. Por tanto, conocidas todas las fuerzas actuantes sobre el elemento del brazo, se rotan al sistema local del mismo.

El diagrama de momentos puede obtenerse por equilibrio en los diferentes puntos del elemento. Avanzando desde el punto H (articulación del hombro):

- $M(H) = 0$
- $M(AB^-) = -f_{H,y} \cdot b_1$
- $M(AB^+) = -f_{H,y} \cdot b_1 - f_{AA,x} \cdot b_2$
- $M(BB^-) = -f_{H,y} \cdot b_3 - f_{AA,x} \cdot b_2 - f_{AA,y} \cdot (b_3 - b_1)$
- $M(BB^+) = -f_{H,y} \cdot b_3 - f_{AA,x} \cdot b_2 - f_{AA,y} \cdot (b_3 - b_1) - f_{BB,x} \cdot b_4$
- $M(C) = -f_{H,y} \cdot B - f_{AA,x} \cdot b_2 - f_{AA,y} \cdot (B - b_1) - f_{BB,x} \cdot b_4 - f_{BB,y} \cdot (B - b_4) = 0$

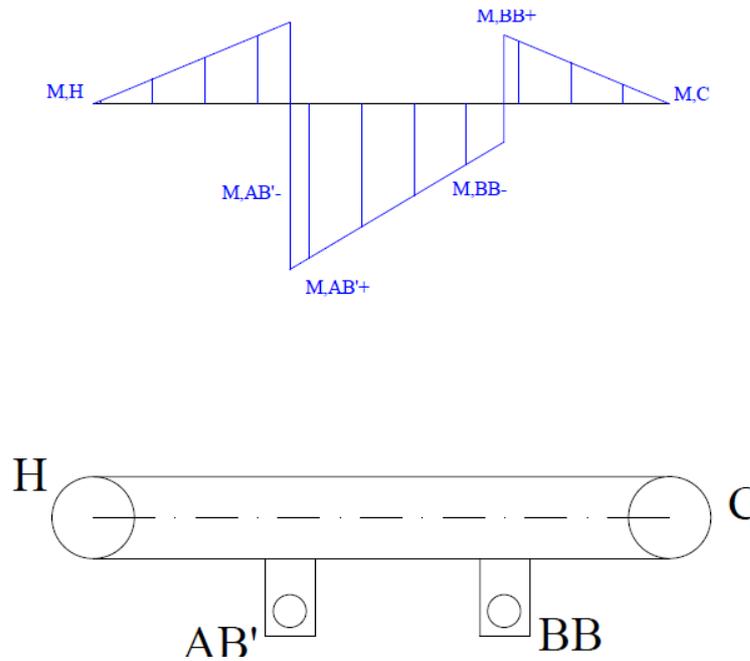


Figura 43. Forma del diagrama de momento flector para el brazo en su posición más desfavorable.

5.4 Longitud del actuador.

Una vez obtenidas las fuerzas actuantes sobre el elemento y el diagrama de momento correspondiente, otro aspecto importante es la longitud de los actuadores. Este parámetro resultará fundamental a la hora de seleccionar el actuador adecuado, bien se diseñe específicamente para la aplicación o bien se adquiera uno en el mercado. Teniendo en cuenta las limitaciones en los movimientos de los elementos definidas en el apartado de la memoria “Estudio Antropométrico y limitaciones del movimiento”, las posiciones extremas marcan las longitudes máximas y mínimas que debe tener el actuador.

Así pues, y tras el análisis vectorial resulta fácil determinar estas longitudes.

- Para el caso del antebrazo, la longitud del actuador toma el valor del módulo del vector r_{AB-AA} para el caso del accionamiento anterior, y $r_{AB'-AA'}$ para el caso del accionamiento posterior. Estableciendo el cálculo para las posiciones extremas se determinan las longitudes máxima y mínima, y la carrera necesaria.
- Para el caso del brazo, la longitud del actuador toma el valor del módulo del vector r_{O-BB} , procediendo de manera análoga al caso del antebrazo.

6 Resultados al cálculo analítico.

Todo lo desarrollado en adelante es específico del brazo con accionamiento anterior del antebrazo, habiendo quedado descartado el accionamiento posterior como se explica en el apartado 6.3 más abajo.

6.1 Valores de partida para el cálculo.

Las dimensiones necesarias para el cálculo analítico se definen a continuación. Teniendo en cuenta las medidas establecidas en el apartado “Estudio antropométrico y limitaciones del movimiento” de la memoria, se toman como dimensiones para los cálculos aquellas que resultan más desfavorables.

En cuanto a la posición de las orejas y su altura sobre la línea media de los elementos se ha encontrado como valores óptimos los que figuran en la tabla 8, pues se mantiene suficiente distancia entre orejas para colocar el actuador y su altura sobre el elemento garantiza el suficiente brazo de palanca como para que las fuerzas que dicho actuador debe ejercer no sean excesivamente elevadas. Así pues, las medidas que se plantean en el cálculo son:

Medidas de los elemento del exoesqueleto	
Dimensión	Medida (mm)
B ⁽¹⁾	300
A	250
S	400
a1	600
a2	80
b1	50
b2	80
b3 ⁽²⁾	250
b4	60

OHx	250	Distancia del hombro a los puntos de anclaje del actuador que acciona el brazo en la espalda, no constituyen medidas de un elemento del brazo pero intervienen en el cálculo
OHy	700	
Carga a levantar por el brazo		
Carga máxima admisible para el brazo	441,45 N	45 Kg

Tabla 8. Dimensiones de los elementos y máxima carga a levantar para el cálculo analítico.

(1)Esta medida varía entre los 300 mm y los 350 mm dada la regulación con la que cuenta el brazo. Para el cálculo se toma como valor 300 mm por resultar más desfavorable el estado de cargas sobre el brazo.

(2)Esta medida puede variar entre los 250 mm y los 300 mm debido a la regulación con la que cuenta el brazo. No obstante, se toma para el cálculo el valor de 250 mm por resultar más desfavorable para el cálculo de la fuerza que ejerce el actuador que acciona el brazo.

6.2 Fuerzas máximas que deben ejercer los actuadores.

Su valor es fundamental tanto para el cálculo como para la selección del actuador.

6.2.1 Actuador que acciona el antebrazo desde su cara anterior.

En el caso del antebrazo, si trazamos el valor de la fuerza que ejerce el actuador en función del ángulo del brazo con respecto a la horizontal, para brazo y antebrazo paralelos en todo momento.

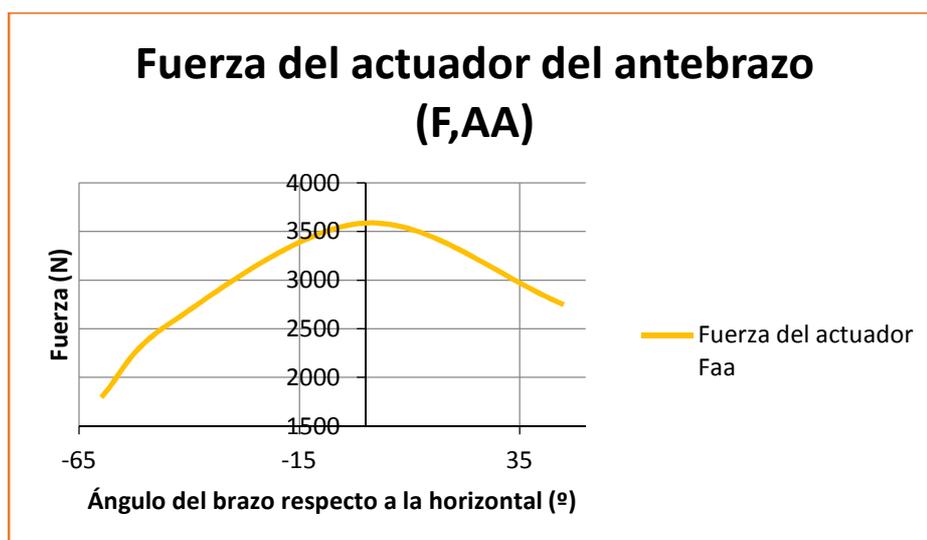


Figura 44. Variación de la fuerza del actuador del antebrazo según la posición del brazo, en extensión completa.

Nótese que la mayor fuerza se da para el brazo y antebrazo coincidentes con la horizontal, en total extensión. En este caso, la fuerza que ejerce el actuador está directamente relacionada con la altura que alcanza la “oreja” a la que se fija sobre la línea media de las piezas debido al brazo de palanca que se requiere para equilibrar las cargas. Se produce una variación sinusoidal de la carga en función del ángulo que forma el brazo con la horizontal.

6.2.2 Actuador que acciona el brazo.

En el caso del brazo, la fuerza es máxima cuando éste se encuentra en su posición más alta y el antebrazo forma un ángulo de 0 grados con respecto al brazo. Si representamos la variación de la fuerza que debe ejercer el actuador cuando los ejes longitudinales de ambos elementos, brazo y antebrazo, coinciden, la fuerza es máxima en la posición más elevada y disminuye por debajo de la horizontal.

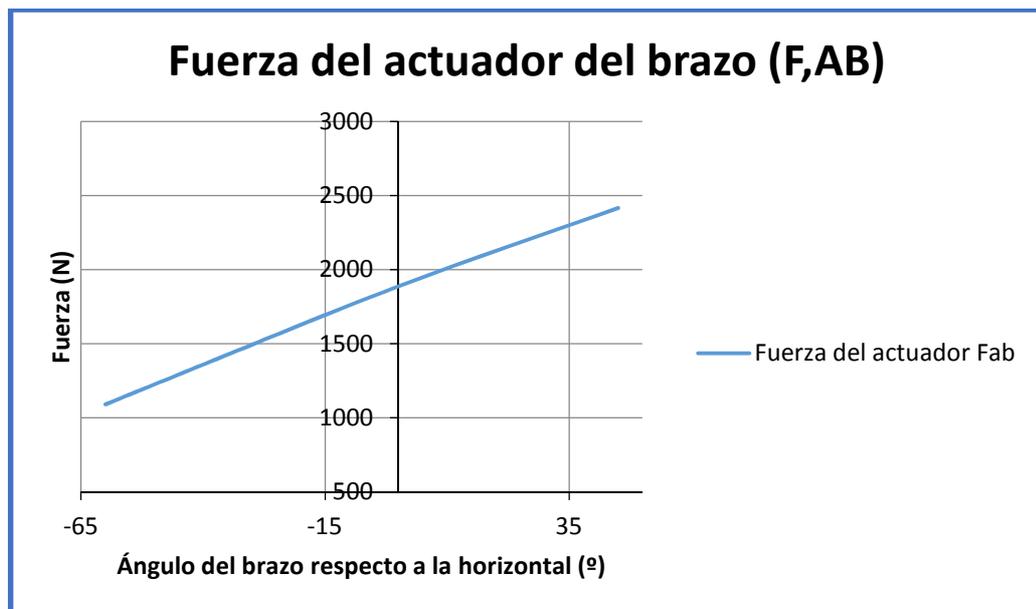


Figura 45. Variación de la fuerza del actuador del brazo según la posición de éste, en extensión completa.

En este caso, la variación de la fuerza con el ángulo que forma el brazo con la horizontal es prácticamente lineal.

6.2.3 Fuerzas y momentos flectores máximos.

Una vez realizado el correspondiente análisis para las distintas posiciones de los elementos, se ha determinado que las fuerzas y momentos flectores máximos que se dan son:

Fuerzas máximas (a desarrollar por los actuadores)	
Actuador	Fuerza (N)
Actuador del antebrazo (Faa)	3586,78
Actuador del brazo (Fab)	2295,09
Momento flector máximo que solicita la sección	
Elemento	Momento flector (N·m)
Antebrazo	264,87
Brazo	238,38

Tabla 9. Fuerzas máximas que deben desarrollar los actuadores durante el uso del brazo y momentos flectores máximos en los elementos.

A partir de los datos de fuerzas se determinarán las características correspondientes para los actuadores de acuerdo con las especificaciones que establece el fabricante para los diferentes modelos de actuador.

6.3 Longitudes y carreras de los actuadores.

Mediante el análisis desarrollado en este anexo ha podido determinarse, para el conjunto de movimientos descrito entre las 11 posiciones mostradas en la tabla 13, las longitudes máximas, mínimas y las carreras necesarias para los actuadores.

Dimensiones de los actuadores					
	Longitud mínima entre puntos de anclaje (mm)	Longitud máxima entre puntos de anclaje (mm)	Carrera efectiva (mm)	Carrera real necesaria para el actuador⁽¹⁾ (mm)	Longitud del actuador retraído (mm)
Actuador antebrazo, accionamiento anterior	565	900	335	370	530 (370+160) Carrera+cuerpo actuador

Actuador antebrazo, accionamiento posterior	206	403	197	Sin especificar ⁽²⁾	Sin especificar ⁽²⁾
Actuador brazo	538	993	455	416,5	576,5 (416,5+160) Carrera+cuerpo actuador

Tabla 10. Dimensiones requeridas para los actuadores.

⁽¹⁾La carrera real necesaria tiene en cuenta que la dimensión del actuador retraído es la diferencia entre la longitud máxima y mínima más una cierta cantidad (160mm) especificada por el fabricante.

⁽²⁾No se especifica el valor puesto que no hay espacio suficiente para colocar el actuador.

La longitud máxima y mínima corresponde a la distancia entre puntos de enganche del actuador. La carrera efectiva está dada por la diferencia entre ambas longitudes. No obstante, para la carrera real del actuador debe tenerse en cuenta que la longitud de éste retraído es de 160 mm (establecidos por el fabricante) más la carrera necesaria. Así, la carrera se calcula como:

$$Carrera = Longitud\ máxima - Longitud\ del\ actuador\ retraído$$

Y la longitud del actuador retraído:

$$Longitud\ del\ actuador\ retraído = 160\ mm + Carrera$$

Combinando estas expresiones pueden obtenerse tanto la carrera como la longitud del actuador retraído. Nótese que para el antebrazo, en su posición de contracción (90° respecto al brazo), el actuador no se encuentra en total retracción, con lo que la carrera real que ejerce el actuador en el movimiento es la diferencia entre la distancia máxima y mínima. De manera análoga, para el caso del brazo, en su posición más baja el actuador ocupa algo más de lo calculado, con lo que el brazo no alcanzará los 60° por debajo de la horizontal sino algo menos.

Llegados a este punto, y a la vista de las longitudes de los actuadores, sea ha descartado el accionamiento posterior del antebrazo al no disponer de espacio suficiente para la instalación del mismo.

6.4 Aceleraciones, velocidades y tiempos de actuación.

6.4.1 Aceleraciones en el brazo.

Con el fin de justificar el cálculo de los elementos desde la estática, se determinan las posibles aceleraciones que en ellos pudieran darse, con el fin de demostrar que su efecto es despreciable.

A continuación, se determinan las aceleraciones pésimas que experimentan el brazo y antebrazo.

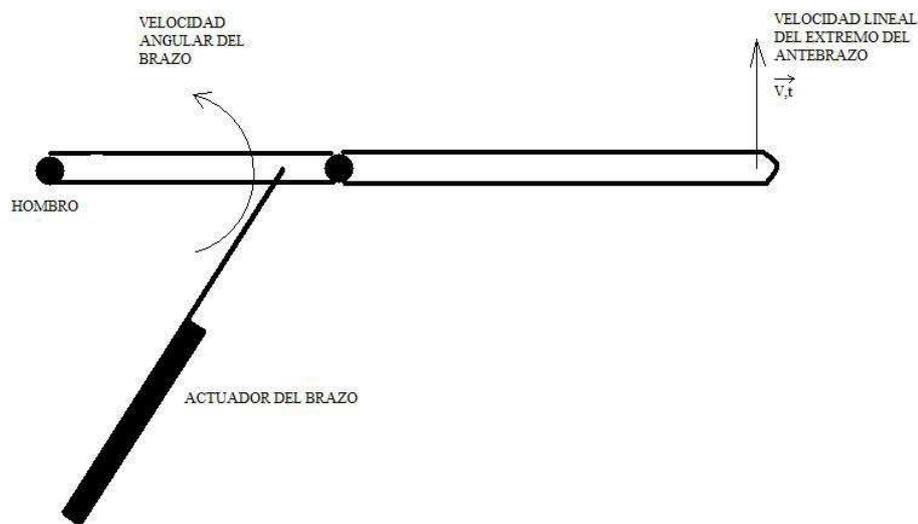


Figura 46. Esquema del brazo en completa extensión en su movimiento.

En primer lugar, se calcularán las velocidades de los elementos y las posibles aceleraciones que en ellos se dan, para justificar que el cálculo estático de estos es suficiente para su dimensionado. Hay que tener en cuenta que la velocidad del actuador es prácticamente constante en el rango de cargas que es capaz de mover, tal como puede comprobarse en el anexo del catálogo del mismo.

Para el actuador seleccionado, cuya velocidad es de 13 mm/s puede plantearse lo siguiente. Primeramente, la longitud del elemento del antebrazo permanece constante (pues el ajuste al usuario se lleva a cabo a través del soporte del mismo), pero no ocurre lo mismo con el brazo, cuya longitud varía entre los 300 mm y los 350 mm. A estos efectos, se considera la longitud del brazo en los 300 mm para los siguientes cálculos. Entonces, el punto donde engancha el actuador se encuentra a 250 mm del hombro. Siendo así, el punto BB (oreja donde se engancha el actuador que acciona el brazo), tiene la misma velocidad que el actuador, es decir, 13mm/s. Debe tenerse en cuenta que esta velocidad corresponde a la del actuador,

según el vector velocidad que tiene la dirección del mismo, con lo que la velocidad tangencial del brazo en ese punto no coincide exactamente con esos 13 mm/s salvo que el eje del actuador se encuentre perpendicularmente a la línea media del brazo. No obstante, para los cálculos, y por simplicidad, se considerará que la velocidad tangencial en tal punto coincide con la del actuador, con lo que el elemento del brazo giraría a una velocidad angular de:

$$\omega_{brazo} = \frac{13 \frac{mm}{s}}{250 mm} = 0,052 \frac{rad}{s} = 0,50 rpm$$

Considérese la siguiente situación: el brazo rota respecto al hombro sin rotación del antebrazo respecto al codo. En este caso, la velocidad angular es idéntica para brazo y antebrazo, pues no hay movimiento relativo entre ambos. Siendo así, la velocidad tangencial del extremo donde se engancha la carga sería:

$$v_{extremo} = \omega_{brazo} \cdot (300 + 650)mm$$
$$v_{extremo} = 0,052 \frac{rad}{s} * 950 = 49,40 \frac{mm}{s}$$

Ahora, suponiendo que se requiere pasar desde el reposo a esa velocidad en 0,5 segundos, la aceleración tangencial que se daría sería:

$$a_{t,extremo} = \frac{49,40 \frac{mm}{s}}{0,5 s} = 98,8 \frac{mm}{s^2} = 0,0988 \frac{m}{s^2}$$

Puede comprobarse que la aceleración es muy baja, especialmente en comparación con la aceleración de la gravedad. Ahora, si añadimos también la aceleración normal:

$$a_{n,extremo} = \omega^2 * 950mm = \left(0,052 \frac{rad}{s}\right)^2 * 0,950m = 0,003 \frac{m}{s^2}$$

Nótese que la componente normal de la aceleración es despreciable.

Ahora, si se considera que el centro de gravedad del conjunto (brazo, antebrazo, soporte del antebrazo, pala, actuador y carga) se encontrase en el extremo donde se engancha la carga, en el peor de los casos, con una masa total de la carga y el conjunto de elementos de 60 kg, dada la aceleración se produciría una fuerza adicional de:

$$F_{dinámica} = 60 kg * 0,0988 \frac{m}{s^2} = 5,93 N$$

Puede comprobarse que la carga dinámica que introduce la aceleración es despreciable en comparación al peso de los elementos por acción de la gravedad, que se sitúa en 589 N. Realmente, la velocidad de rotación del brazo varía ligeramente dependiendo de la posición, dada cierta variación sinusoidal en función del ángulo que forma el actuador con el brazo, tal como se explica en el siguiente apartado (6.4.2). Aún así, para las mayores velocidades las aceleraciones son, en el peor de los casos, despreciables en comparación a la acción de la gravedad.

6.4.2 Velocidad estimativa de actuación.

Dada la velocidad de los actuadores, se establece la siguiente velocidad de elevación de la carga:

Velocidad estimativa de elevación de la carga			
		Velocidad angular del conjunto brazo-antebrazo (rotación respecto al hombro)	Velocidad lineal del extremo donde se engancha la carga
Actuador DC	Elevación de la carga con los brazos totalmente extendidos.	0,05 rad/s -0,48 rpm	48 mm/s

Tabla 11. Velocidades medias para la elevación de la carga.

Esta velocidad es estimativa ya que para su cálculo se ha supuesto que, si el actuador (que se desplaza a velocidad constante) tarda 32 segundos en recorrer toda su carrera, para lo cual el brazo realiza un giro de 100° desde su posición inferior hasta su posición más alta, se tiene la velocidad angular media mostrada en la figura anterior, es decir:

$$\omega_{brazo} = \frac{100^\circ * \frac{2\pi}{360^\circ}}{32 \text{ seg}} = 0,05 \text{ rad/s}$$

En realidad, la velocidad de rotación del brazo respecto al hombro puede variar, ya que se da un efecto sinusoidal dependiendo del ángulo que forma el actuador con éste. Por ejemplo, y siguiendo el cálculo analítico desarrollado en este anexo, si el brazo pasa de los 30° sobre la horizontal hasta los 40° sobre la horizontal, el actuador recorre una carrera de unos 26 mm. Siendo esto así, el actuador tardaría 2 segundos (13mm/s de velocidad del actuador) en

recorrer esa distancia. Puesto que en esos 2 segundos se recorren 10 grados (0,17 radianes) se habrían recorrido 5 grados (0,085 radianes) en un segundo, una velocidad angular superior a la media calculada. No obstante, el ejemplo anterior supone uno de los puntos más desfavorables, entendiéndose aquel en el que la relación ángulo girado-carrera del actuador recorrida es mayor dentro del recorrido total del brazo, con lo que no es de esperar velocidades mayores.

6.4.3 Tiempos de actuación.

Dadas las carreras que deben recorrer los actuadores, tal como se muestran en el apartado 6.3 de este anexo, se establecen los siguientes tiempos de actuación para el brazo:

Tiempos de actuación para los movimientos del brazo (segundos)	
	Actuador ALI4 DC (velocidad de 13 mm/s)
Elevación del brazo en total extensión desde su posición más baja (60° por debajo de la horizontal) hasta su posición más alta (40° sobre la horizontal)	32,0
Retracción del antebrazo desde los 0° hasta los 90° con respecto al brazo	25,7

Tabla 12. Tiempos de actuación para el brazo.

Para el cálculo de los tiempos se ha empleado la carrera que ejerce el actuador, en el caso del antebrazo 335 mm, correspondiente a la carrera efectiva, en el caso del brazo 416,5 mm correspondiente a la carrera real del actuador.

6.5 Estado de cargas en los elementos.

El presente apartado se muestra únicamente para la disposición del actuador con el accionamiento anterior del antebrazo, habiendo quedado la otra opción descartada por limitaciones de espacio como se indicó en el apartado 6.3 de este anexo.

Si bien el correspondiente análisis de tensiones se llevará a cabo a través de un programa de elementos finitos, es necesario conocer las hipótesis de carga a las que se verán sujetos brazo y antebrazo para, posteriormente, trasladarlas a la simulación. Por ello, se hace necesario estudiar el brazo en diferentes posiciones, de manera que puedan determinarse las cargas que actúan sobre los elementos en cada una de ellas y así establecer las peores condiciones para los mismos.

Así pues, se han analizado 11 posiciones diferentes para distintas combinaciones de posiciones de brazo y antebrazo. Téngase en cuenta que las limitaciones al movimiento están situadas entre 40° y -60° respecto a la horizontal para el brazo y para posiciones del antebrazo entre los 0° y los 90° respecto al brazo (con el antebrazo sin sobrepasar la vertical en ningún caso). Para las 11 posiciones analizadas se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 13. Posteriormente, mediante un programa de elementos finitos se dimensionarán y calcularán las distintas partes del brazo basándose en estas hipótesis de carga, para los casos más desfavorables. Para el estado de cargas número 7 se indican además las componentes de las fuerzas en X e Y del sistema global, ya que resulta el estado de cargas más desfavorable.

7 Soldadura y pernos.

Los elementos que conforman el brazo y el antebrazo estarán unidos mediante soldadura. En este apartado se justifica la dimensión de los cordones de soldadura adoptados. Asimismo, se establece el cálculo de los pernos empleados tanto para la unión de los actuadores como para la fijación de la rótula del codo.

7.1 Soldaduras a tope.

Las soldaduras a tope no requieren cálculo, pues su resistencia se considera igual a la menor de la de las piezas a unir.

7.2 Soldaduras en ángulo.

Para su cálculo se procede según lo dispuesto en el libro “Elementos de máquinas”, G. Niemann. Así pues:

Todas las soldaduras en ángulo se disponen con una garganta de 4 mm. De este modo, únicamente resulta necesario efectuar la comprobación para el peor estado de cargas. La peor combinación de cargas se da para el caso del antebrazo, donde la fuerza de compresión y el momento flector resultan, en la posición más desfavorable:

- Fuerza máxima de compresión: 3586,78 N.
- Momento flector máximo: 264,87 N·m.

A estos efectos se ha descartado el corte, pues su efecto es menor. Teniendo en cuenta las dimensiones del perfil circular empleado, tal como se muestra en el plano 1.03 “Antebrazo”, la tensión actuante sobre el cordón de soldadura debida a compresión viene dada por:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{a \cdot l} = \frac{3586,78 \text{ N}}{4 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 42,4 \text{ mm}} = 6,73 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Donde “a” es la garganta del cordón y “l” su longitud.

Además, debido a flexión:

$$\sigma_M = \frac{Mf}{W_z} = \frac{264870 \text{ N} \cdot \text{mm}}{6273,2 \text{ mm}^3} = 42,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Donde “Wz” es el módulo resistente a flexión del cordón de soldadura.

Así, la tensión resultante sobre el cordón:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_M^2} = \sqrt{6,73^2 + 42,22^2} = 42,75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

La tensión resistente del cordón se puede obtener como:

$$\sigma_{res} = v \cdot v_2 \cdot \sigma_{adm}$$

Donde “v” y “v2” son coeficientes reductores que dependen del tipo de unión, de las sollicitaciones de la unión, y de la resistencia de la soldadura. En este caso se consideran cargas estáticas con calidad normal y soldadura en ángulo. Asimismo, “ σ_{adm} ” representa la tensión admisible para el material de soldadura. Puesto que dicho material no deberá tener en ningún caso una resistencia menor a la de las piezas a unir, se considera como tensión admisible el límite elástico del material de los tubos (235 MPa). Por lo tanto:

$$\sigma_{res} = 0,65 \cdot 0,5 \cdot 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 76,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Finalmente, puede comprobarse que la tensión resistente de los cordones es superior a la sollicitación sobre los mismos para el peor de los casos.

7.3 Pernos.

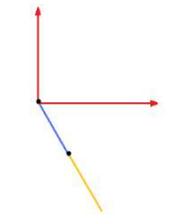
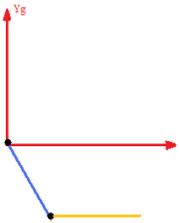
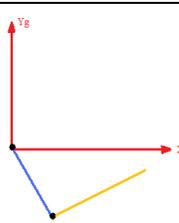
Los pernos a disponer en las diferentes articulaciones (hombro, codo y orejas de enganche de la pala y los actuadores) deben soportar el esfuerzo cortante al que se ven sometidos. Los pernos trabajan con dos secciones de corte y tienen un diámetro mínimo de 12 mm. Así, teniendo en cuenta la carga más desfavorable (3586,78 N), dada para las orejas en las que engancha el actuador que acciona el antebrazo, y teniendo en cuenta una calidad mínima de 5.6 para los pernos (límite elástico de los pernos de 300 N/mm²), el esfuerzo al que se ven sometidos:

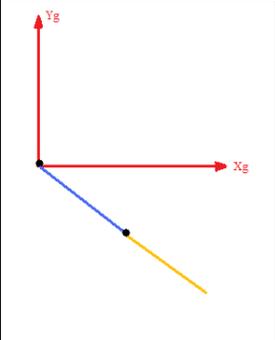
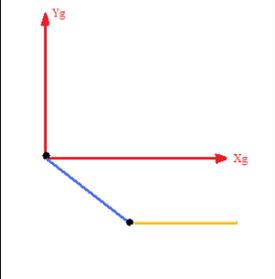
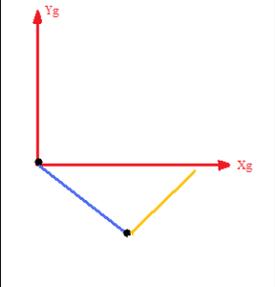
$$\tau = \frac{3586,78 \text{ N}}{2 * \frac{\pi}{4} \cdot (12\text{mm})^2} = 15,86 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

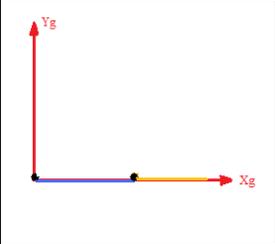
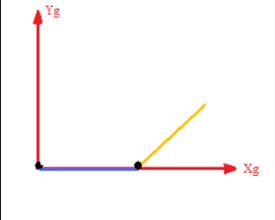
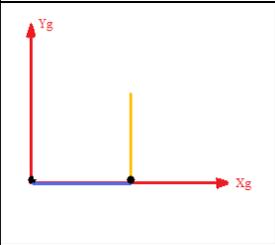
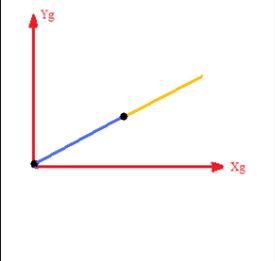
Si se toma como tensión admisible a corte (según criterio de Von Mises):

$$\tau_{adm} = \frac{300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3}} = 173,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Se comprueba que el esfuerzo al que se someten los pernos es muy bajo en comparación al esfuerzo admisible de éstos. Para el resto de pernos el esfuerzo será menor, bien por disponerse mayor diámetro (como en el caso del codo o el bulón que regula la longitud del brazo con 16 mm de diámetro) o bien por ser menores las fuerzas que actúan.

Posición	Esquema	Ángulo del brazo respecto a la horizontal (°)	Ángulo del antebrazo respecto a la horizontal (°)	Fuerza en el actuador del brazo (N)	Fuerza en el actuador del antebrazo (N)	Fuerza en el codo (N)	Fuerza en el hombro (N)
1		-60	-60	1035,45	1793,39	1428,24	722,80
2		-60	0	1743,93	1230,41	1194,33	1407,87
3		-60	30	1554,09	946,72	1124,04	1221,69

4		-45	-45	1226,33	2536,23	2245,88	923,61
5		-45	0	1573,89	1412,14	1389,02	1259,60
6		-45	45	1226,33	772,99	1049,35	923,61

7		0	0	1792,63 Fab,x=1103,63 Fab,y=1412,64	3586,78 Faa,x=3586,78 Faa,y=0	3613,84 Fc,x=3586,78 Fc,y=441,45	1470,10 Fh,x=1103,63 Fh,y=971,19
8		0	45	1433,38	998,53	1293,00	1119,02
9		0	90	566,09	0	441,45	348,54
10		40	40	2295,08	2747,63	3050,19	1927,82

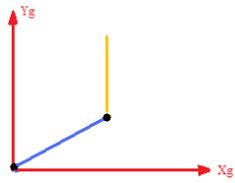
11		40	90	724,76	0	441,45	410,92
----	---	----	----	--------	---	--------	--------

Tabla 13. Estado de cargas en los elementos para diferentes posiciones del brazo. En azul el brazo, en amarillo el antebrazo.

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Anexo II: Simulación

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Anexo II: Simulación

1	Introducción	88
2	Hipótesis de cálculo para el modelo.....	88
3	Modelo en fibra de carbono.	91
3.1	Consideraciones iniciales.....	91
3.2	Antebrazo.....	92
3.2.1	Componentes.....	93
3.2.2	Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.....	94
3.2.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	95
3.2.3.1	Tensiones.....	96
3.2.3.2	Desplazamientos.....	96
3.2.4	Estudio de pandeo.....	97
3.3	Brazo.....	99
3.3.1	Componentes.....	100
3.3.2	Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.....	101
3.3.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	102
3.3.3.1	Tensiones.....	103
3.3.3.2	Desplazamientos.....	103
3.3.4	Estudio de pandeo.....	104
4	Modelo en metal con rótulas macizas.	106
4.1	Piezas auxiliares para el estudio.	106
4.2	Antebrazo.....	107
4.2.1	Componentes.....	108
4.2.2	Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.....	109
4.2.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	111
4.2.3.1	Tensiones.....	112

4.2.3.2	Desplazamientos.....	112
4.2.4	Estudio de pandeo.....	113
4.3	Brazo.....	115
4.3.1	Componentes.....	116
4.3.2	Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.....	118
4.3.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	120
4.3.3.1	Tensiones.....	120
4.3.3.2	Desplazamientos.....	121
4.3.4	Estudio de pandeo.....	122
5	Brazo y antebrazo metálicos optimizados.....	123
5.1	Antebrazo.....	124
5.1.1	Componentes.....	124
5.1.2	Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.....	126
5.1.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	127
5.1.3.1	Tensiones.....	128
5.1.3.2	Desplazamientos.....	128
5.1.4	Estudio de pandeo.....	129
5.2	Brazo.....	131
5.2.1	Componentes.....	132
5.2.2	Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.....	134
5.2.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	136
5.2.3.1	Tensiones.....	136
5.2.3.2	Desplazamientos.....	138
5.2.4	Estudio de pandeo.....	138
6	Soporte del antebrazo.....	140
6.1	Componentes.....	141
6.2	Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.....	144

6.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	144
6.3.1	Tensiones.....	145
6.3.2	Desplazamientos.....	146
6.4	Estudio de pandeo.....	146
7	Pala.....	148
7.1	Componentes.....	148
7.2	Condiciones de contorno y de cargas aplicadas al modelo.....	149
7.3	Estudio estático de tensiones y deformaciones.....	149
7.3.1	Tensiones.....	150
7.3.2	Desplazamientos.....	151

1 Introducción

El presente anexo justifica el dimensionamiento y análisis de las piezas que conforman el brazo del exoesqueleto. Para el análisis se ha empleado el módulo de simulación de elementos finitos del software SolidWorks 2013.

En los siguientes apartados se muestran las hipótesis de carga, las condiciones de contorno aplicadas y los resultados obtenidos para los distintos modelos estudiados.

2 Hipótesis de cálculo para el modelo.

Para llevar a cabo las simulaciones, resulta fundamental establecer correctamente las hipótesis de cargas, restricciones y condiciones del modelo. Téngase en cuenta que la potencia de cálculo computacional está sujeta a las limitaciones del ordenador, en lo que a memoria y procesador se refieren. Es por ello, que se hace necesario simplificar el modelo, para liberar de carga a la computadora. Así, se ha decidido analizar el brazo, el antebrazo, el soporte para el antebrazo y la pala por separados. Este hecho implica la necesidad de adecuar las condiciones al modelo para que los resultados sean lo más realistas posibles; limitando los grados de libertad del modelo a los que dispone en la realidad, estableciendo las cargas adecuadas en las distintas partes del mismo y aplicando las restricciones que simulan el comportamiento de las diferentes partes en su uso real.

Así pues, a continuación se indican las condiciones aplicadas a cada modelo:

- Brazo: para llevar a cabo la simulación del brazo, como elemento separado del modelo, se han supuesto restricciones en el hombro y en las orejas inferiores a las que se acopla el actuador del brazo. Así, se asume que en el hombro existe una articulación que fija todo el brazo a la espalda, considerándose que dicha articulación es suficientemente rígida como para limitar los desplazamientos del brazo tanto en la horizontal como en la vertical en ese punto, pero permitiendo siempre los giros. Las orejas superiores a las cuales se fija el actuador para el antebrazo y las orejas de la articulación del codo no tienen restricciones externas, de manera que se asume que, ante las cargas, estas pueden desplazarse. Así, en ellas se aplicarán las cargas derivadas del estudio analítico. Además, el momento torsor que solicita la sección, dada la excentricidad de la carga sobre la pala, se aplica a las orejas del codo, a las cuales es transmitido por el bulón que une el brazo

y antebrazo. Por último, resulta indispensable aplicar una restricción más al modelo, a fin de evitar que se comporte como un mecanismo. Las orejas inferiores, a las cuales se fija el actuador del brazo, se simulan como articulaciones impidiendo los desplazamientos pero no los giros, bajo la hipótesis de que el actuador tiene la suficiente rigidez como para no deformarse en exceso en su eje longitudinal ante las cargas presentes. De esta manera el modelo queda completamente definido para su análisis.

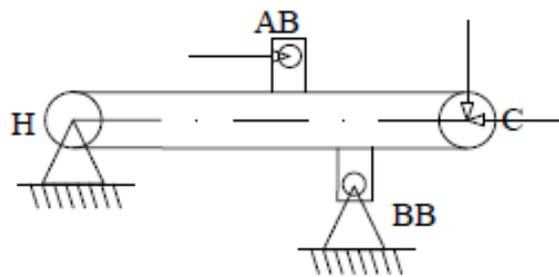


Figura 47. Esquema de cálculo para el brazo.

- Antebrazo: para llevar a cabo la simulación del antebrazo, como elemento separado del modelo, se han supuesto restricciones tanto en la articulación del codo como en las orejas del actuador, aplicando las cargas sobre las orejas a las cuales se fija la pala. Para el caso del codo, este se comporta como una articulación, permitiendo los giros pero no los desplazamientos, bajo la hipótesis de que, en este punto, el elemento del brazo al cual se une el antebrazo es lo suficientemente rígido como para que los desplazamientos no sean significativos. Así, el codo se supone como un punto intraslacional en el cual se permite las rotaciones. La carga se aplica directamente a las orejas donde se engancha la pala por medio de un bulón, tal y como se daría en el modelo real y teniendo en cuenta la excentricidad de ésta con respecto a la línea media del elemento del antebrazo, pues se genera torsión. Finalmente, es necesario restringir el modelo en algún punto más, para evitar que se comporte como un mecanismo. Para ello, se supone la reacción que ejercería el actuador con el fin de equilibrar el sistema, siempre en la dirección longitudinal del elemento. Por tanto, se restringe el desplazamiento

según el eje longitudinal de la pieza en las orejas dónde se acopla el actuador, no impidiendo cualquier otro desplazamiento o giro.

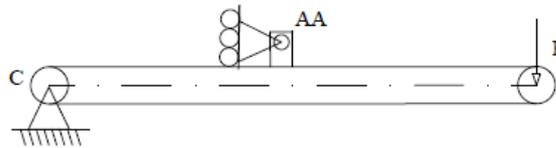


Figura 48. Esquema de cálculo para el antebrazo.

- Soporte para el antebrazo: para llevar a cabo la simulación del soporte del antebrazo, como elemento separado del modelo, se ha supuesto las siguientes condiciones. En cuanto a las restricciones, dado que el conjunto se une por medio de roscas a la articulación del codo, se ha aplicado una restricción de empotramiento a las guías en los extremos en los que se efectúa dicha unión. Nótese que la unión roscada impide los desplazamientos en cualquier dirección, y si bien el giro está limitado a parámetros como el coeficiente de rozamiento de la rosca, el par de apriete o los elementos de retención, en el modelo real esta condición se impedirá de manera adecuada. Asimismo, las cargas quedan aplicadas directamente sobre toda la superficie de apoyo del reposabrazos.

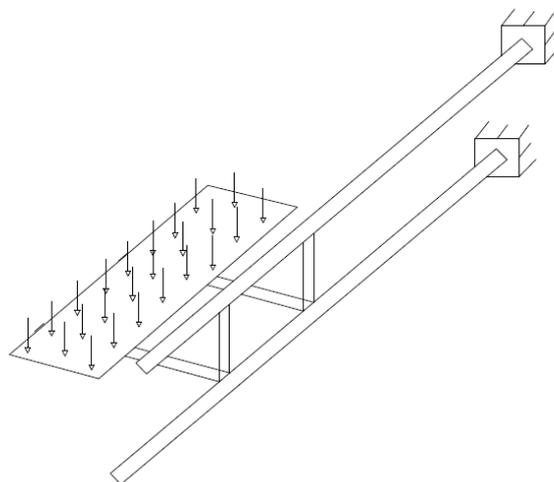


Figura 49. Esquema de cálculo para el soporte del antebrazo.

- Pala: para la simulación de la pala como elemento separado del modelo, se ha supuesto como restricción una articulación en el agujero por el cual se fija al antebrazo mediante un bulón. Así, se impiden los desplazamientos pero no los

giros. En cuanto a las cargas, se ha aplicado ésta sobre la superficie en la que reposaría la caja, distribuida uniformemente.

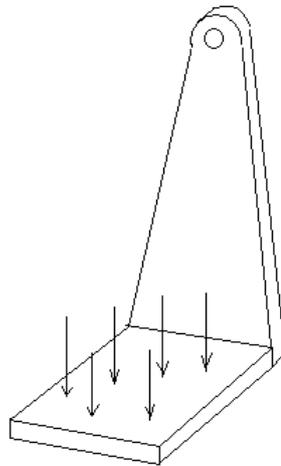


Figura 50. Esquema de cálculo para la pala.

En los siguientes apartados se analizan los diferentes modelos, tanto en fibra de carbono como en metal. Para los elementos del brazo y antebrazo se estudia el estado de cargas correspondiente a la posición 7 de la tabla 13 que figura en el Anexo I “Cálculo Analítico” por resultar la más desfavorable. Para el análisis de la pala se toma como carga la correspondiente a 441,45 N tal como figura en el apartado 6.1 del Anexo I “Cálculo Analítico”. Para la simulación del soporte del antebrazo, se ha supuesto como carga 150 N, con un peso para el brazo de 83 N (según la bibliografía consultada) y aplicado un factor de seguridad de 2. Asimismo, el peso del actuador (3-4 kg) resulta despreciable frente a la magnitud de las cargas que se dan en el brazo y antebrazo.

Se considera, para las simulaciones, la tensión de Von Mises.

3 Modelo en fibra de carbono.

3.1 Consideraciones iniciales.

Antes de realizar los análisis para el modelo en fibra de carbono se deben considerar ciertas hipótesis:

- A efectos de cálculo, el material se supondrá cuasiisotrópico lineal, al estar conformado de varias capas de fibra orientadas en diferentes ángulos.

- Dadas las limitaciones del software, se asume la tensión equivalente de Von Mises como aproximación de los resultados reales, siendo más adecuada las teorías de resistencia a rotura de Tsai-Hill y Tsai-Wu que contemplan la anisotropía del material. Así, podría estudiarse con mayor detalle la posible rotura por compresión o tracción de la fibra, la rotura de la matriz, o la separación de la matriz y la fibra. No obstante, y como se ha indicado, se tomará la tensión de Von Mises como aproximación válida.
- Se ha tomado como valor aceptable de tensión, aquel que contemple un factor de seguridad de 3,7 respecto a la tensión de rotura.

3.2 Antebrazo.

El antebrazo en fibra de carbono está compuesto por tres elementos:

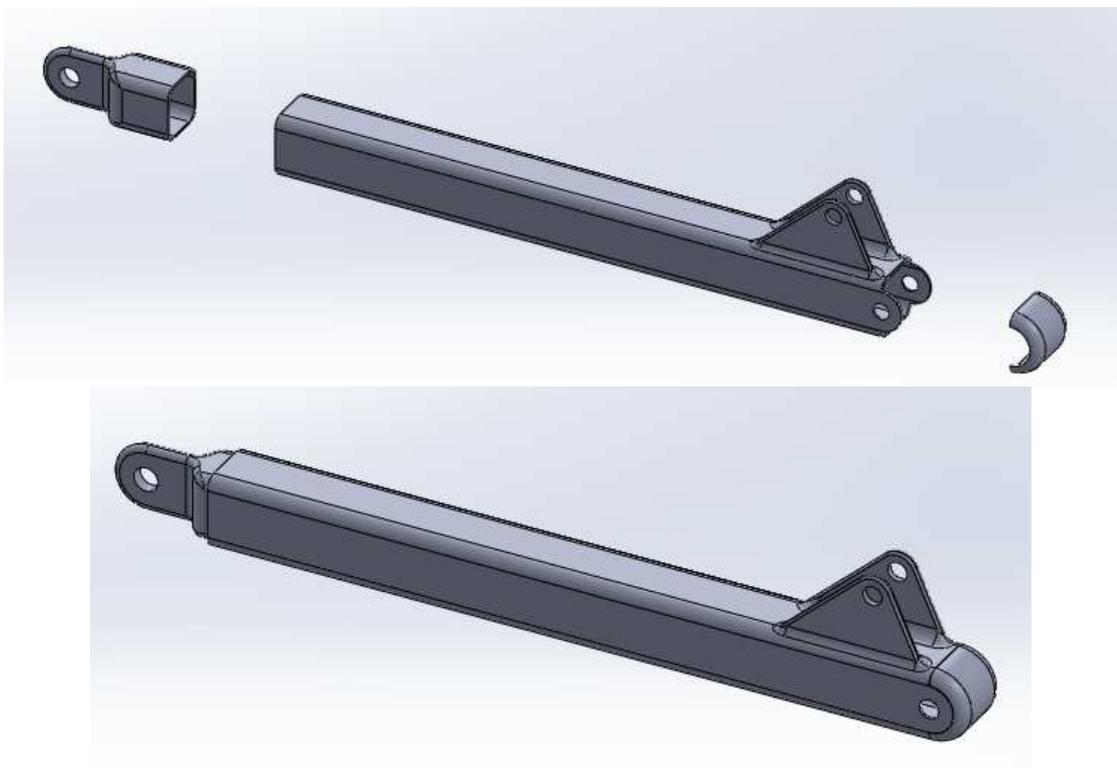
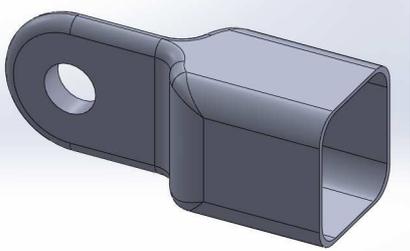
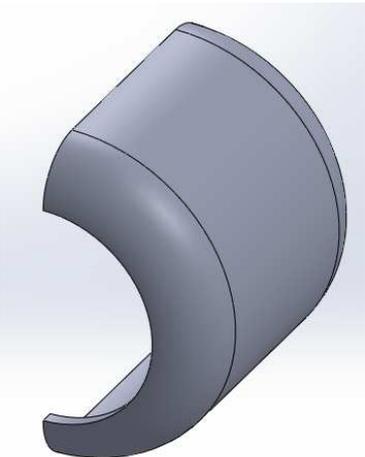


Figura 51. Modelo para la simulación del antebrazo en fibra de carbono.

Los componentes y sus propiedades se detallan a continuación.

3.2.1 Componentes.

Rótula codo antebrazo carbono		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25
Tapa extremo antebrazo		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25

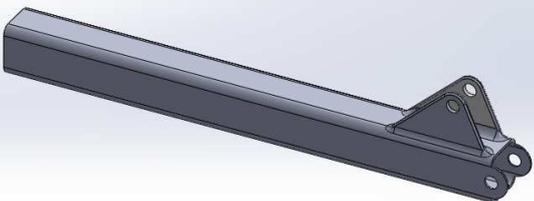
Perfil antebrazo carbono		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25

Tabla 14. Componentes y propiedades mecánicas del modelo de antebrazo en fibra de carbono para la simulación.

3.2.2 Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.

Para llevar a cabo el estudio, se ha supuesto un contacto de unión rígida entre los distintos componentes, pues estos estarán unidos a través de un pegamento que transmite las cargas entre ellos.

Como sujeciones se ha impedido el desplazamiento axial y radial en el agujero de la rótula del codo (en verde), no impidiendo el giro, pues se trata de una articulación.

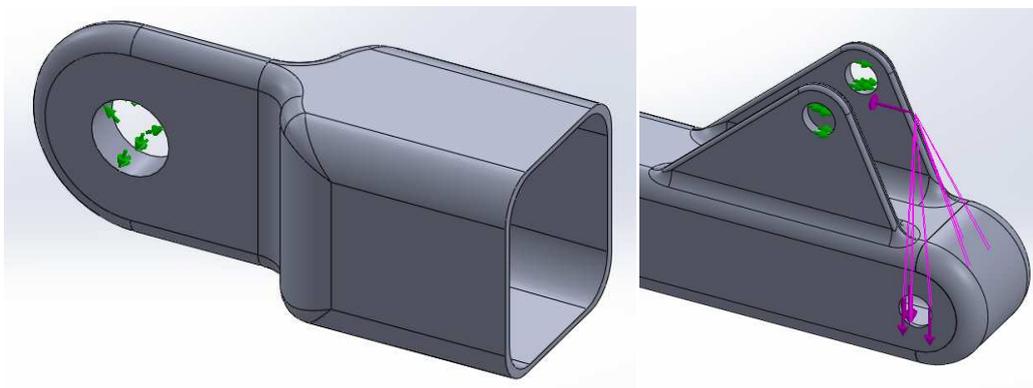


Figura 52. Restricciones y cargas aplicadas al modelo de antebrazo en fibra de carbono. A la izquierda rótula del codo, a la derecha el extremo del antebrazo.

En el extremo libre del antebrazo, con el fin de determinar si el espesor de la pared es suficiente como para soportar las cargas, se han introducido éstas como cargas de apoyo (flechas en magenta) sobre los agujeros en los que iría el bulón y, para tener en cuenta la torsión que la excentricidad de la carga produce, se ha aplicado un momento (en magenta) equivalente en tales agujeros. Así, se pretende incluir en el análisis los efectos de torsión y flexión que se dan. Además, se ha impuesto como restricción sobre los agujeros de las orejas el desplazamiento longitudinal del antebrazo, dirección en la que el actuador ejercería la fuerza para equilibrar el modelo. También se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad (flecha roja).

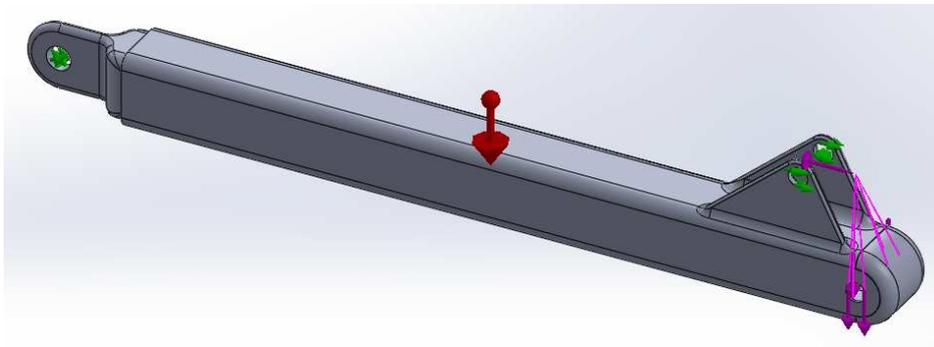


Figura 53. Vista general de las cargas y restricciones aplicadas al modelo de antebrazo en fibra de carbono.

3.2.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Para evaluar la resistencia del modelo y las deformaciones que se producen en él se ha llevado a cabo un estudio empleando una malla fina para elementos sólidos y basada en curvatura.

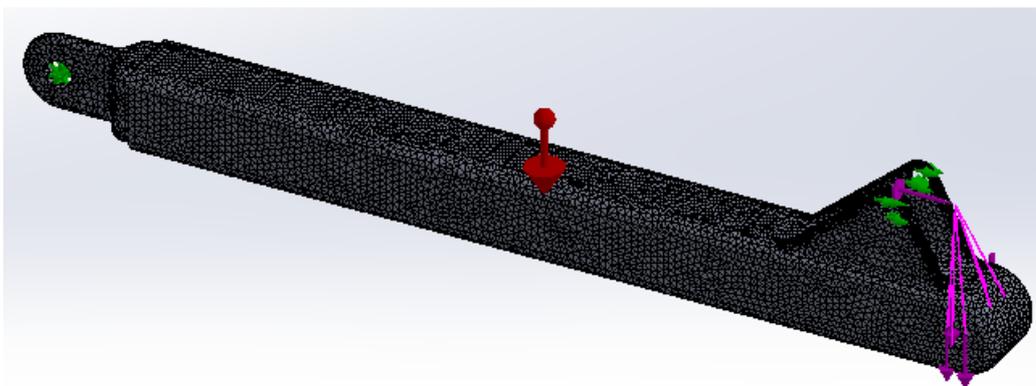


Figura 54. Vista de la malla para el modelo de antebrazo en fibra de carbono.

3.2.3.1 Tensiones.

Tras efectuar el estudio se han obtenido las siguientes tensiones en el modelo.

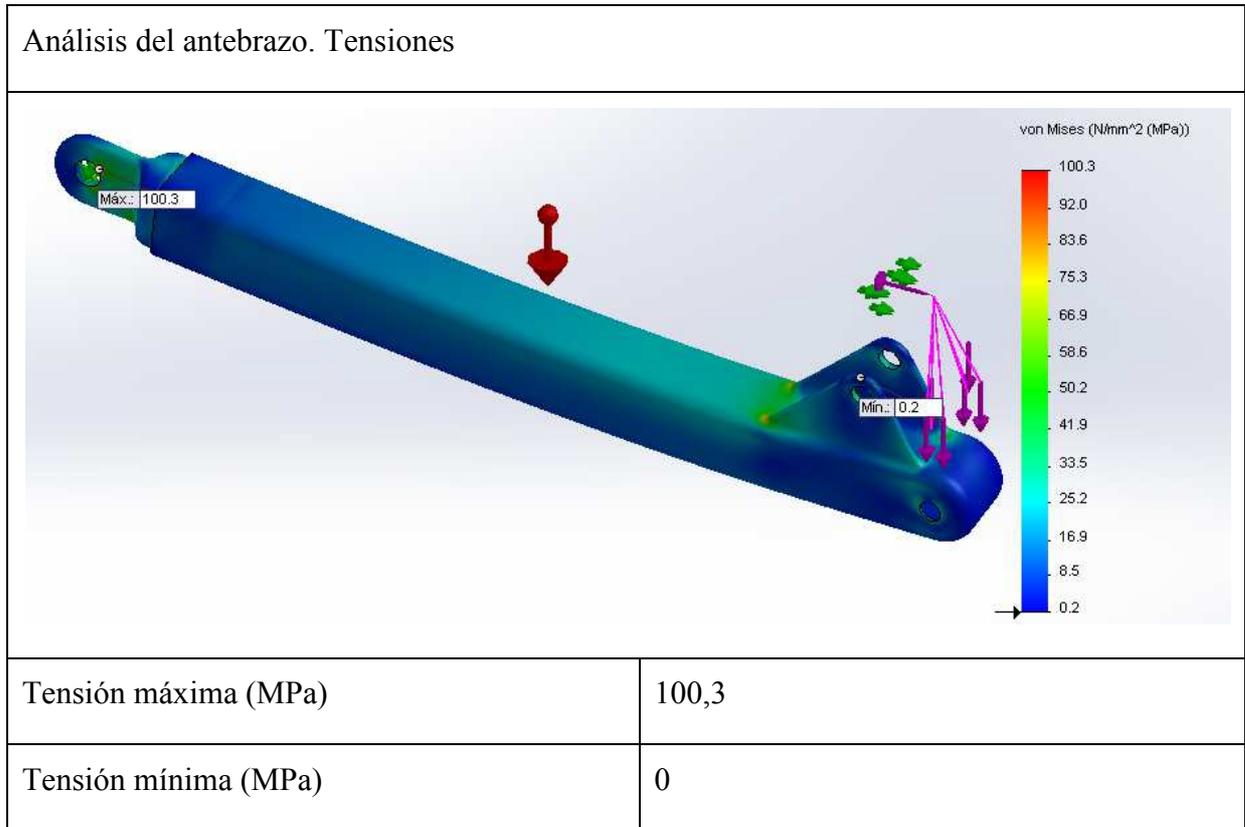


Tabla 15. Tensión de Von Mises para el modelo de antebrazo en fibra de carbono.

Las tensiones son máximas en zonas circundantes al agujero de la rótula del codo y, seguidamente, en las zonas donde las orejas intentan hundir la lámina de material que conforma la pared del perfil. No obstante, estas tensiones están por debajo siempre del límite de rotura del material. Para el modelo en fibra se requiere satisfacer un coeficiente de seguridad de 3,7 respecto a la tensión de rotura. Así, para el caso analizado las tensiones están considerablemente por debajo de ese factor de seguridad que colocaría el límite para la tensión en 149 MPa.

3.2.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos obtenidos fueron:

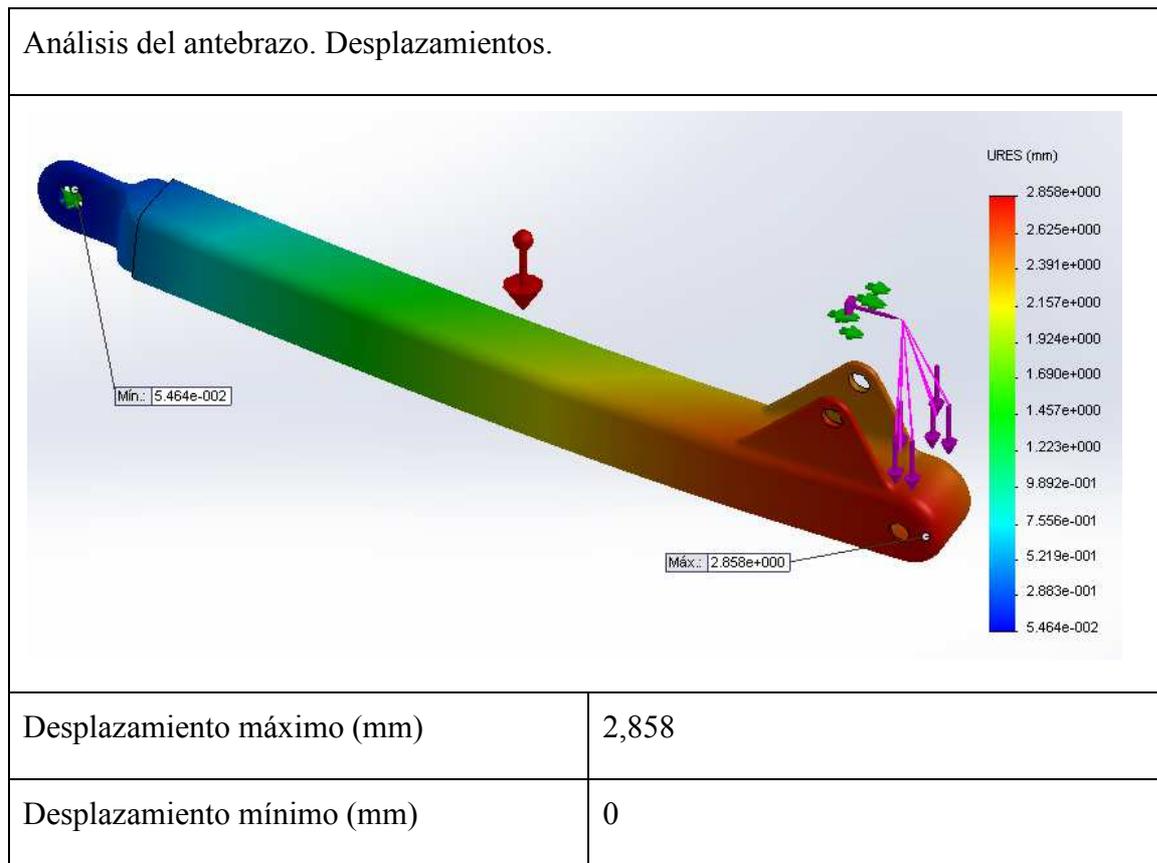


Tabla 16. Desplazamientos para el modelo de antebrazo en fibra de carbono.

Los desplazamientos son máximos en el extremo libre del perfil, donde actúa la carga, y mínimos en zonas cercanas a la articulación del codo. En cualquier caso, la resultante de los desplazamientos es baja en comparación a las dimensiones del elemento.

3.2.4 Estudio de pandeo.

Con el fin de determinar la idoneidad del modelo se ha verificado el posible pandeo, lo cual resulta de interés en este modelo en especial dados los espesores finos de las paredes del perfil. A continuación se muestran los cuatro primeros modos de pandeo.

Análisis del antebrazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	13,888	
2	24,806	
3	39,368	

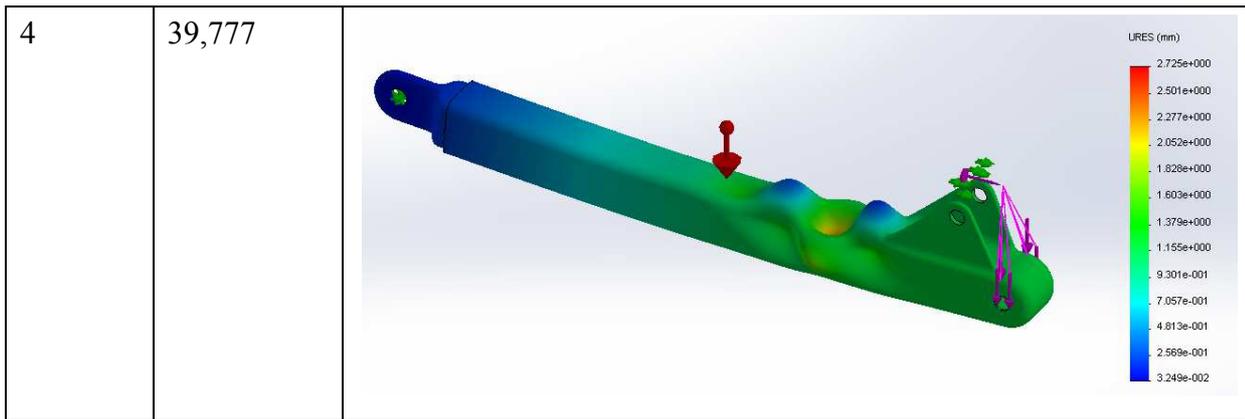


Tabla 17. Resultados del análisis de pandeo para el modelo de antebrazo en fibra de carbono.

Se puede observar que los dos primeros modos de pandeo tienen un efecto global sobre el antebrazo, mientras que los restantes son modos de pandeo locales en la lámina que conforma el perfil. En cualquier caso, los coeficientes de seguridad son altos y no se espera, por tanto, pandeo del antebrazo.

3.3 Brazo.

El brazo en fibra de carbono está compuesto por tres elementos:

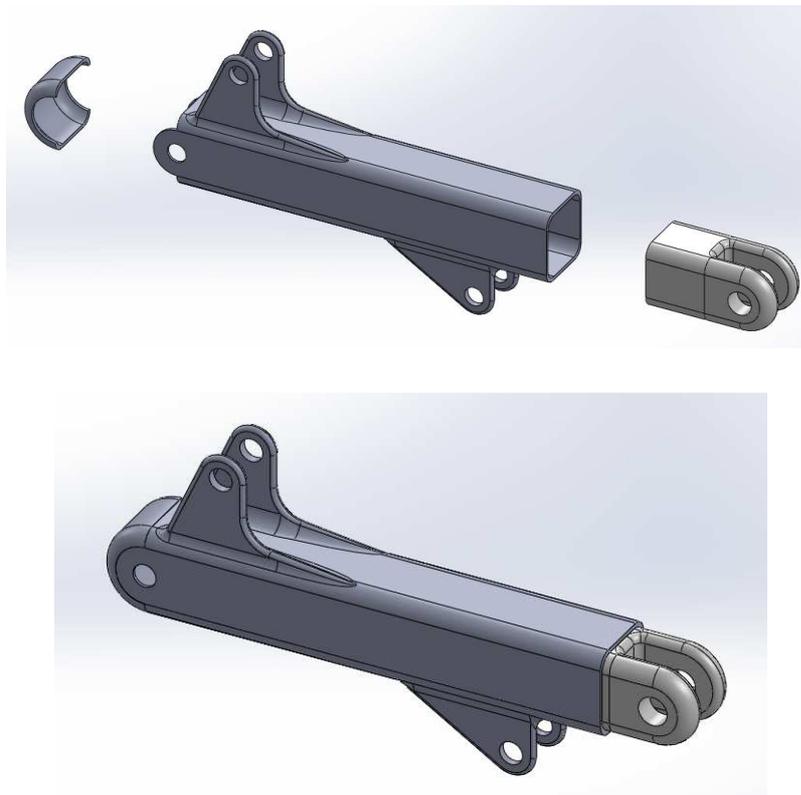
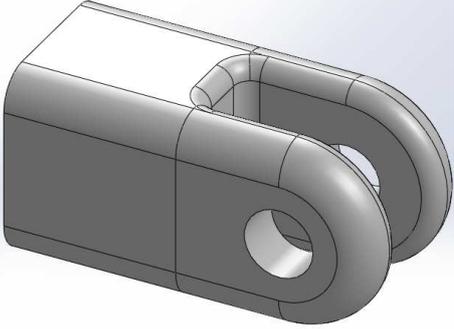
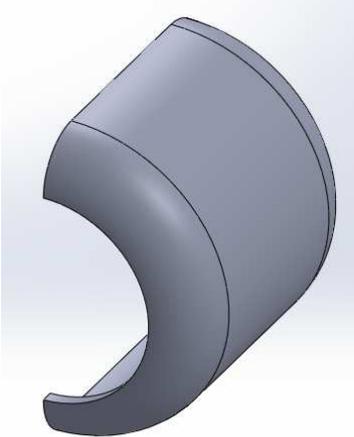


Figura 55. Modelo de brazo en fibra de carbono para la simulación.

Las diferentes partes y sus propiedades se detallan a continuación.

3.3.1 Componentes.

Rótula codo brazo carbono		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25
Tapa extremo brazo		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25

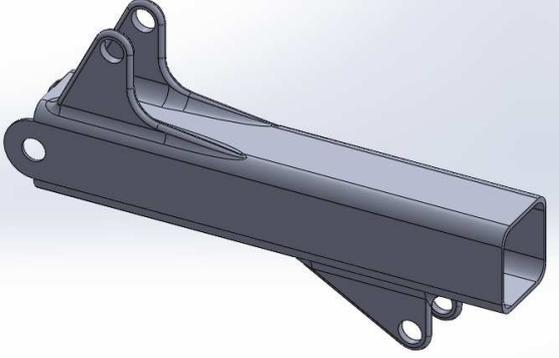
Perfil brazo carbono		
	Material	Fibra de carbono cuasiisotrópico
	Tipo de modelo	Cuasiisotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	55000 MPa
	Límite de tracción	552 MPa
	Densidad	1750 Kg/m ³
	Módulo cortante	22000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,25

Tabla 18. Componentes y propiedades mecánicas del modelo de brazo en fibra de carbono para la simulación.

3.3.2 Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.

Para el caso del brazo, se ha tenido en cuenta como restricciones los desplazamientos axial y radial (en verde) en los agujeros correspondientes a la rótula del hombro y a las orejas inferiores donde se engancha el actuador que acciona el brazo, no restringiendo el giro, pues son articulaciones. Las cargas (flechas magenta) se han colocado tanto en los agujeros correspondientes a la rótula del codo, como en los correspondientes a las orejas de actuación del antebrazo, siempre como cargas de apoyos. Se ha tenido en cuenta también la acción de la gravedad (flecha roja) y el momento torsor (en magenta) debido a la excentricidad de la carga (dado que esta quedaría excéntrica respecto al eje longitudinal de los elementos), éste último aplicado en la rótula del codo a la cual es transmitido por el antebrazo. El contacto entre componentes se ha supuesto rígido, pues estos estarán unidos de manera solidaria mediante pegamento.

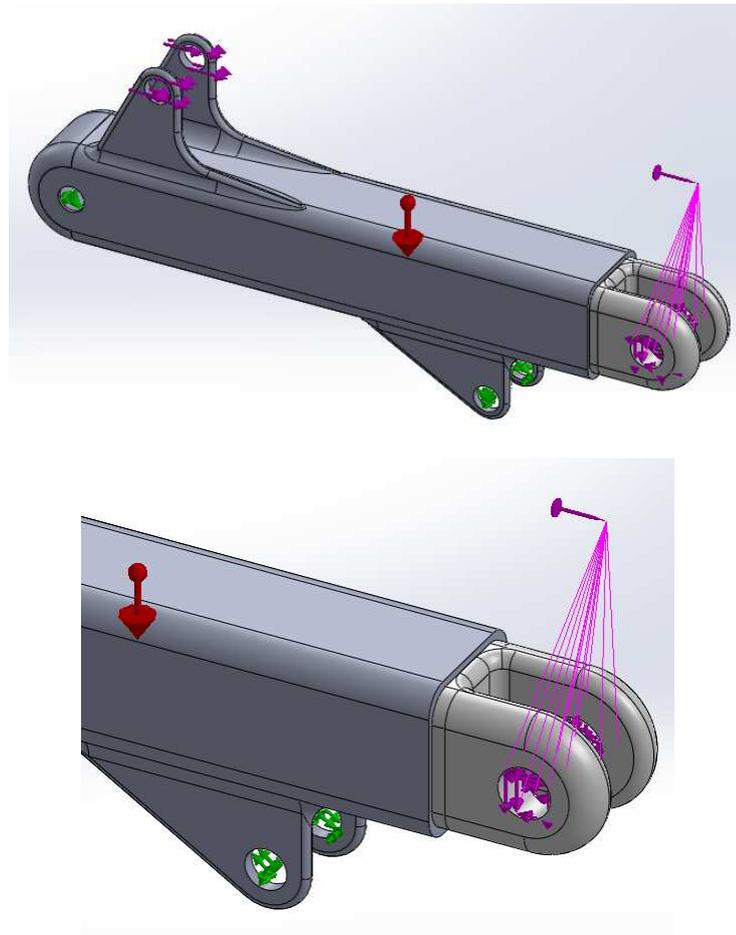


Figura 56. Restricciones y cargas aplicadas al modelo de brazo en fibra de carbono. Arriba vista general, abajo detalle para la parte del codo.

3.3.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Se ha llevado a cabo el correspondiente análisis estático para el brazo en fibra de carbono, aplicando una malla fina basada en curvatura.

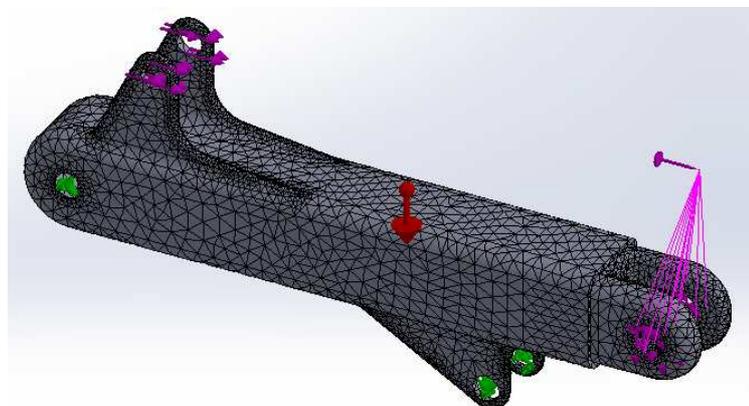


Figura 57. Vista de la malla para el modelo de brazo en fibra de carbono.

3.3.3.1 Tensiones.

Tras efectuar la simulación se obtuvieron las siguientes tensiones:

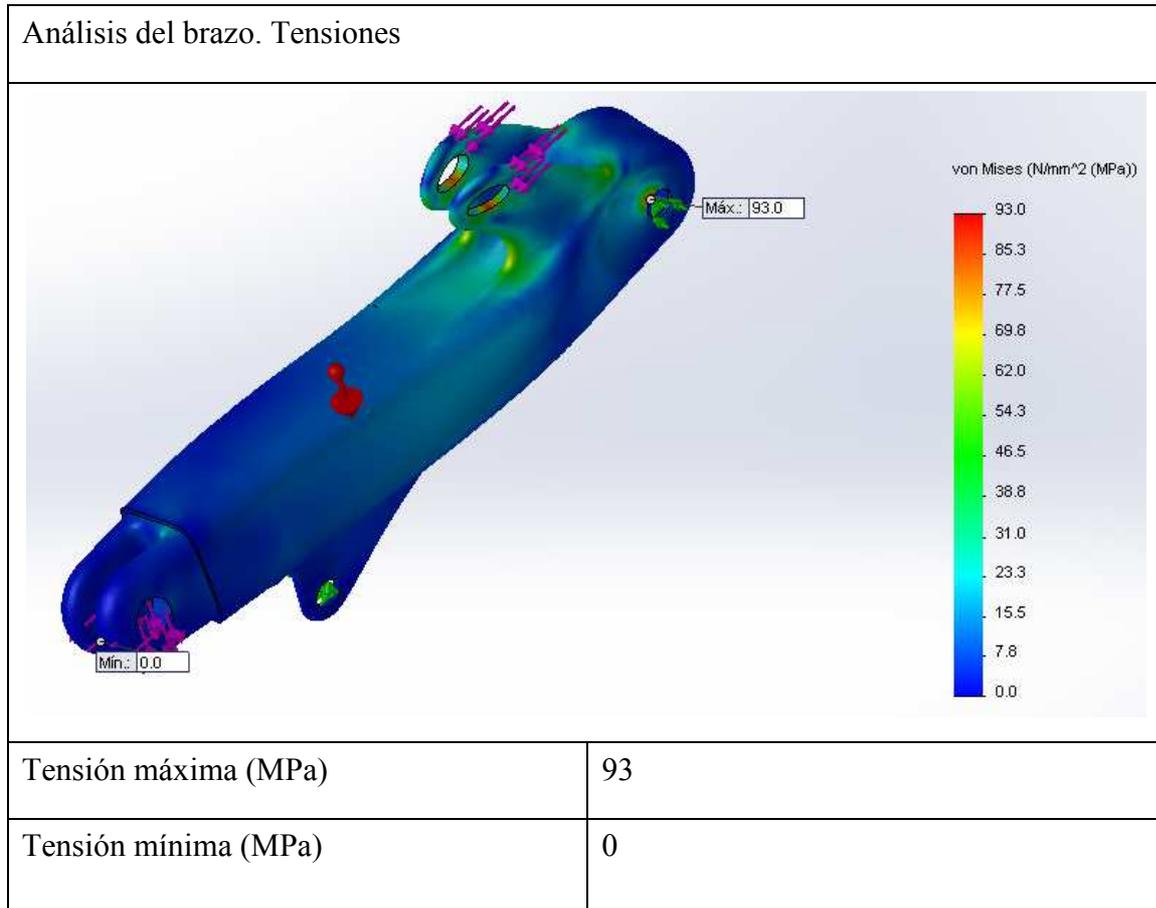


Tabla 19. Tensión de Von Mises para el modelo de brazo en fibra de carbono.

Las tensiones son máximas en los agujeros de la rótula del hombro. En el resto de la pieza las tensiones son bajas. En cualquier caso, se está lejos de la tensión de rotura y por debajo del límite para el factor de seguridad de 3,7.

3.3.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos obtenidos han sido:

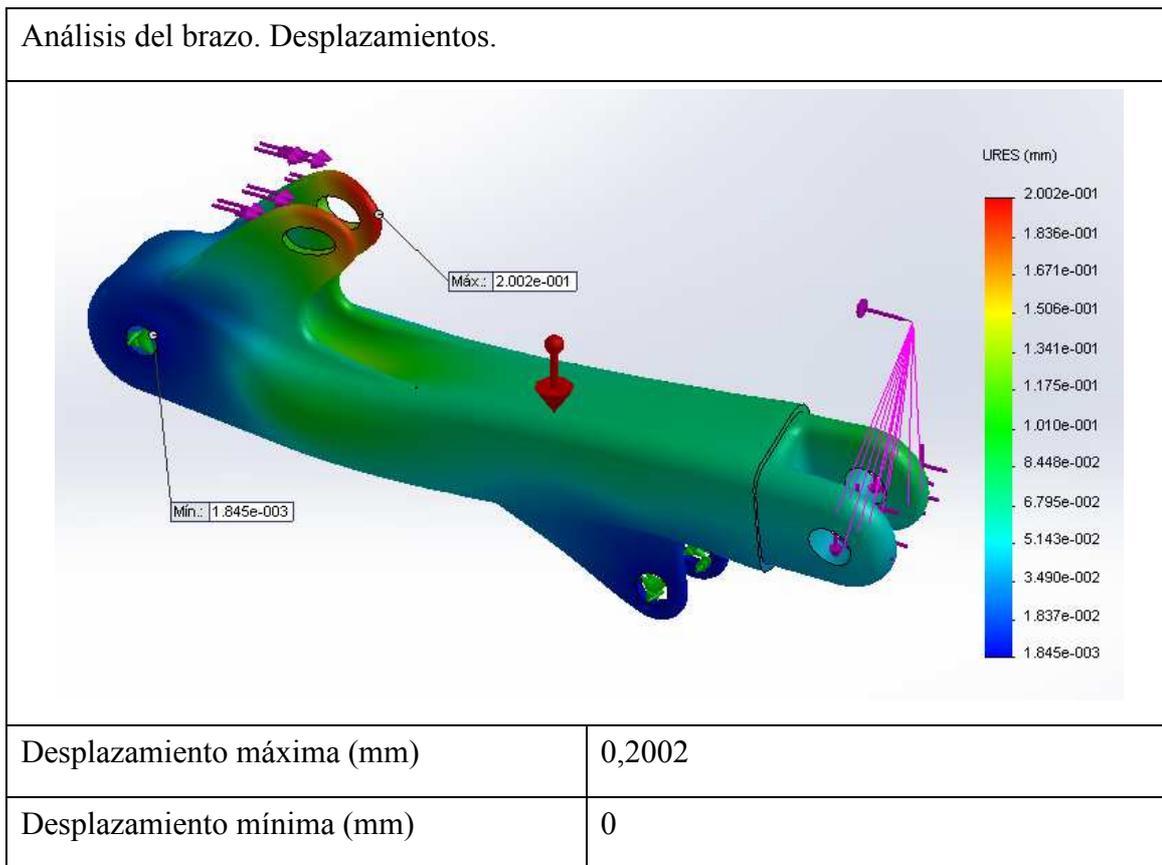


Tabla 20. Desplazamientos para el modelo de brazo en fibra de carbono.

Los desplazamientos son máximos en la oreja donde se engancha el actuador para el accionamiento del antebrazo y, en cualquier caso, no se dan grandes deformaciones en la pieza.

3.3.4 Estudio de pandeo.

Para verificar que no se dan problemas de pandeo ante las cargas aplicadas se ha llevado a cabo el correspondiente estudio. A continuación se muestran los cuatro primeros modos de pandeo.

Análisis del brazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coefficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	-86,059	
2	-37,184	
3	-36,146	

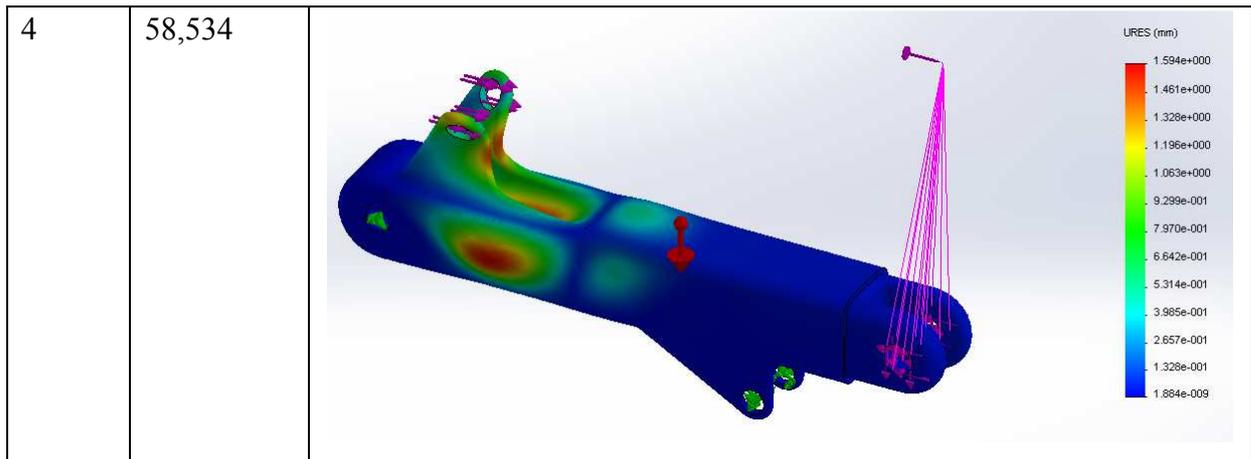


Tabla 21. Resultados del análisis de pandeo para el modelo de brazo en fibra de carbono.

Los tres primeros modos de pandeo son por alabeo torsional de las orejas superiores, mientras que en el cuarto se da una combinación de alabeo torsional de las orejas con pandeo local de la lámina del perfil. En cualquier caso, los coeficientes de seguridad frente al pandeo son altos. No se espera pandeo. El coeficiente negativo indica que no se prevé pandeo aunque se reviertan las cargas.

4 Modelo en metal con rótulas macizas.

4.1 Piezas auxiliares para el estudio.

Con el fin de estudiar correctamente el contacto entre componentes, se dispondrá de bujes y bulones. Para estos últimos, se ha diseñado un bulón con tapas en los extremos (que harán las veces de cabeza del tornillo y tuerca, simplificando el modelo) que eviten que éste se salga del brazo o antebrazo. Estas piezas se emplearán en las simulaciones tanto en este modelo como en el modelo con rótulas aligeradas más adelante.

Bulón		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa

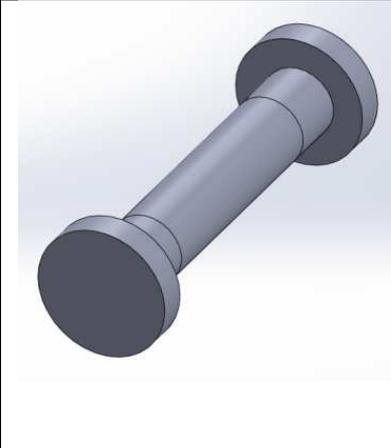
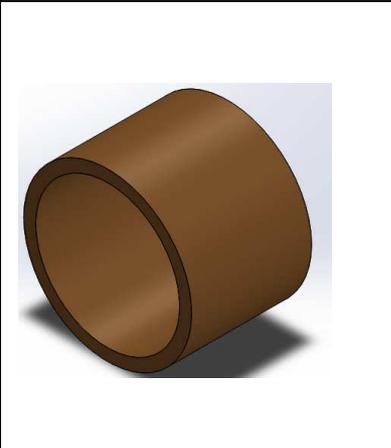
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Buje		
	Material	Bronce de aluminio (CDA 954)
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	110000 MPa
	Límite elástico	250 MPa
	Límite de tracción	551,48 MPa
	Densidad	7400 Kg/m ³
	Módulo cortante	43000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,3

Tabla 22. Piezas auxiliares para la simulación.

4.2 Antebrazo.

El antebrazo metálico está compuesto por tres piezas soldadas entre sí:

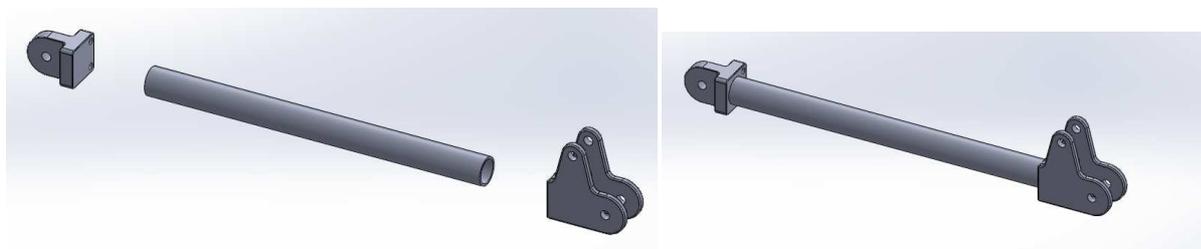
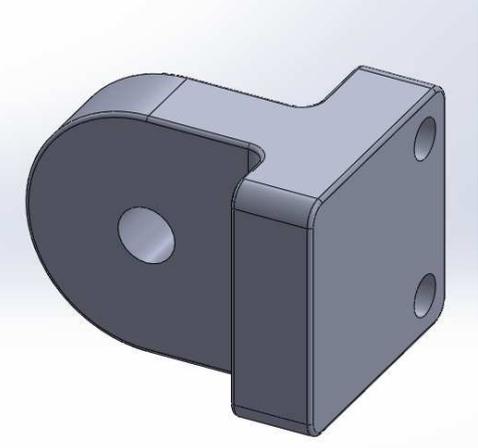
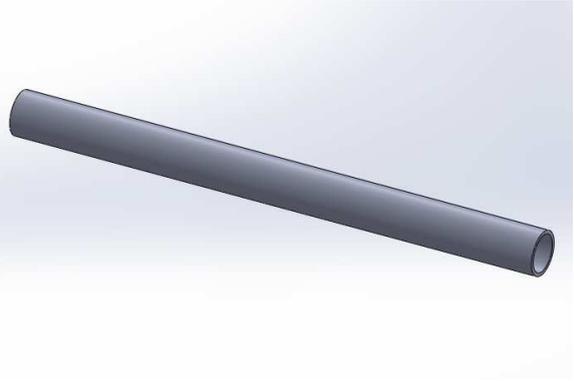


Figura 58. Modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas para la simulación.

A continuación se detallan cada uno de los componentes y sus propiedades.

4.2.1 Componentes.

Rótula codo antebrazo		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Tubo antebrazo		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

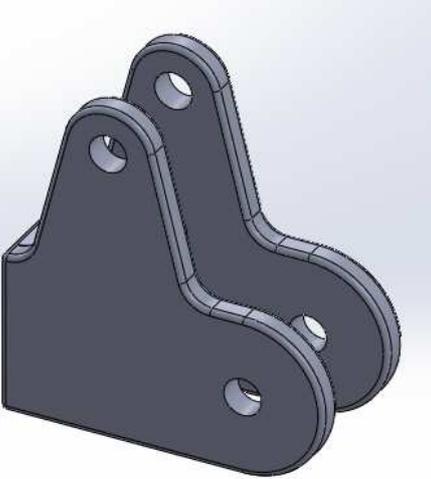
Extremo del enganche de la carga		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 23. Componentes y propiedades mecánicas del modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas.

4.2.2 Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.

Para el caso de la rótula del codo se han tomado como restricciones (en verde) los desplazamientos axiales y radiales en el agujero del mismo, sin impedir el giro, como si se tratara de una articulación.

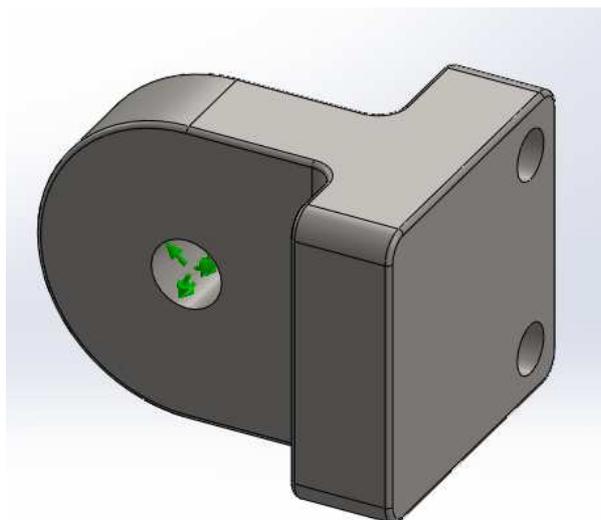


Figura 59. Restricciones aplicadas en la rótula del codo para el modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas.

Para el extremo de enganche de la carga se han colocado los respectivos bulones y bujes para estudiar posibles tensiones de contacto, aplicando condiciones de no penetración entre los mismos. Como restricciones (flechas verdes) se ha impuesto el desplazamiento en la dirección axial del antebrazo al bulón que fijaría el actuador, pues es ésta dirección en la que se ejercería la reacción del mismo para estas hipótesis de carga. Además, se ha aplicado la carga (flecha magenta con proyecciones) al bulón que fija la pala como masa remota, en la posición real que ocuparía en el espacio con el objetivo de tener en cuenta tanto la torsión como la flexión que se generan.

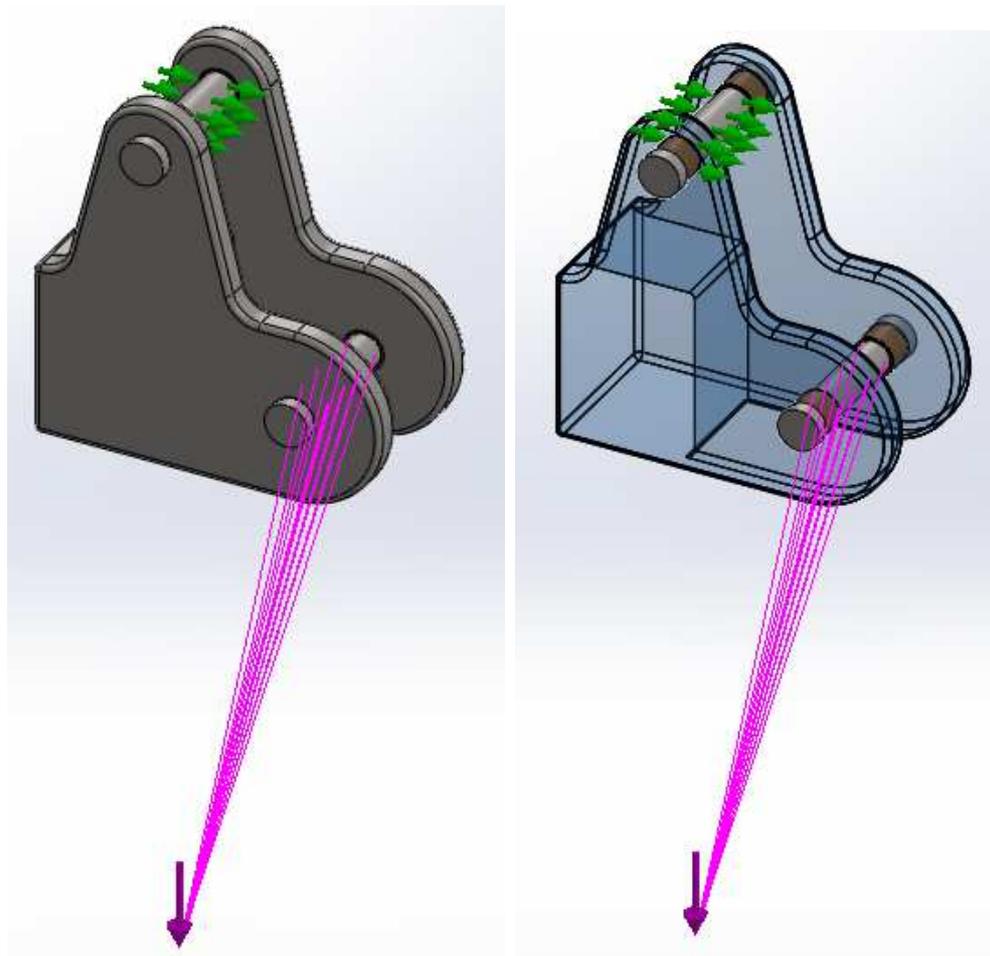


Figura 60. Restricciones y cargas aplicadas en el extremo del antebrazo metálico de rótulas macizas.

Finalmente, se ha añadido el efecto general de la gravedad al conjunto como carga (flecha roja).

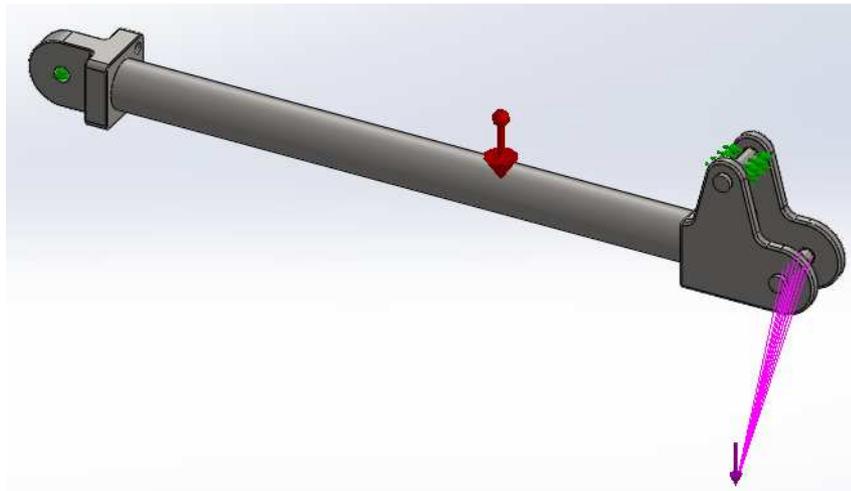


Figura 61. Vista general de las restricciones y cargas aplicadas al modelo metálico de antebrazo de rótulas macizas.

En la unión del tubo con la rótula y con el extremo del enganche de la carga se ha impuesto una unión rígida, de manera que se transmiten todos los esfuerzos entre piezas, pues éstas deben soldarse.

4.2.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Para llevar a cabo el estudio se han empleado elementos tetraédricos de malla basada en curvatura, con el fin de obtener mejores resultados en aquellas zonas que presentan redondeos o espesores finos. Asimismo, se han aplicado controles de mallado a zonas críticas como los bujes, los redondeos de las orejas o los bulones, para establecer en tales partes una malla fina que garantice resultados correctos.

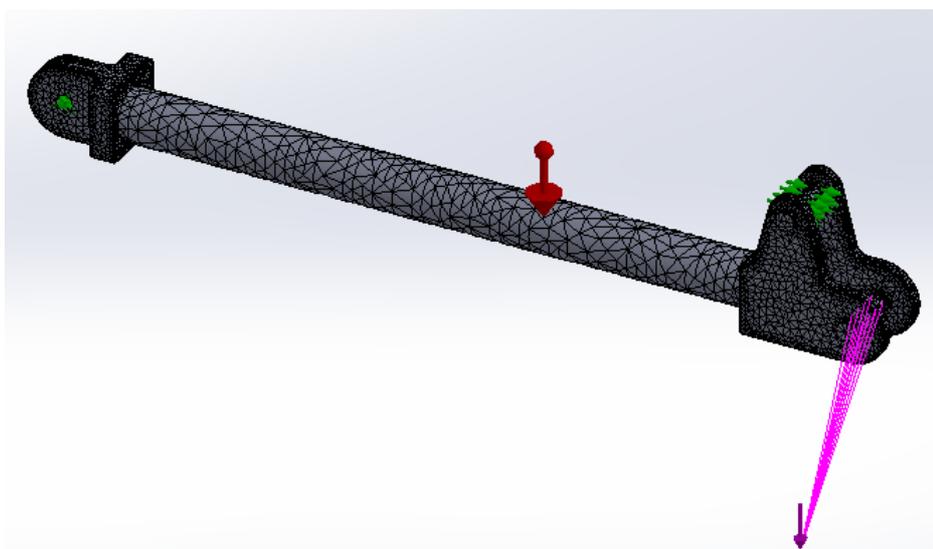


Figura 62. Malla del modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas.

4.2.3.1 Tensiones.

Tras efectuar el correspondiente análisis se han obtenido los siguientes resultados:

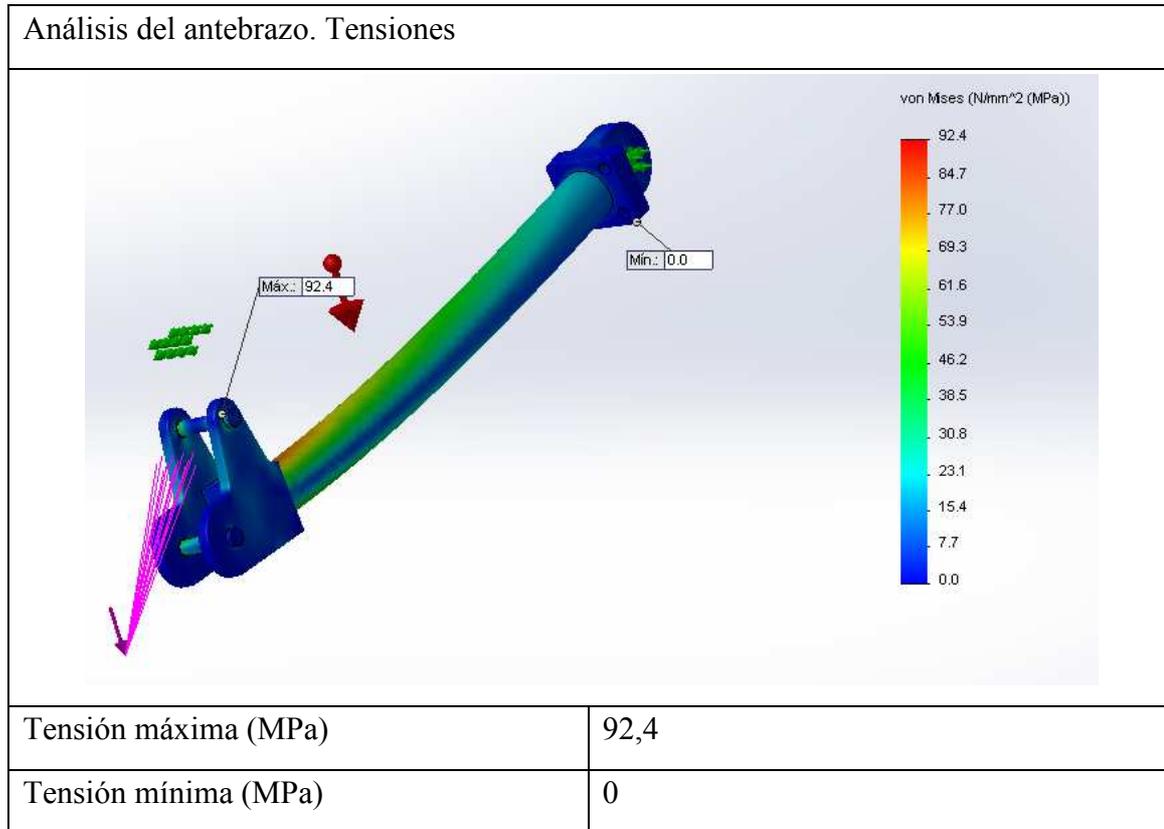


Tabla 24. Tensión de Von Mises para el modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas.

Las tensiones máximas se dan en el contacto bulón-buje, es decir, son tensiones de contacto debidas a la carga que intenta comprimir el bulón sobre el buje. Por otra parte, la tensión es nula en ciertas partes de las rótulas, en aquellas que quedan por detrás del punto de articulación del codo y delante del punto de articulación de la pala, pues estos puntos están exentos de cargas y a ellos no se transmiten momentos. Nótese también que, para el tubo, la tensión es mayor en la zona superior donde se combinan la compresión simple y la compresión debida al momento flector.

4.2.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos obtenidos para la simulación fueron los siguientes:

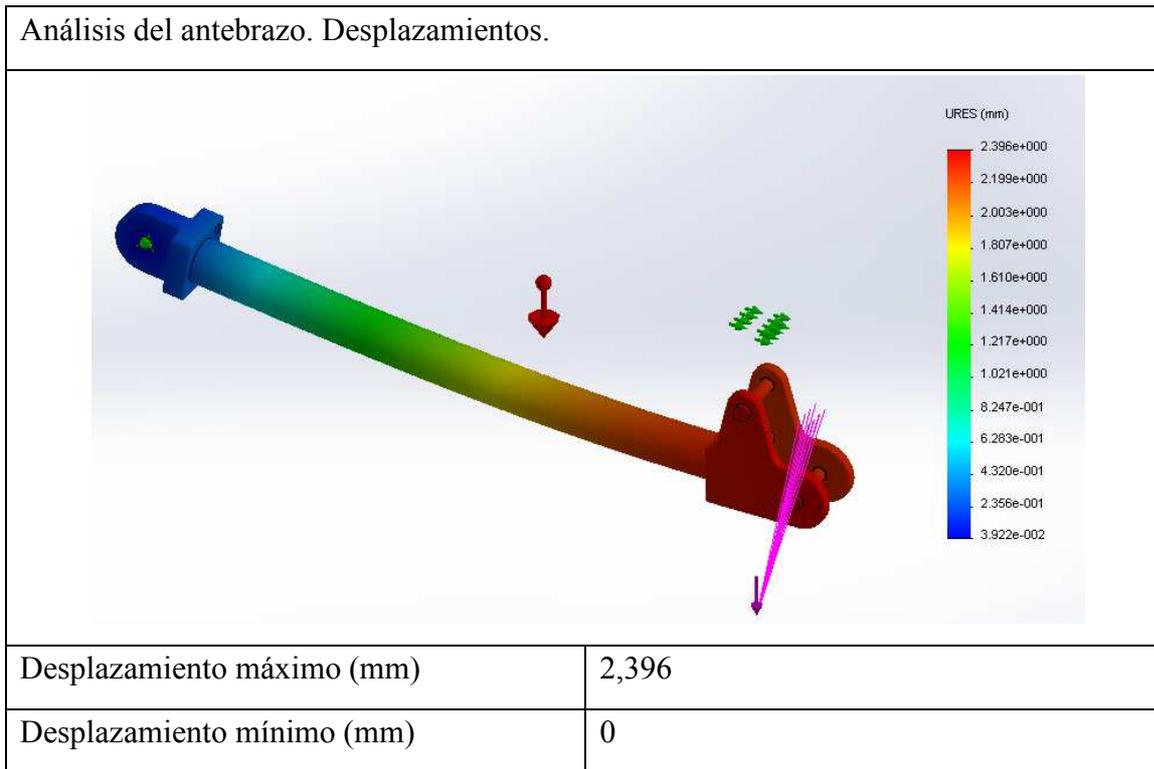


Tabla 25. Desplazamientos para el modelo metálico de antebrazo con rótulas macizas.

Los desplazamientos son máximos en el extremo libre del antebrazo, donde la carga hace que éste gire y descienda. No obstante, en comparación a la longitud del antebrazo estos desplazamientos son pequeños.

4.2.4 Estudio de pandeo.

Con el fin de evaluar un posible pandeo en el antebrazo, dada su longitud y las cargas aplicadas, se ha ejecutado un análisis de pandeo, pero en este caso suprimiendo bujes y bulones del análisis pues el programa adopta una unión rígida entre todos los elementos y no son aplicables contactos de no penetración, luego no son necesarios. Así pues, tras efectuar el estudio se obtuvieron los siguientes modos de pandeo.

Análisis del antebrazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coefficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	28,92	
2	80,183	
3	236,75	

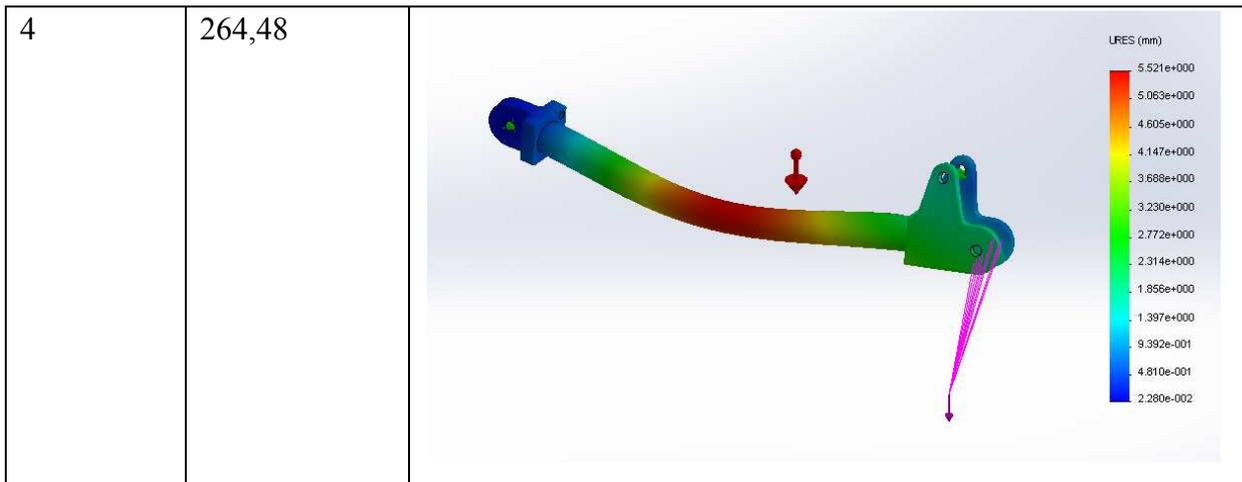


Tabla 26. Resultados del análisis de pandeo para el modelo metálico del antebrazo con rótulas macizas.

Nótese que todos los coeficientes están muy por encima de 1, con lo que no es de esperar problemas de pandeo en el antebrazo.

4.3 Brazo.

El brazo metálico está formado por cuatro piezas, dos tubos y dos rótulas soldados que se unen por medio de un bulón.

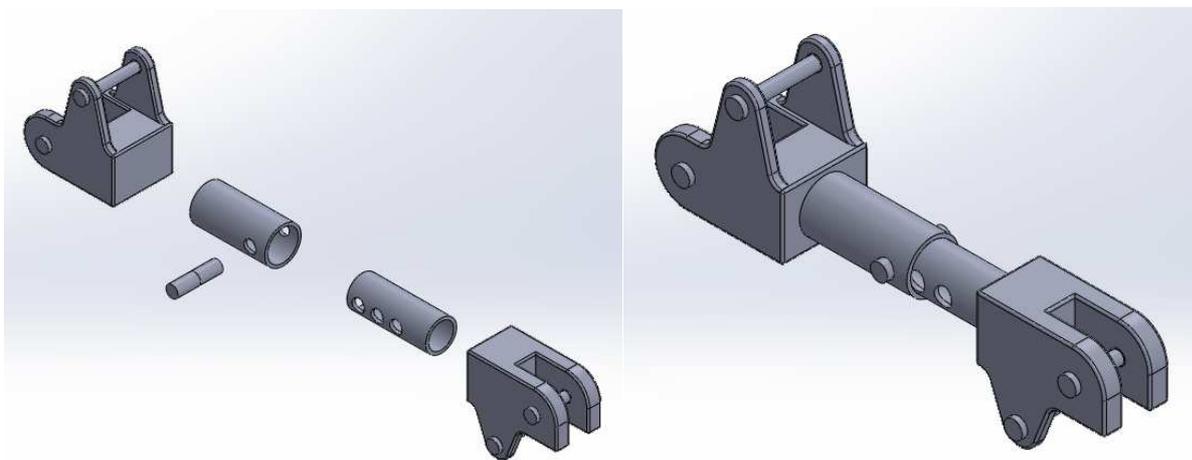
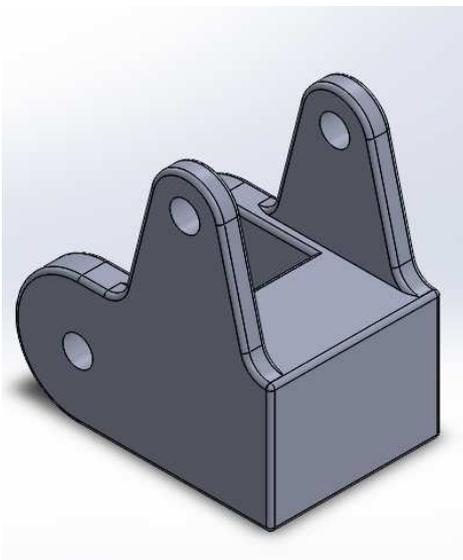
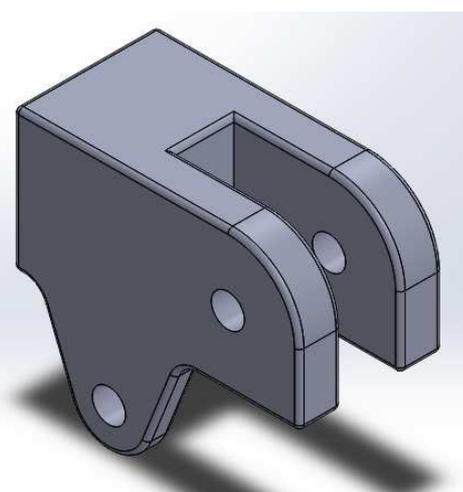


Figura 63. Modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

Los componentes y sus propiedades se detallan a continuación.

4.3.1 Componentes.

Rótula hombro		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Rótula codo		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

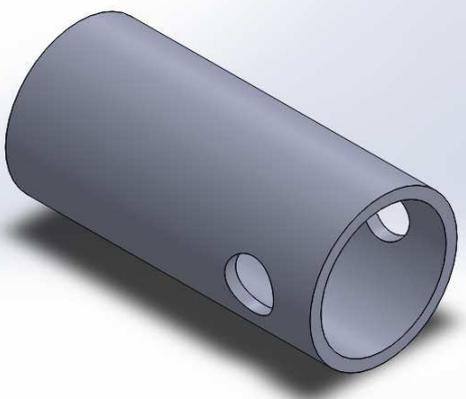
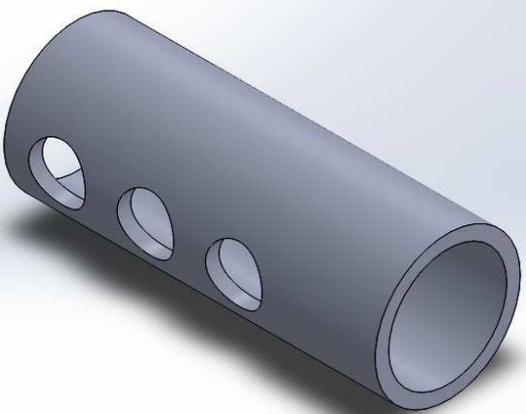
Tubo brazo exterior		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Tubo brazo interior		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 27. Componentes y propiedades mecánicas del modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

4.3.2 Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.

En el caso de la rótula del hombro se han aplicado las cargas y restricciones directamente sobre los bulones. Se han aplicado restricciones (flechas verdes) axiales y radiales en el bulón. Las cargas (flechas magenta) aplicadas tienen la dirección del eje longitudinal de los tubos.

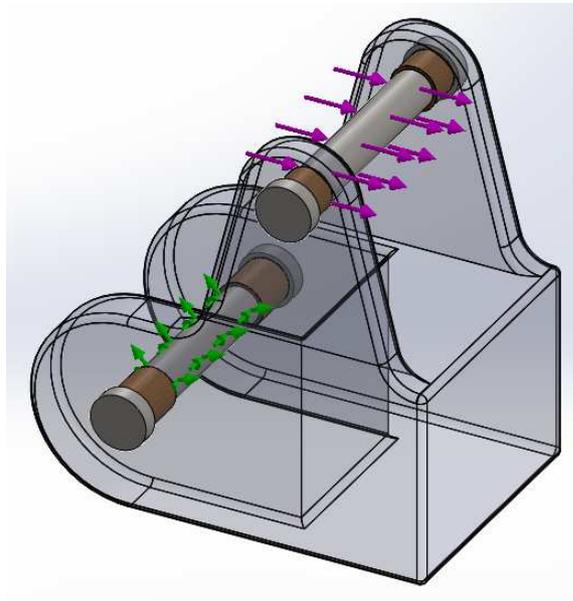


Figura 64. Restricciones y cargas aplicadas en la rótula del hombro para el modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

El contacto entre los pares buje-bulón se ha establecido sin penetración, para estudiar posibles tensiones de contacto.

Para la rótula del codo se han aplicado restricciones similares a las de la rótula del hombro en las orejas inferiores donde engancha el actuador y cargas en las orejas correspondientes al codo, aplicadas según las hipótesis de carga correspondientes. Además, se ha añadido el momento torsor (magenta con proyecciones) que soporta el conjunto como consecuencia de la excentricidad de la carga.

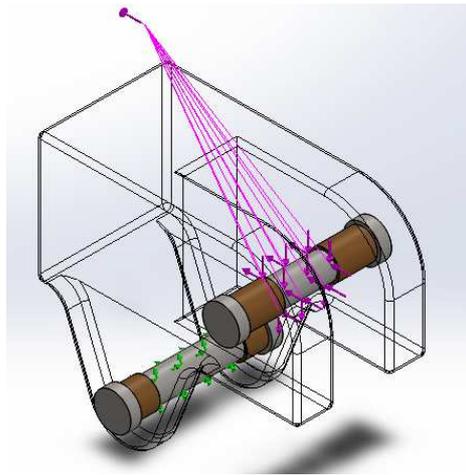


Figura 65. Restricciones y cargas aplicadas en la rótula del codo para el modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

Las uniones entre los tubos, tanto el exterior como el interior, con las respectivas rótulas serán uniones rígidas, de esta forma se transmite los esfuerzos entre piezas. Además, el contacto entre el tornillo que permite la regulación del brazo y los tubos que lo conforman se supone sin penetración, así como el contacto de las caras de los tubos entre sí, para estudiar posibles concentraciones de tensión en tales puntos.

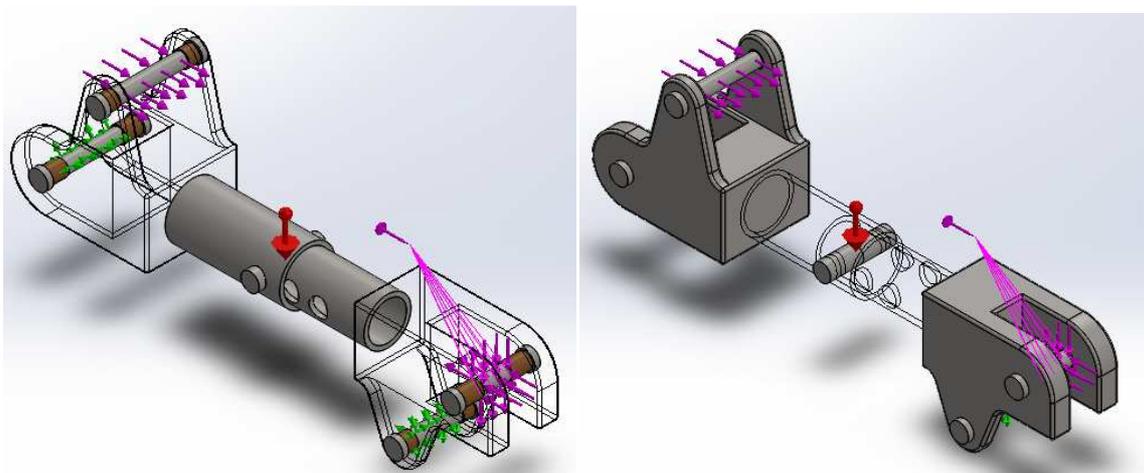


Figura 66. Vista general de las restricciones y cargas aplicadas al modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

Por último se ha añadido el efecto de la gravedad (flecha en rojo).

4.3.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Para el estudio se ha empleado una malla fina de tetraedros basada en curvatura, con el fin de obtener resultados óptimos. Además se ha utilizado un mallado fino en los tubos, en los taladros de los tubos y en los bujes.

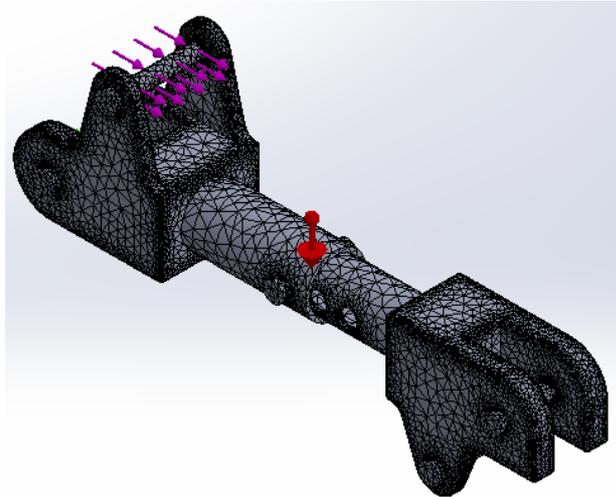


Figura 67. Malla del modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

4.3.3.1 Tensiones.

Tras ejecutar el estudio se han obtenido las siguientes tensiones:

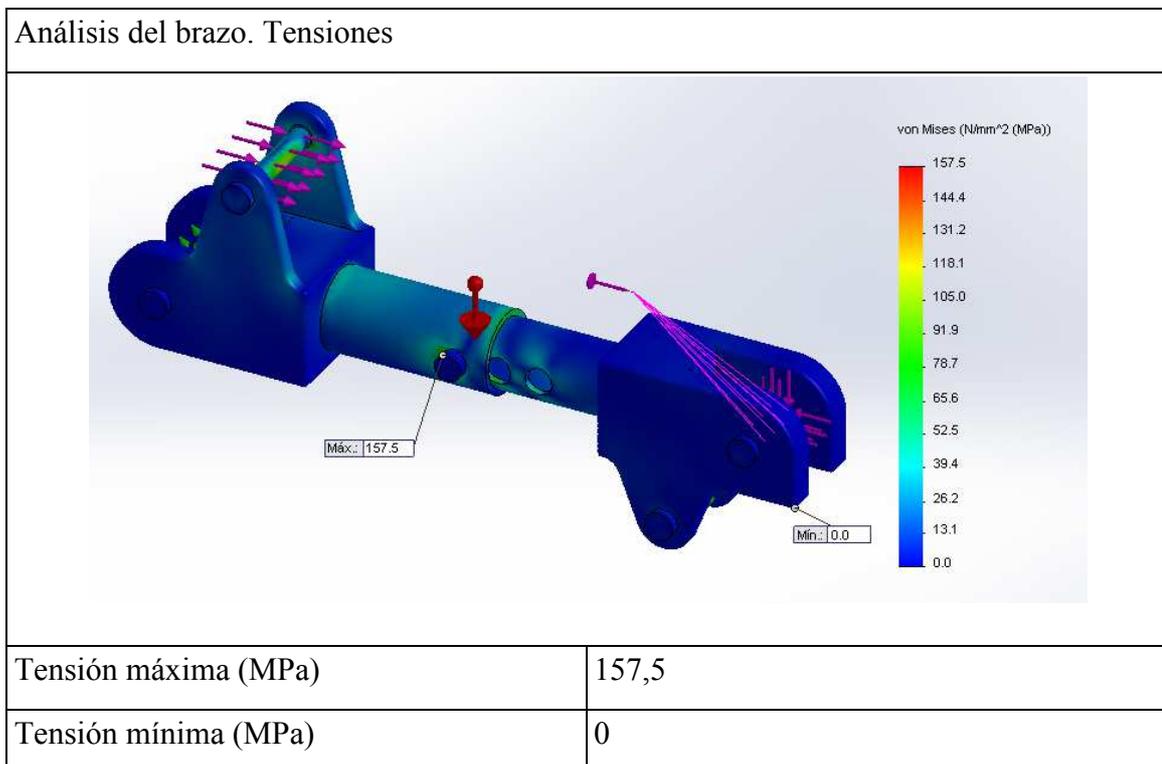


Tabla 28. Tensión de Von Mises para el modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

Para visualizar la tensión en el interior del agujero dónde que conectan los dos tubos, el tornillo se ha ocultado en la siguiente imagen.

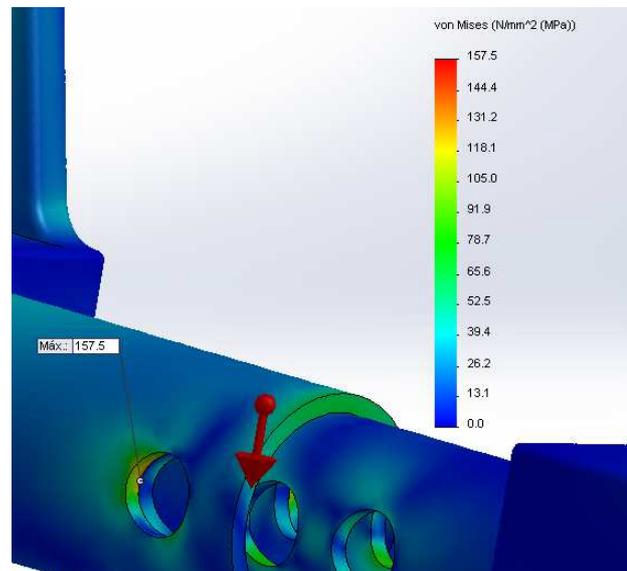


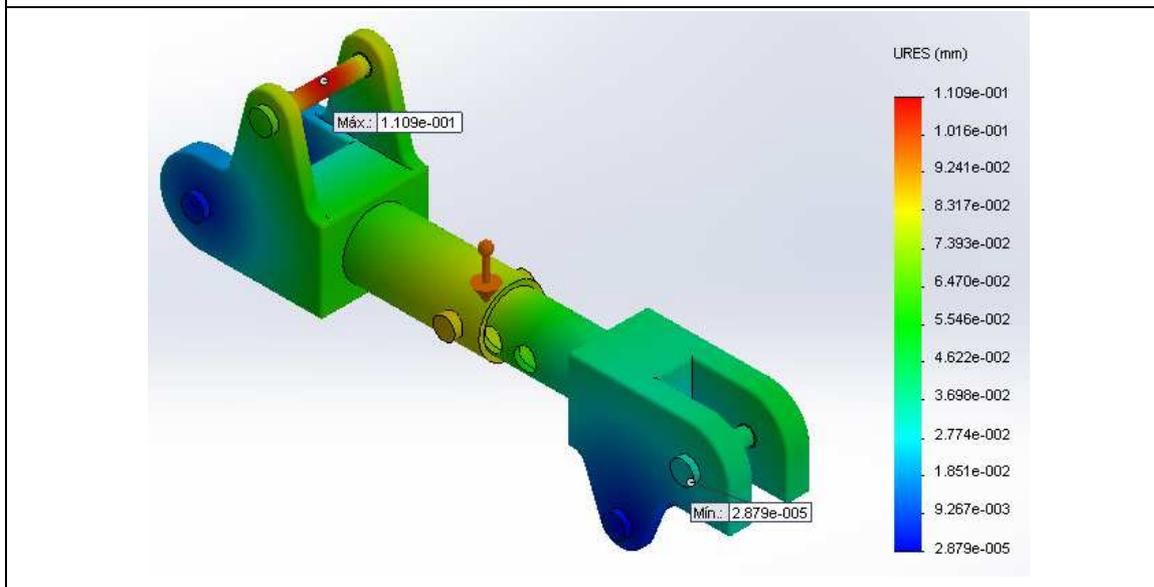
Figura 68. Detalle de las tensiones en el interior de los agujeros del perfil del brazo, modelo metálico con rótulas macizas.

Las tensiones máximas se producen en los agujeros de los tubos, en las zonas de contacto con el bulón, y en los bujes del actuador del hombro. Estas tensiones son inferiores al límite elástico del los materiales empleados.

4.3.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos obtenidos han sido:

Análisis del brazo. Desplazamientos.



Desplazamiento máxima (mm)	0,1109
Desplazamiento mínima (mm)	0

Tabla 29. Desplazamientos del modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

4.3.4 Estudio de pandeo.

Para realizar el estudio de pandeo se han suprimido los bujes y bulones, y se han aplicado las cargas y las fuerzas directamente sobre las orejas. Los resultados han sido los siguientes:

Análisis del brazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coefficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	593,67	<p>Gráfico de desplazamiento (URES) para el modo 1 de pandeo. El eje vertical muestra valores en mm: 9.210e-001, 8.444e-001, 7.677e-001, 6.910e-001, 6.144e-001, 5.377e-001, 4.610e-001, 3.844e-001, 3.077e-001, 2.310e-001, 1.544e-001, 7.769e-002, 1.028e-003.</p>
2	603,57	<p>Gráfico de desplazamiento (URES) para el modo 2 de pandeo. El eje vertical muestra valores en mm: 1.146e+000, 1.050e+000, 9.549e-001, 8.594e-001, 7.639e-001, 6.684e-001, 5.730e-001, 4.775e-001, 3.820e-001, 2.865e-001, 1.911e-001, 9.558e-002, 1.081e-004.</p>

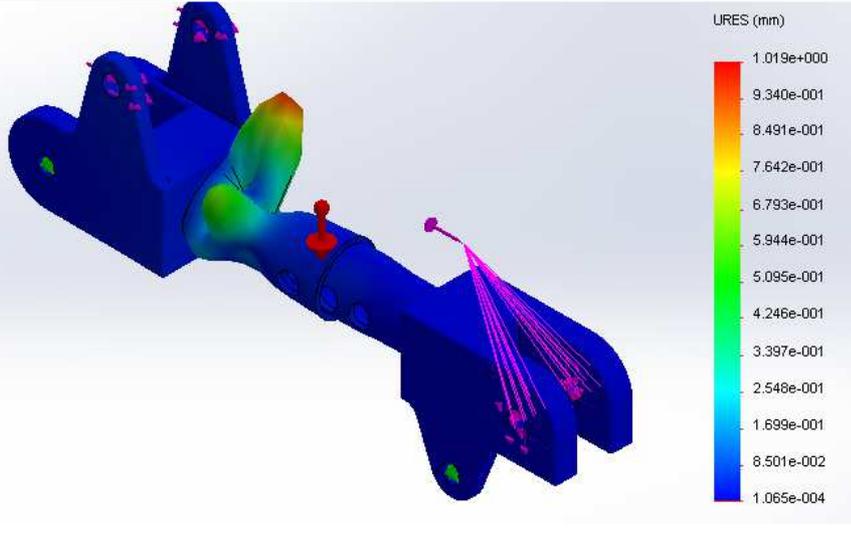
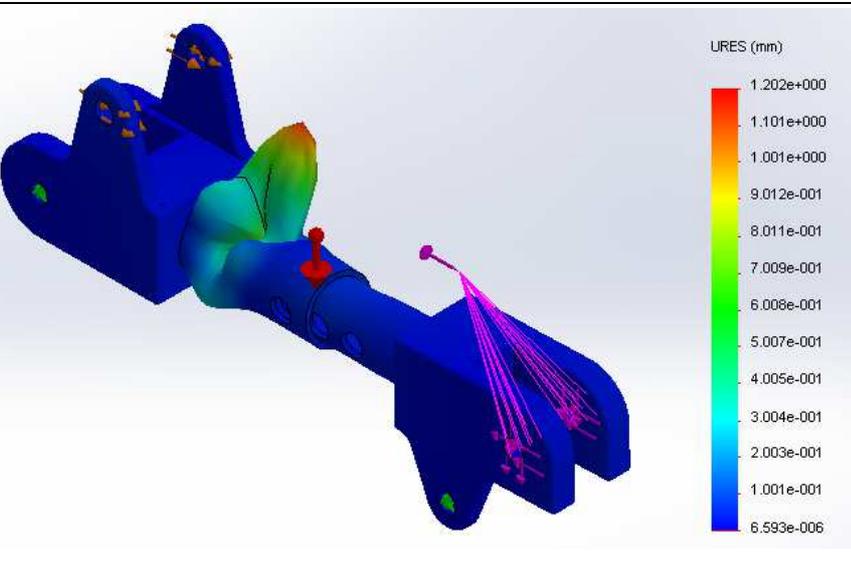
3	645,01	
4	670,55	

Tabla 30. Resultados del análisis de pandeo para el modelo metálico de brazo con rótulas macizas.

Los factores de seguridad de seguridad son lo suficientemente altos para que no se produzca el pandeo. Además, los modos de pandeo son modos de pandeo local de la chapa que conforma el perfil de los tubos.

5 Brazo y antebrazo metálicos optimizados.

Dado que en los diseños anteriores se contaba con mucho material que apenas tenía función estructural, pues casi no se daban en él tensiones, se han optimizado las rótulas para reducir el peso y el costo.

5.1 Antebrazo.

El antebrazo en metal con rótulas aligeradas está compuesto por un perfil circular y dos rótulas a partir de chapas soldadas:

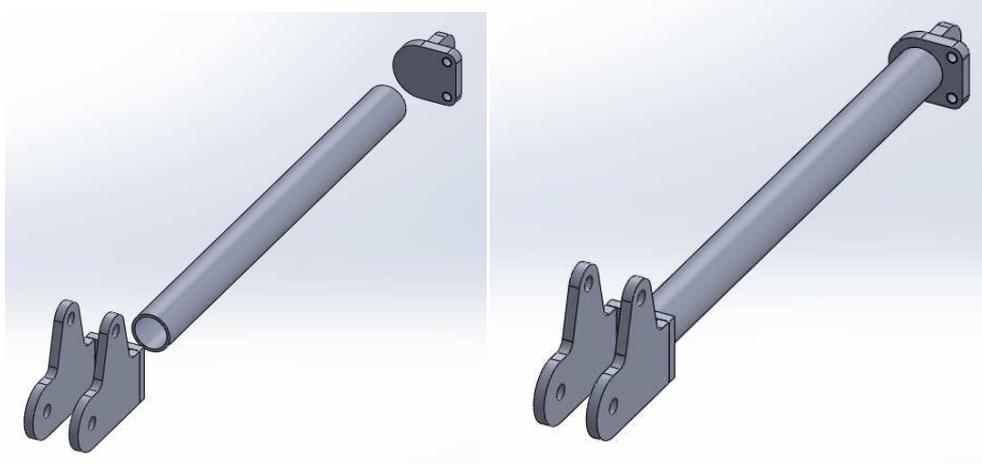
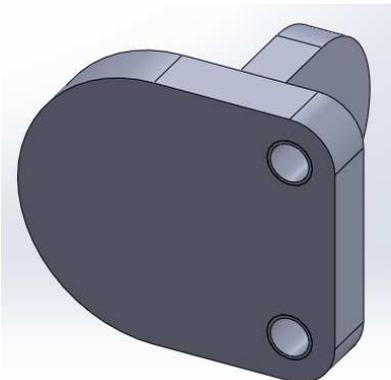


Figura 69. Modelo metálico de antebrazo con rótulas aligeradas.

Los elementos y sus propiedades se detallan a continuación.

5.1.1 Componentes.

Rótula del codo del antebrazo		
 <p>Esta pieza está formada por dos placas soldadas con total penetración, con lo que se simularán como unión rígida, como si se tratara de una sola pieza.</p>	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,29	

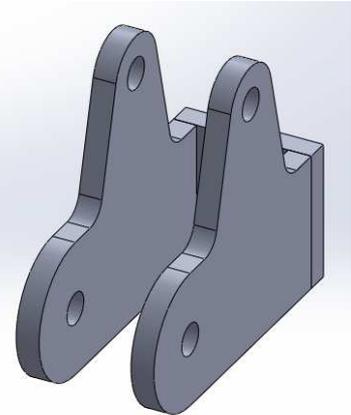
Extremo enganche carga		
 <p>Esta pieza, al igual que la anterior, está formada por tres piezas unidas mediante soldadura con penetración total, con lo que se simularán como unión rígida.</p>	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Tubo antebrazo		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 31. Componentes y propiedades mecánicas del modelo metálico de antebrazo con rótulas aligeradas.

5.1.2 Condiciones de contorno y cargas aplicadas al modelo.

Para efectuar los estudios se han impuesto las siguientes cargas y restricciones al modelo.

En la rótula del codo se ha dispuesto un buje, tal como se dispondrá en el diseño real, y se han limitado los desplazamientos axial y radial (flechas en verde) en los puntos en los que este queda sujeto en la rótula del brazo, no así con el giro pues es una articulación.

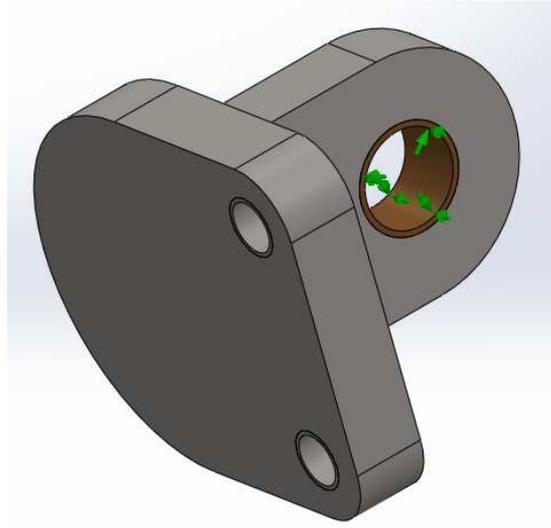


Figura 70. Restricciones aplicadas en la rótula del codo del antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

En el otro extremo se coloca una restricción (flechas en verde) en el bulón que engancha el actuador en dirección axial según el eje del antebrazo, tal y como se daría la reacción que tiende a equilibrar el modelo. La carga (flecha magenta con proyecciones) se ha aplicado como masa remota a la distancia a la que la pala la sujetaría, para así tener en cuenta también el efecto torsor que genera la excentricidad existente.

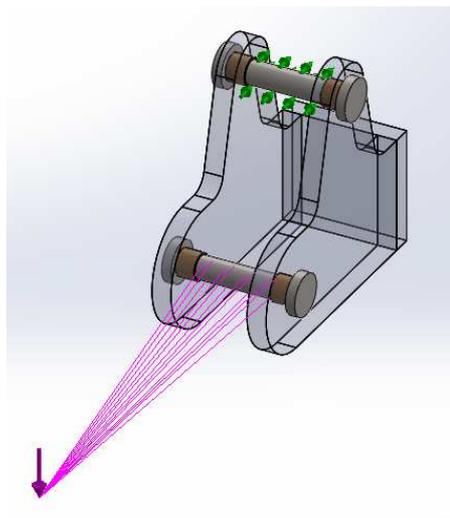


Figura 71. Restricciones y cargas aplicadas en el extremo del antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

También se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad (flecha roja). En cuanto al contacto entre componentes, se ha supuesto una unión rígida entre los componentes, pues estarán soldados, salvo para los contactos con los bujes y bulones, donde se ha impuesto un contacto sin penetración para estudiar posibles tensiones de contacto.

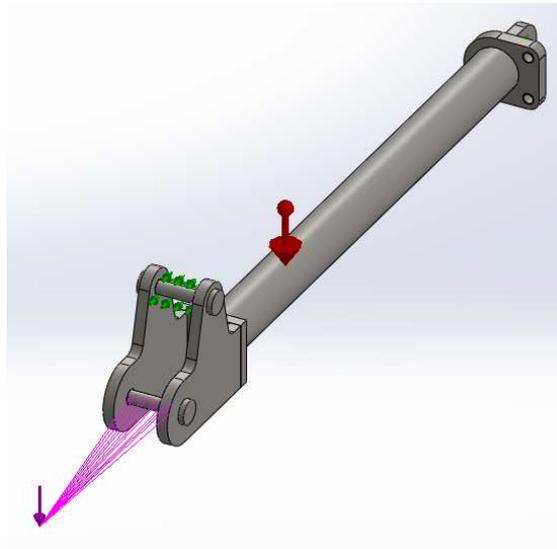


Figura 72. Vista general de las restricciones y cargas aplicadas al antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

5.1.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Se ha realizado un estudio estático aplicando una malla fina basada en curvatura.

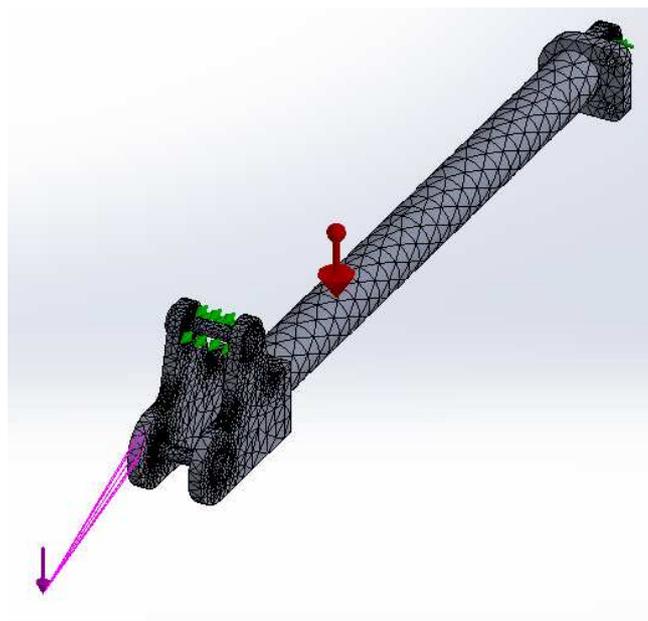


Figura 73. Malla del modelo de antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

5.1.3.1 Tensiones.

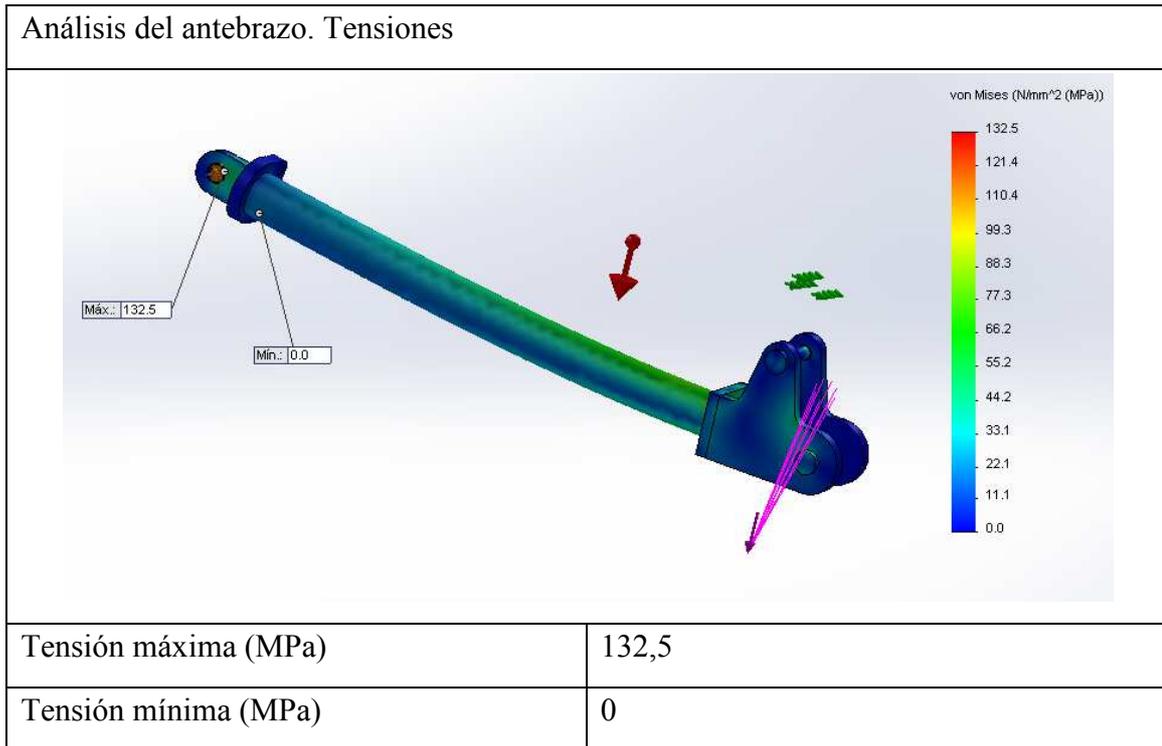
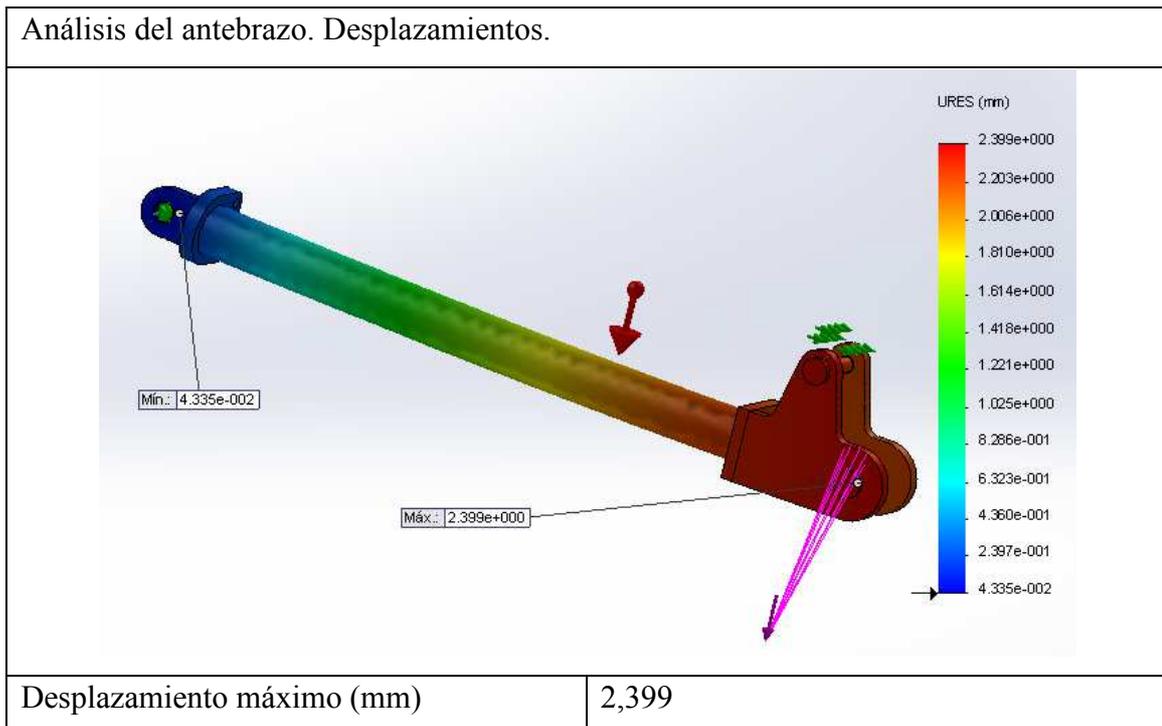


Tabla 32. Tensión de Von Mises para el modelo metálico de antebrazo con rótulas aligeradas.

Las tensiones máximas se dan en el agujero de la rótula del codo, pues se combinan compresión y torsión. En cualquier caso, para los valores obtenidos, las tensiones están lejos del límite elástico de los materiales.

5.1.3.2 Desplazamientos.



Desplazamiento mínimo (mm)	0
----------------------------	---

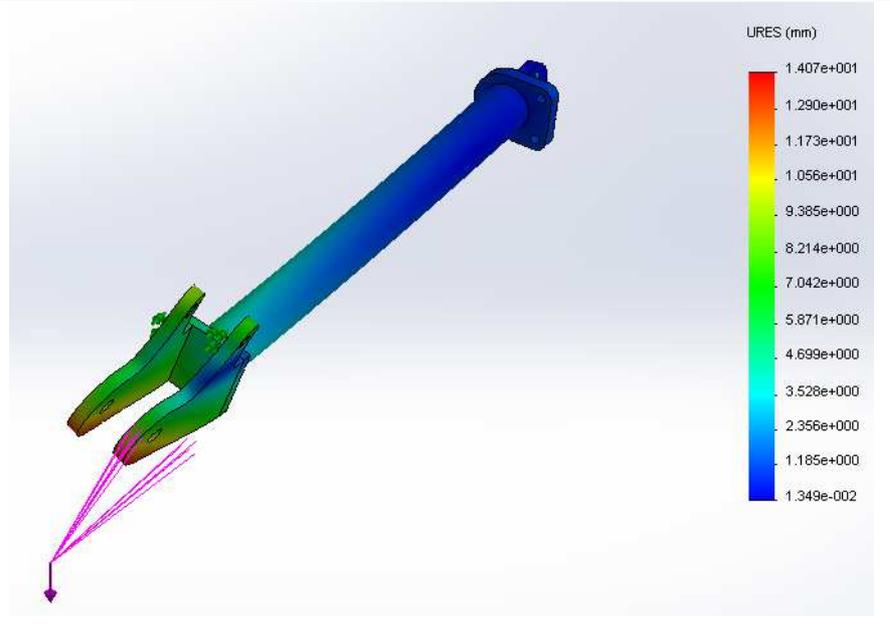
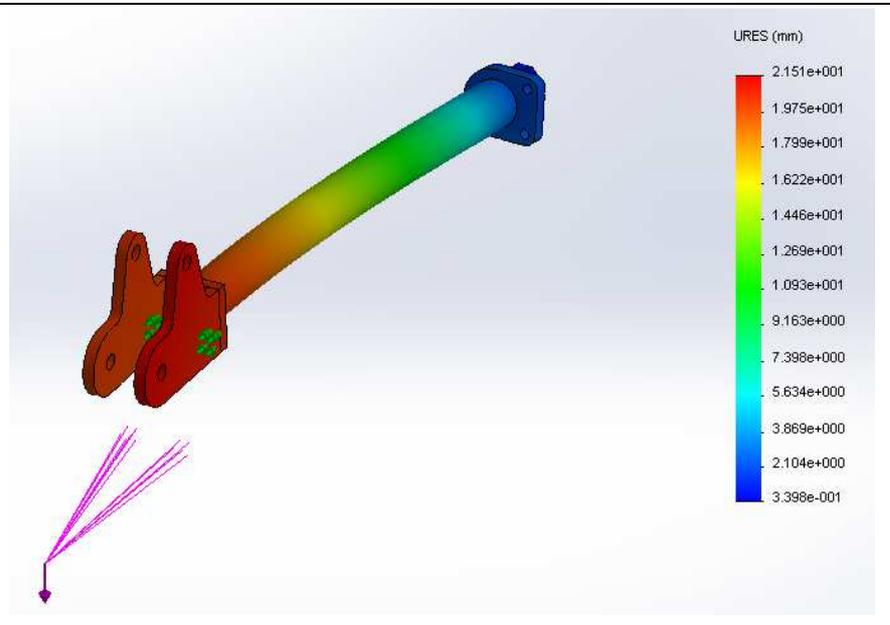
Tabla 33. Desplazamientos del modelo de antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

Los desplazamientos, como en el resto de estudios del antebrazo realizados, son máximos en el extremo libre del mismo y mínimos en la articulación del codo. Se puede observar que el desplazamiento máximo obtenido es, en comparación a la longitud del elemento, despreciable.

5.1.4 Estudio de pandeo.

Como en los casos anteriores se ha analizado el posible pandeo del antebrazo. Se muestran los primeros cuatro modos de pandeo:

Análisis del antebrazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	-689,84	

<p>2</p>	<p>-398,23</p>	 <p>URES (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.407e+001 1.290e+001 1.173e+001 1.056e+001 9.385e+000 8.214e+000 7.042e+000 5.871e+000 4.699e+000 3.528e+000 2.356e+000 1.185e+000 1.349e-002
<p>3</p>	<p>92,653</p>	 <p>URES (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.151e+001 1.975e+001 1.799e+001 1.622e+001 1.446e+001 1.269e+001 1.093e+001 9.163e+000 7.398e+000 5.634e+000 3.869e+000 2.104e+000 3.398e-001

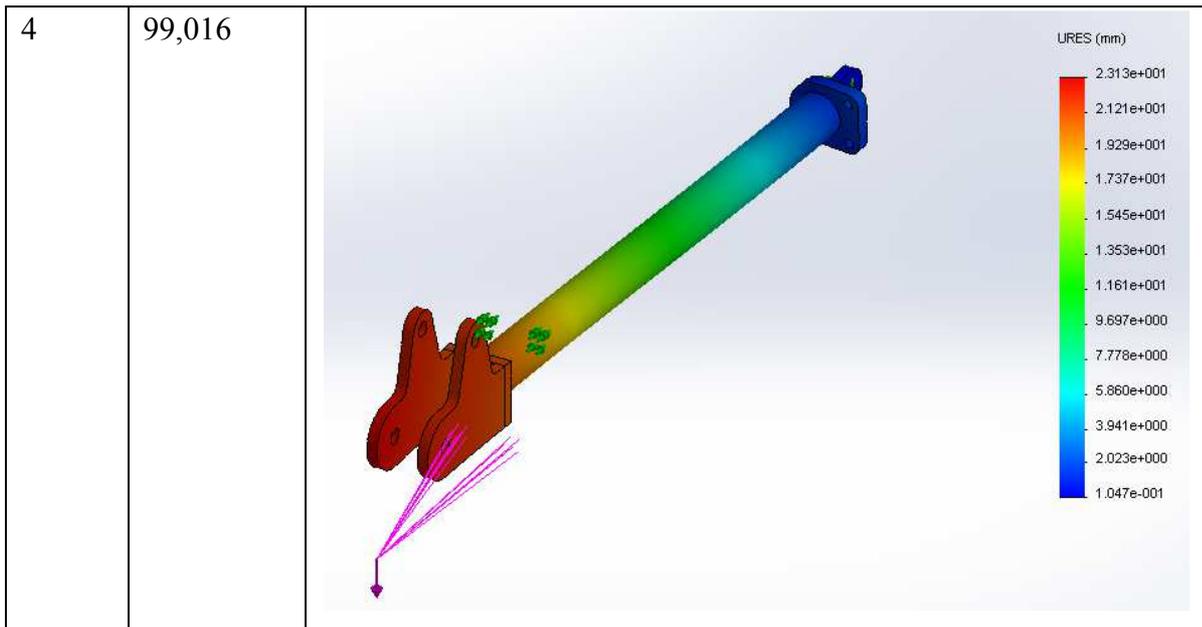


Tabla 34. Resultados del análisis de pandeo para el antebrazo metálico con rótulas aligeradas.

Los tres primeros modos de pandeo son por alabeo torsional de las orejas, mientras que el cuarto es un pandeo global del antebrazo. En ningún caso los coeficientes de seguridad obtenidos suponen un riesgo para la estructura en su uso dadas las cargas aplicadas. En los modos donde se obtuvieron coeficientes negativos no se espera pandeo aunque las cargas se reviertan.

5.2 Brazo

El brazo metálico está compuesto por dos rótulas (formadas por chapas y tubos), cuyos componentes están soldados entre sí, y unidas por medio de un bulón:

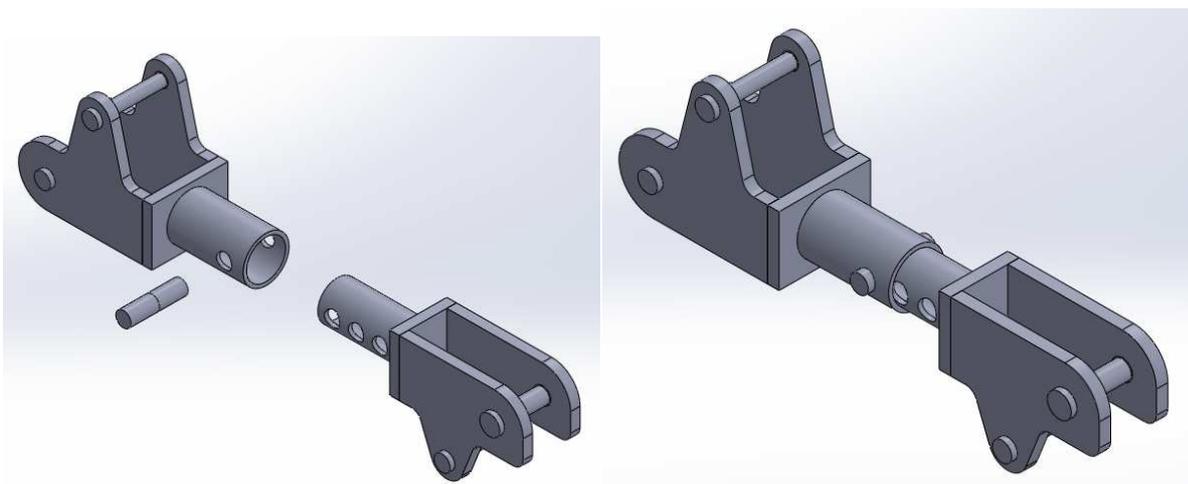
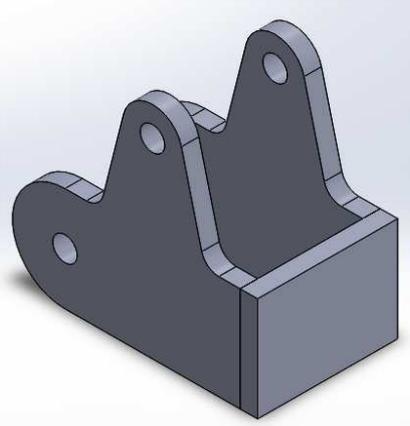
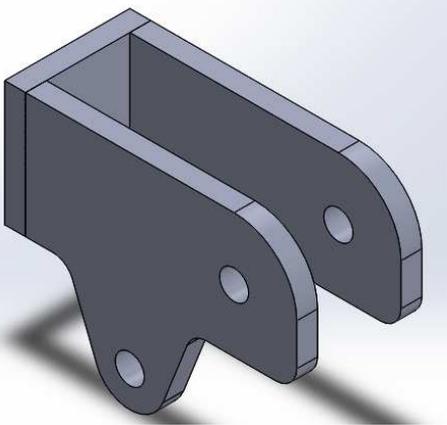


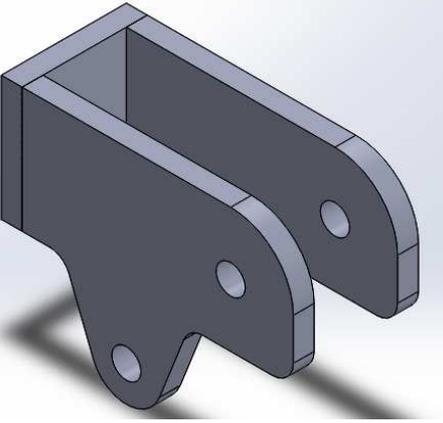
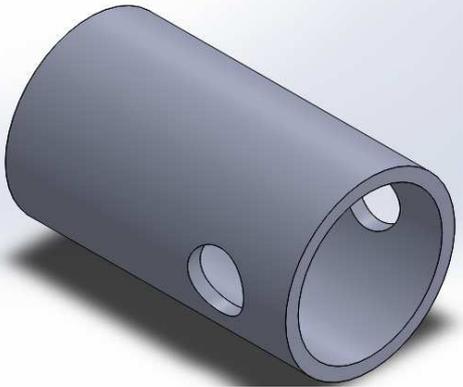
Figura 74. Modelo metálico de brazo con rótulas aligeradas.

Los componentes en detalle y sus propiedades se especifican a continuación.

5.2.1 Componentes.

Las rótulas estarán compuestas por 3 placas metálicas unidas entre sí por medio de soldadura.

Rótula hombro		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Rótula codo		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa

	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Tubo brazo exterior		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

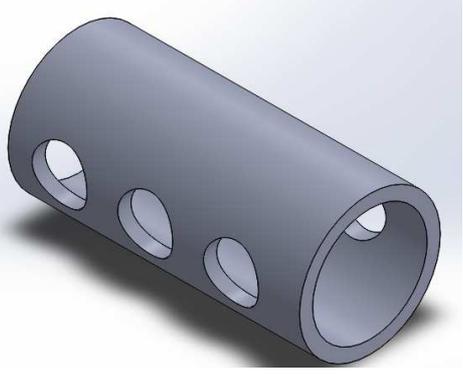
Tubo brazo interior		
	Material	Acero P235 TR1
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	235 MPa
	Límite de tracción	360 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 35. Componentes y propiedades mecánicas del modelo metálico de brazo con rótulas aligeradas.

5.2.2 Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.

Para la rótula del hombro las restricciones (flechas verdes) se han aplicado al bulón por el cual el brazo se une a la articulación del hombro, restringiendo los desplazamientos axiales y radiales y permitiendo el giro. La carga (flechas magenta) aplicada estará en el eje longitudinal de los tubos y sobre el bulón de las orejas a las que se fija el actuador para el antebrazo.

Se aplica un contacto sin penetración en los pares buje-bulón, para estudiar posibles tensiones de contacto. La unión entre las placas metálicas se considera rígida ya que estas estarán soldadas.

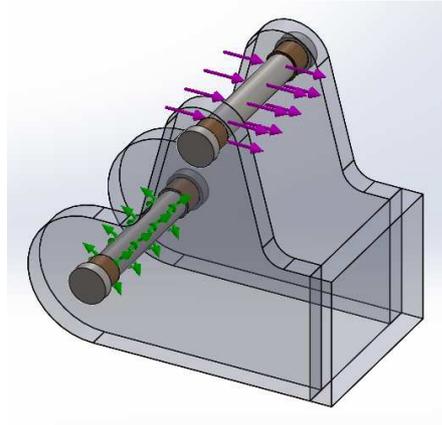


Figura 75. Restricciones y cargas aplicadas en la rótula del hombro para el modelo metálico de brazo con rótulas aligeradas.

Para la rótula del codo se han supuesto condiciones de contacto, carga y restricciones (en verde y aplicadas en el bulón de las orejas para el actuador) similares a la rótula del hombro. La carga (flechas magenta) se aplica en el bulón del codo, tanto las fuerzas como el momento torsor (magenta con proyecciones) que le transmite el antebrazo.

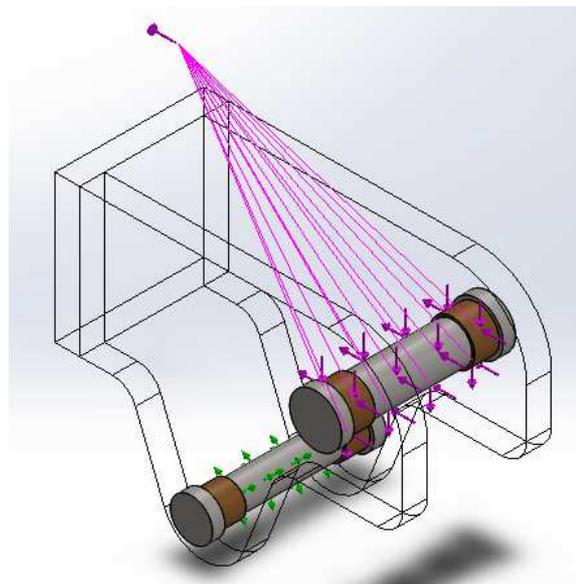


Figura 76. Restricciones y cargas aplicadas en la rótula del codo del brazo metálico con rótulas aligeradas.

Las uniones entre los tubos tanto el exterior como el interior con las respectivas rótulas serán rígidas, de forma que se transmiten los esfuerzos entre piezas. Además la unión de los tubos con el bulón que permite la regulación del brazo será sin penetración, de igual modo entre las caras en contacto de los tubos. Por último, se ha añadido el efecto de la gravedad (flecha roja).

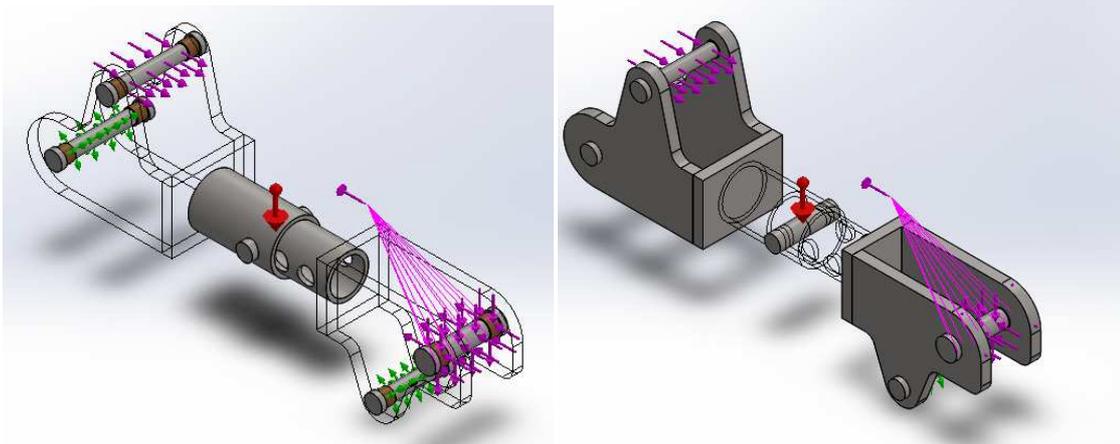


Figura 77. Vista general de las restricciones y cargas aplicadas al modelo metálico de brazo con rótulas aligeradas.

5.2.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Para el estudio se ha empleado una malla fina de tetraedros basada en curvatura, con el fin de obtener resultados óptimos. Además, se ha utilizado un mallado fino en zonas que lo requerían.

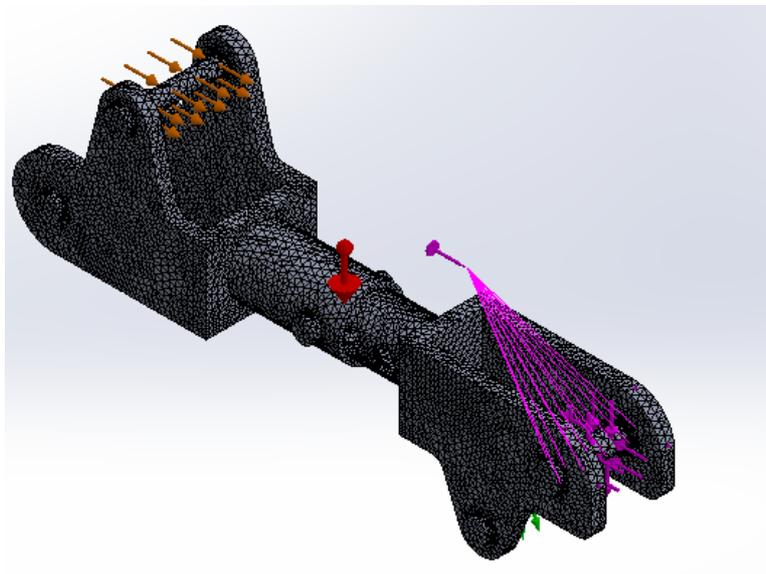


Figura 78. Malla del modelo de brazo metálico con rótulas aligeradas.

5.2.3.1 Tensiones.

Una vez ejecutado el estudio se han obtenido las siguientes tensiones:

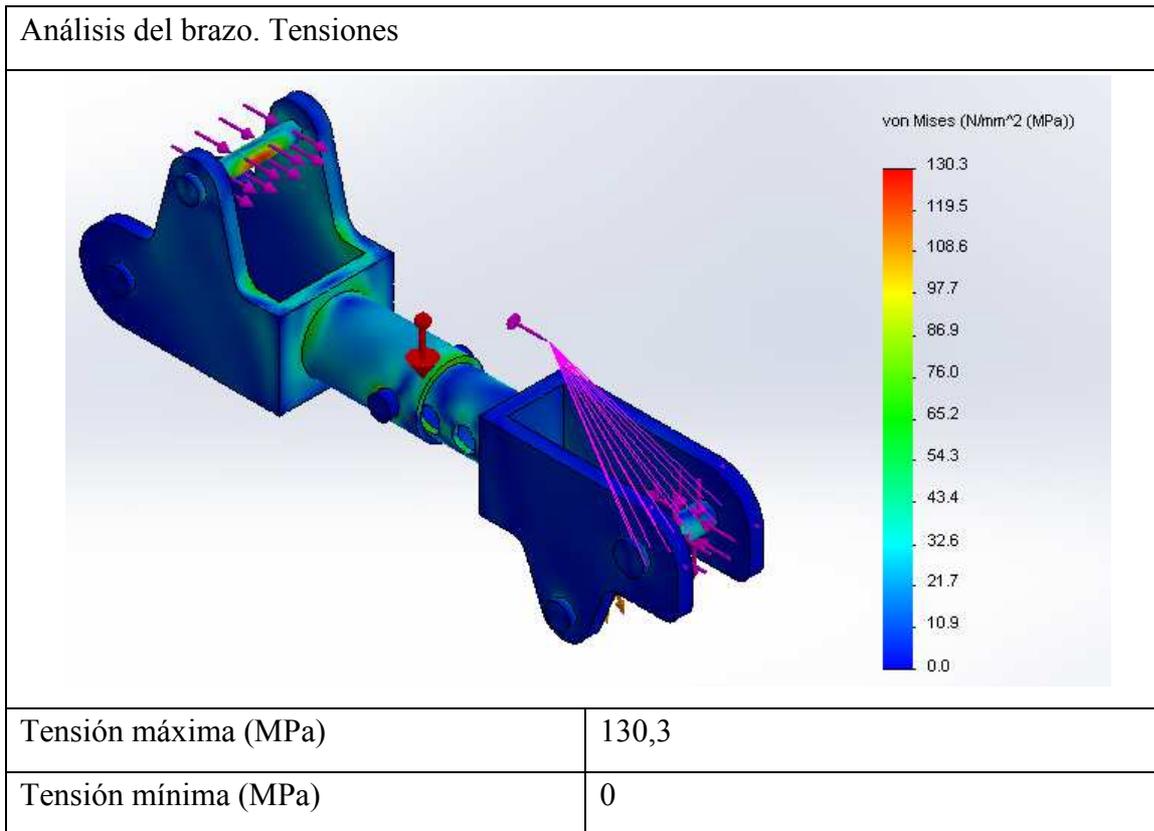


Tabla 36. Tensión de Von Mises para el modelo de brazo metálico con rótulas aligeradas.

Para observar como se distribuye la tensión en el interior del agujero donde se coloca el bulón, se ha ocultado éste en la siguiente imagen.

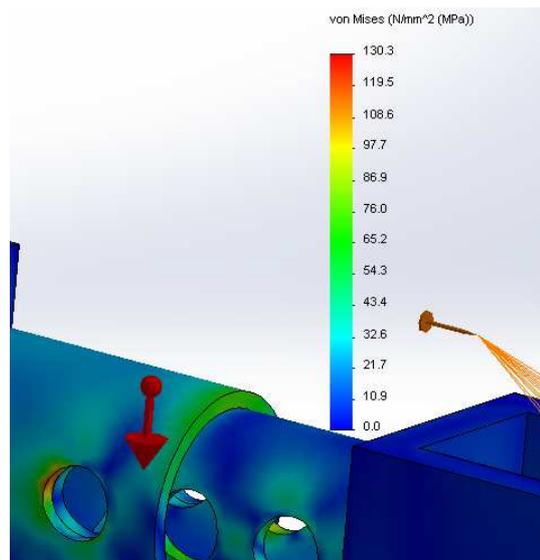


Figura 79. Detalle de las tensiones en los agujeros del perfil del brazo metálico con rótulas aligeradas.

La tensión máxima se da en el interior de los agujeros del tubo externo donde contacta con el tubo interior y el bulón, y en los bujes del actuador del brazo. Estas tensiones son inferiores al límite elástico de los materiales empleados.

5.2.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos obtenidos han sido:

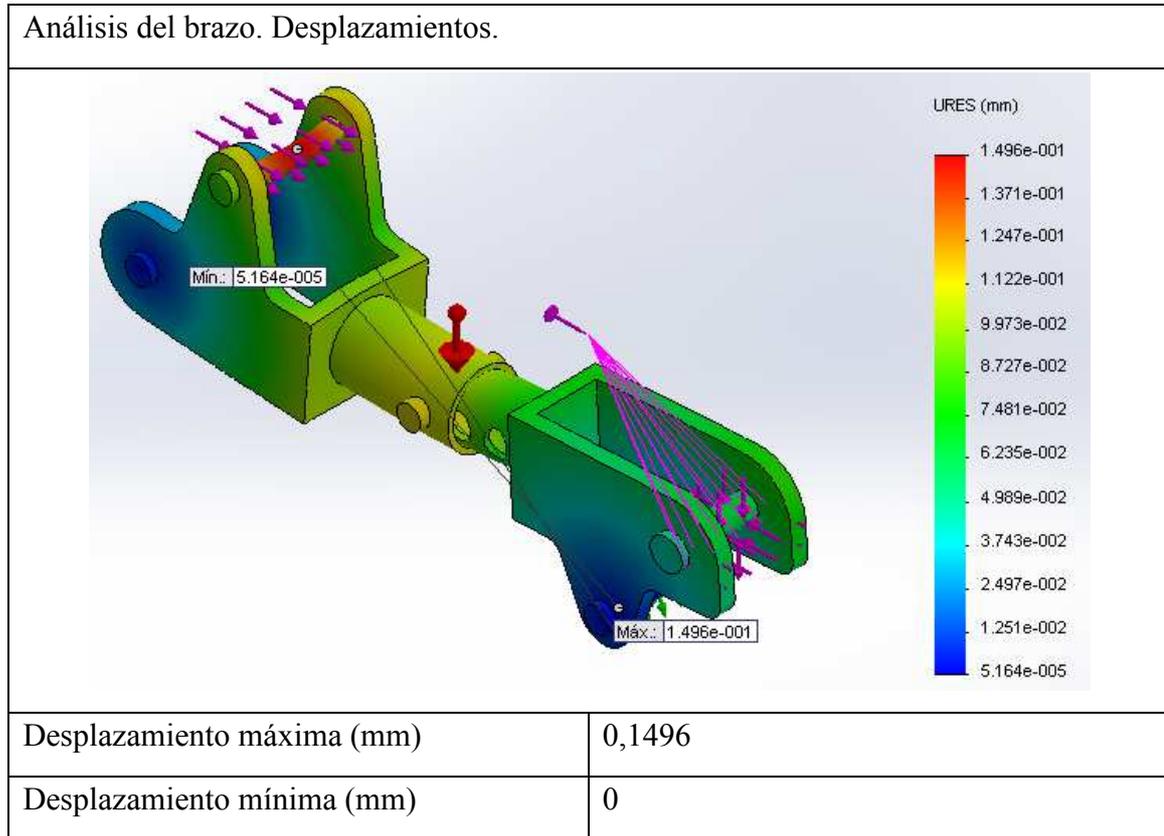
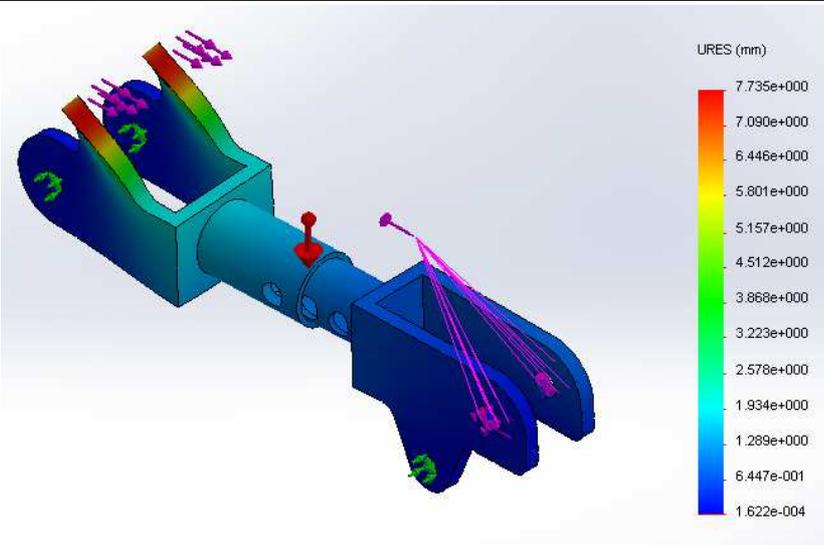
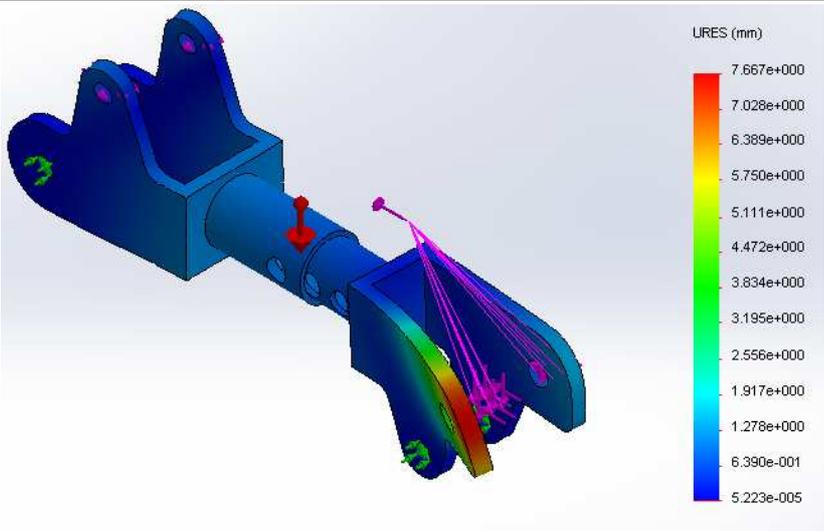


Tabla 37. Desplazamientos para el modelo de brazo metálico con rótulas aligeradas.

Los mayores desplazamientos se dan en el bulón sobre el que ejerce la fuerza el actuador del antebrazo, en las orejas superiores y, seguidamente, en la zona central del brazo.

5.2.4 Estudio de pandeo.

Para realizar el estudio de pandeo se han suprimido el tornillo los bujes y los bulones, y se han aplicado las cargas y las fuerzas directamente sobre las orejas. Los resultados han sido los siguientes:

Análisis del brazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coefficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	-566,01	
2	214,67	

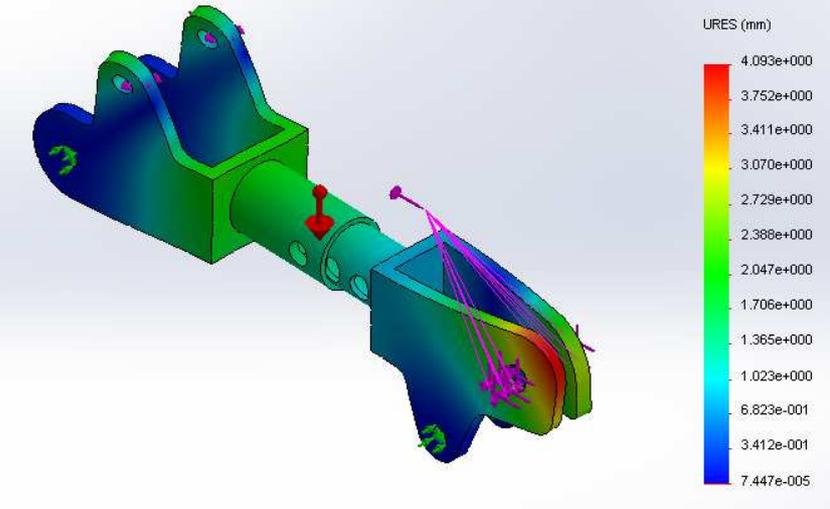
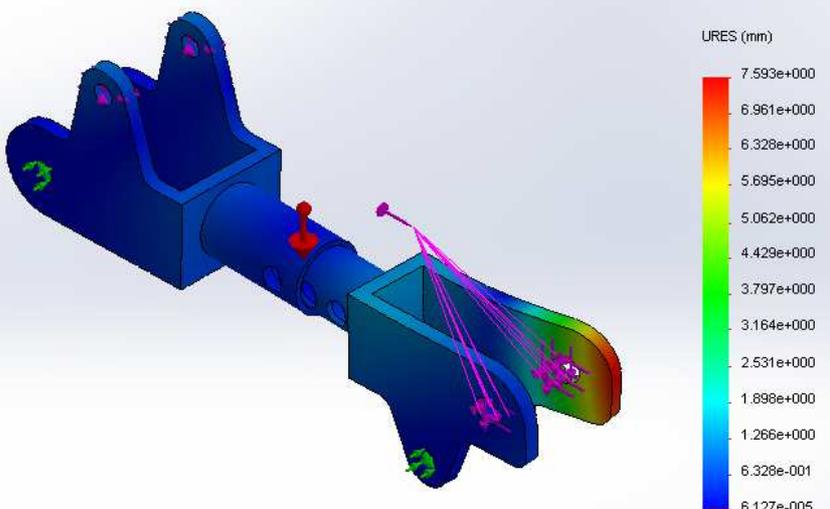
3	265,87	
4	337,85	

Tabla 38. Resultados del análisis de pandeo para el brazo metálico con rótulas aligeradas.

Los factores de seguridad son lo suficientemente elevados como para que no se produzca pandeo y, en el caso del coeficiente de seguridad negativo, indica que no se prevé pandeo ni aunque se revirtieran todas las cargas.

6 Soporte del antebrazo.

Se llevará a cabo un estudio del soporte sobre el que el usuario apoya el antebrazo, con el fin de determinar que las tensiones que se dan para la carga del brazo no superan los límites del material y que las deformaciones son aceptables.

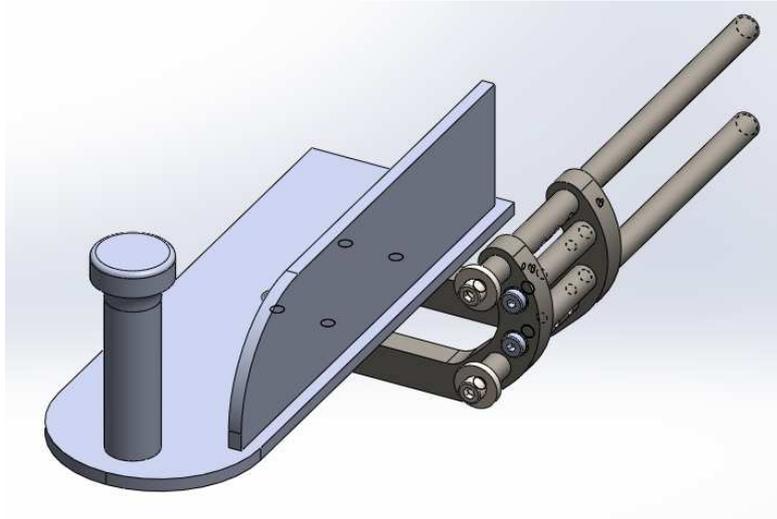
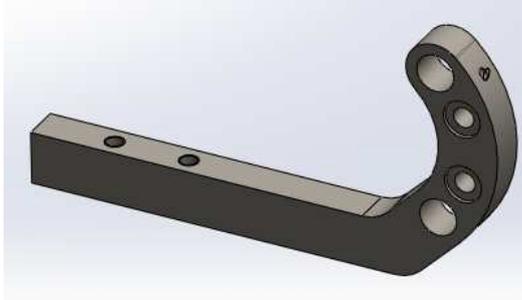
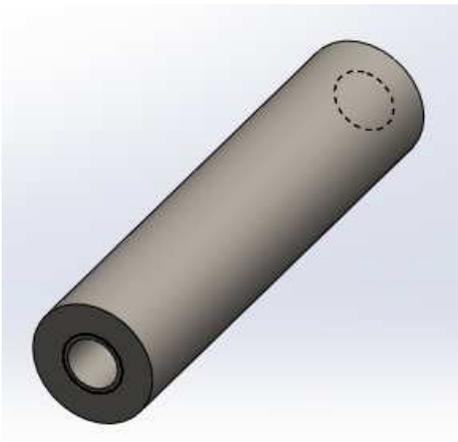


Figura 80. Soporte del antebrazo.

Las diferentes partes a incluir en el análisis y sus propiedades se detallan a continuación. Se han suprimido los materiales de tornillería, quedan fuera del análisis.

6.1 Componentes.

Guía		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Enganche de la guía		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Vástago de enganche entre guías		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

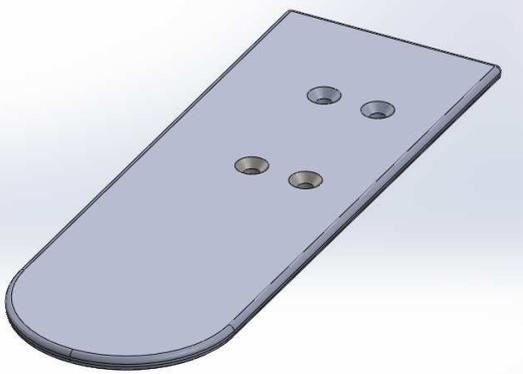
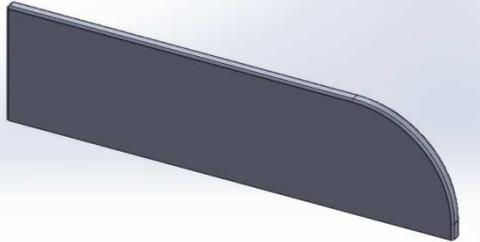
Soporte del reposabrazos		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29
Placa auxiliar del reposabrazos		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 39. Componentes y propiedades mecánicas del soporte para el antebrazo.

6.2 Condiciones de contorno y de carga aplicadas al modelo.

Para ejecutar el análisis se deben aplicar restricciones y cargas al modelo. La restricción (flechas verdes) se ha impuesto en la cara posterior de las guías, donde se uniría a la rotula del codo mediante roscado, de manera que no permite giro ni desplazamiento alguno, quedando todo el soporte del antebrazo en voladizo. Además, se ha impuesto como restricción (en verde) el desplazamiento en la dirección en la que el soporte avanza y retrocede sobre uno de los enganches de la guía para evitar dificultades numéricas del solver por restricciones insuficientes. En cuanto a las cargas, se ha colocado el peso (flechas magenta) correspondiente al brazo sobre el soporte del antebrazo y en dirección perpendicular al eje de las guías. Asimismo, se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad (flecha roja) sobre el conjunto. Como condiciones de contacto entre componentes se ha impuesto una unión rígida entre el soporte del reposabrazos y la placa auxiliar (estarán soldados entre sí) así como en los pares soporte del antebrazo-enganche de la guía y enganche de la guía-vástago, que irán atornilladas, dado que se han suprimido los materiales de tornillería. En cuanto al par enganche de la guía-guía se ha dispuesto un contacto sin penetración, puesto que el enganche desliza sobre ésta última sin ser ambas piezas solidarias.

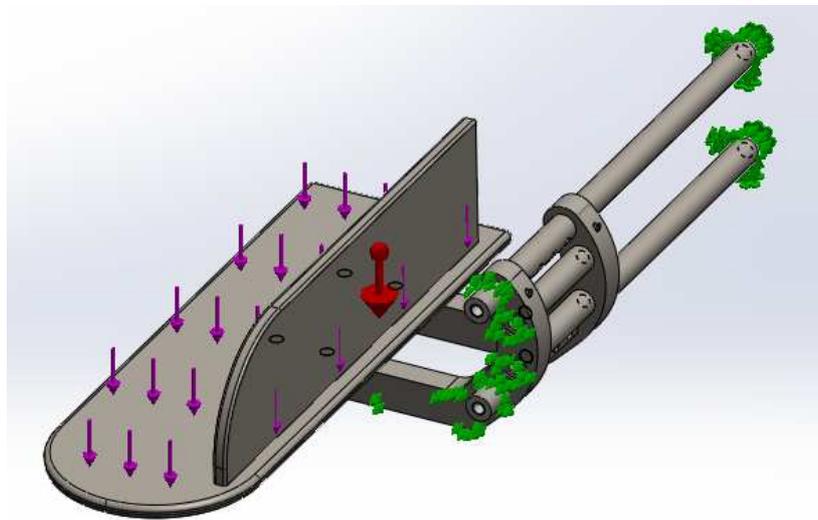


Figura 81. Vista general de las restricciones y cargas aplicadas al modelo del soporte del antebrazo.

6.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Para el estudio se ha empleado una malla de tetraedros basada en curvatura, con el fin de obtener resultados óptimos. También se han aplicado mallados finos en zonas de redondeos o poco espesor que así lo requerían.

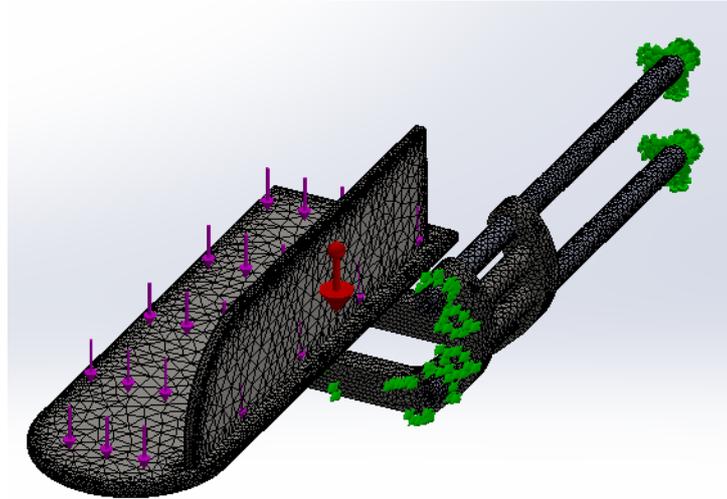


Figura 82. Malla del modelo del soporte para el antebrazo.

6.3.1 Tensiones.

Tras efectuar el estudio se han obtenido los siguientes resultados:

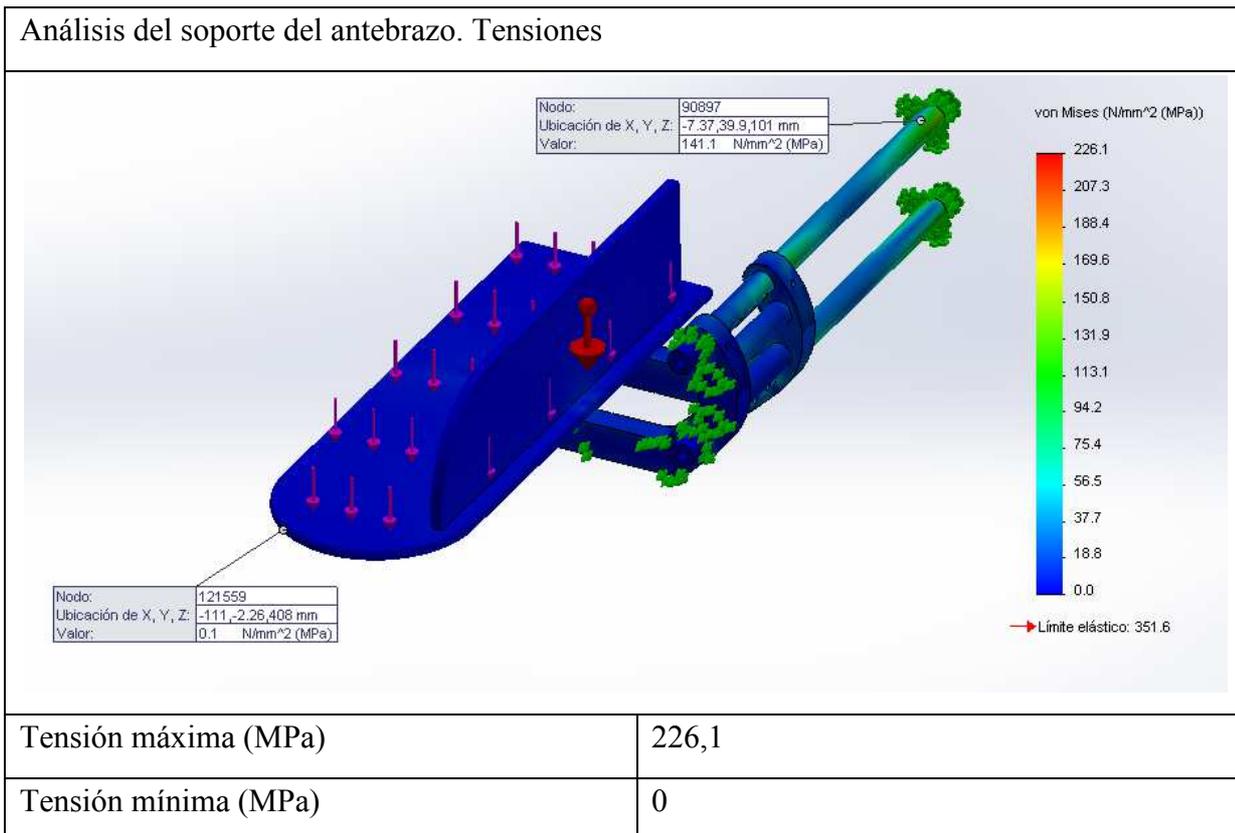


Tabla 40. Tensión de Von Mises para el modelo del soporte del antebrazo.

La tensión es máxima en el extremo inicial de la guía, donde se dan los efectos combinados de la flexión y la torsión que provoca la carga, efecto que puede observarse en la distribución de tensiones que se da sobre la misma. Por otra parte, las tensiones en el soporte del antebrazo

son mínimas, pues el espesor de la chapa en él es suficientemente grande. En cualquier caso no se alcanza el límite elástico del material en ninguna pieza.

6.3.2 Desplazamientos.

Los desplazamientos que se obtuvieron de la simulación fueron:

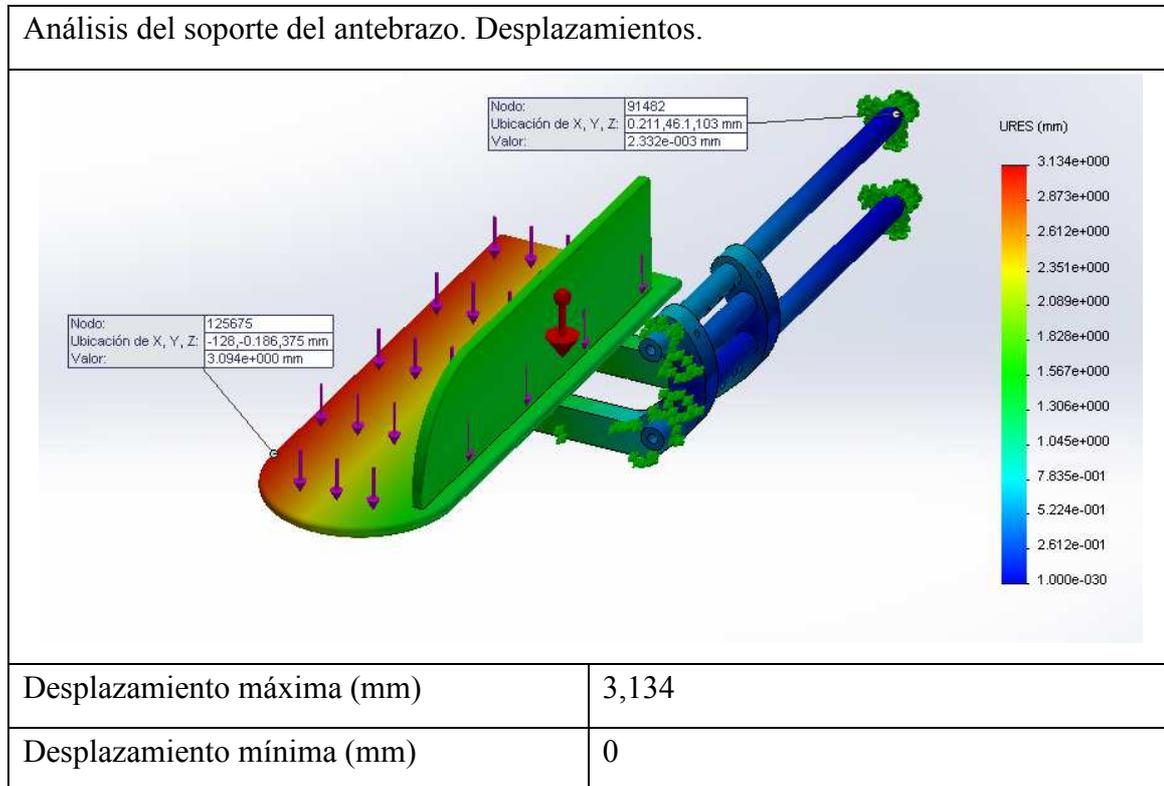


Tabla 41. Desplazamientos del modelo del soporte del antebrazo.

Los desplazamientos, como era de esperar, resultan máximos en el extremo más alejado al empotramiento y resultan ínfimos cerca de dicho empotramiento. Asimismo, para el desplazamiento máximo se obtienen resultados aceptables teniendo en cuenta las dimensiones del conjunto.

6.4 Estudio de pandeo.

Se ha llevado a cabo un estudio de pandeo ya que puede darse compresión en las guías. No obstante se ha eliminado la restricción impuesta en el enganche de la guía, pues al realizar el estudio de pandeo SolidWorks toma un contacto de unión rígida por defecto, luego no habrá problemas de inestabilidad del solver. Se especifican a continuación los 4 primeros modos de pandeo:

Análisis del soporte del antebrazo. Pandeo		
Modo de pandeo	Coefficiente de seguridad	Resultado gráfico
1	-5318	
2	-4024,5	
3	-3876,9	

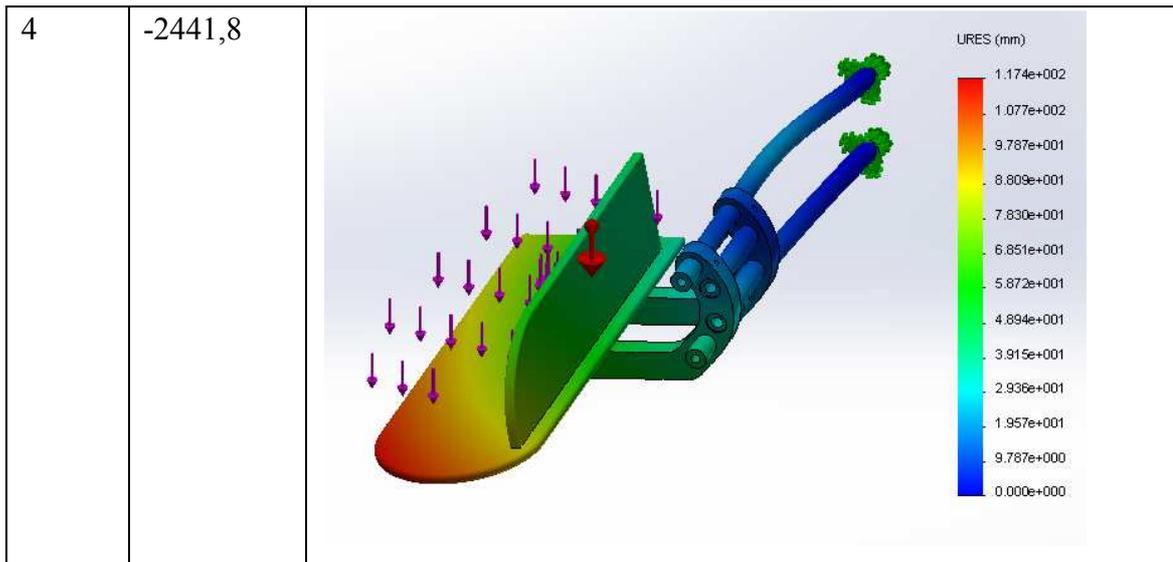


Tabla 42. Resultados del análisis de pandeo para el soporte del antebrazo.

Se comprueba que los factores de seguridad al pandeo son muy altos. No habrá problemas de pandeo. El coeficiente negativo indica que no se prevé pandeo aunque se reviertan las cargas.

7 Pala.

7.1 Componentes.

Pala.		
	Material	Acero AISI 1020
	Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
	Módulo elástico	200000 MPa
	Límite elástico	355 MPa
	Límite de tracción	420,51 MPa
	Densidad	7900 Kg/m ³
	Módulo cortante	77000 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,29

Tabla 43. Propiedades mecánicas de la pala para el enganche de la carga.

La pala está compuesta por dos chapas soldadas entre sí. A efectos de simulación se tomará como un único componente, pues la unión entre ambas se hace con penetración total.

7.2 Condiciones de contorno y de cargas aplicadas al modelo.

Para el correspondiente estudio se ha tomado como restricción (flechas verdes) los desplazamientos axial y radial en el agujero por el que se sujeta la pala mediante un bulón, no impidiendo el giro. En cuanto a las cargas, se ha colocado el equivalente al peso (flechas magenta) que soportará la pala como carga perpendicular a la superficie sobre la que apoya y distribuida sobre ésta. También se ha incluido el efecto de la gravedad (flecha roja), aunque dado el tamaño y peso de la pieza es despreciable.

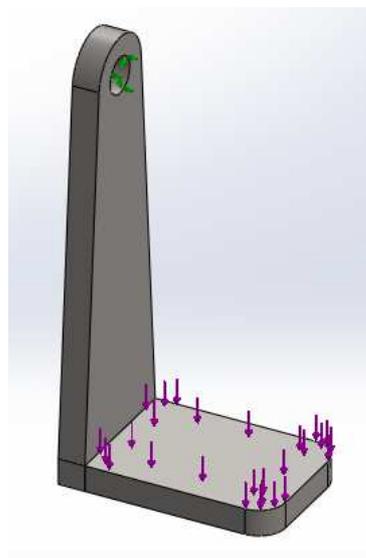


Figura 83. Restricciones y cargas aplicadas al modelo de la pala.

7.3 Estudio estático de tensiones y deformaciones.

Se ha realizado un análisis estático para evaluar la resistencia del modelo, empleando una malla fina tetraédrica basada en curvatura.

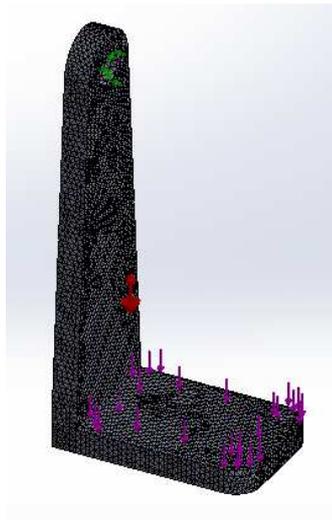


Figura 84. Malla del modelo de la pala.

7.3.1 Tensiones.

Se han obtenido las siguientes tensiones:

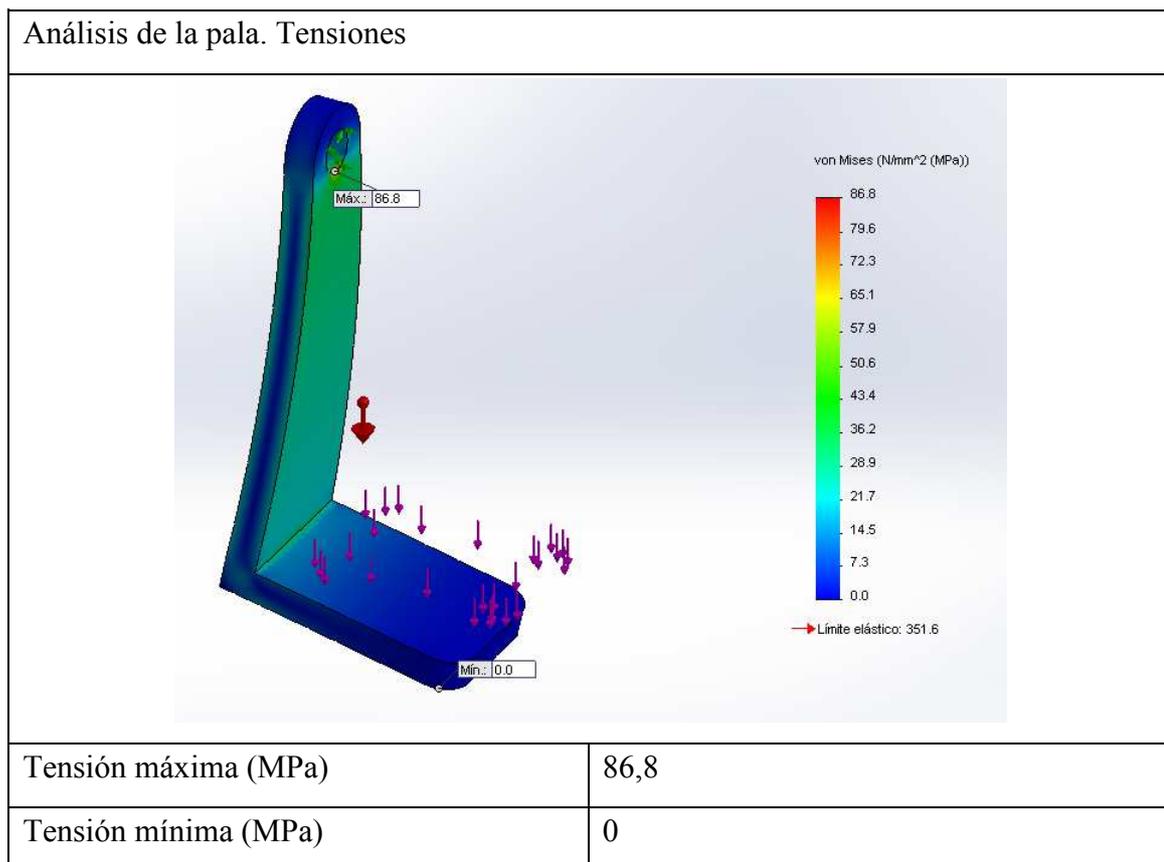


Tabla 44. Tensión de Von Mises para el modelo de la pala.

Las máximas tensiones se dan en el agujero por el cual se fija la pala. Aún así, resultan pequeñas en comparación a las propiedades mecánicas del material.

7.3.2 Desplazamientos.

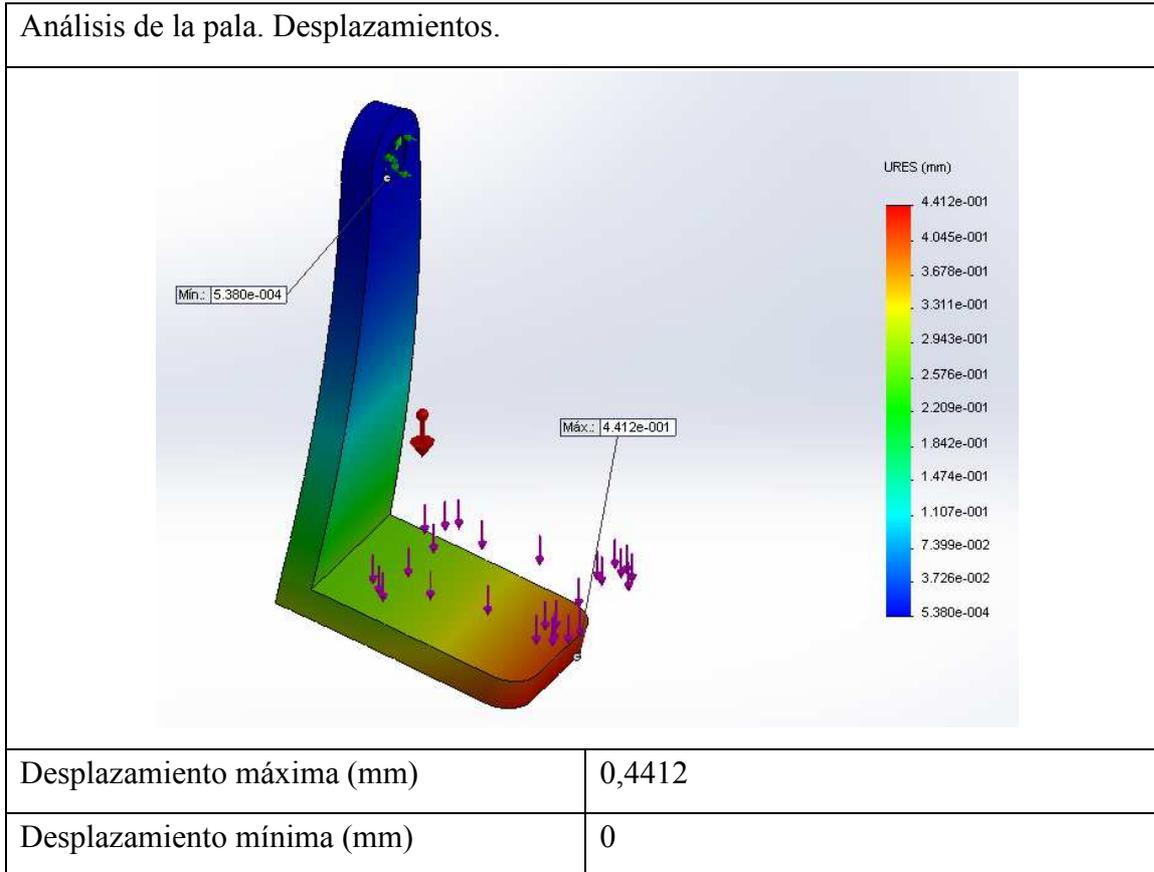


Tabla 45. Desplazamientos del modelo de la pala.

Los desplazamientos, como es de esperar, son máximos la zona más alejada del agujero (donde se fija la pala). Los valores obtenidos resultan aceptables, ya que el desplazamiento resultante es pequeño.

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Anexo III: Catálogo del Actuador

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Modello ALI4

- Motore a magneti permanenti CE
- Motore A.C. monofase-trifase CE
- Riduttore vite senza fine - ruota elicoidale
- Stelo filettato trapezoidale o a ricircolo di sfere (VRS)
- Asta traslante in acciaio cromato
- Lubrificazione a grasso
- Attuatore IP 65, testato secondo norma CEI EN 60529 motore C.A. IP55 standard - IP65 a richiesta motore C.C. IP44 standard - IP65 a richiesta
- Temperatura di funzionamento -10°C +60°C
- Impiego intermittente S3 30% (5 min) a 30°C*
- Fine corsa, potenziometro ed encoder a richiesta

(*) Per impieghi diversi contattare il Ns. Ufficio Tecnico

Model ALI4

- Permanent magnet motor CE
- Three phase or single phase motor CE
- Worm gearbox
- Acme lead screw or ballscrew (VRS)
- Chrome plated steel push rod
- Grease lubricated
- Actuator IP65, tested according to rule CEI EN 60529 A.C. motor IP 55 standard - IP65 on request D.C. motor IP 44 standard - IP65 on request
- Working temperature range -10°C +60°C
- Intermittent duty S3 30% (5 min) a 30°C*
- Limit switches, potentiometer and encoder on request

(*) For any special duty please contact our technical dept.

ALI4 - (Vac)												
Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]		
										ALI4-F	ALI4	
2100	93	M01	IEC71	0,55	2800	1.4	18	8	0,31	1000	1040	
3900	47	M02	IEC71	0,55	2800	1.4	18	4	0,29	500	770	
5300	23	M03	IEC71	0,37	1400	1.4	18	4	0,29	500	660	
8600	9	M04	IEC71	0,25	1400	1:10	18	4	0,28	500	520	
9400	6	M05	IEC63	0,18	1400	1:16	18	4	0,26	495	495	
10000	3	M06	IEC63	0,13	1400	1:30	18	4	0,22	485	485	
10000	2	M07	IEC56	0,09	1400	1:50	18	4	0,20	480	480	

ALI4-VRS (ballscrew 16x5) (Vac)												
Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]		
										ALI4-F	ALI4	
2500	58	M08	IEC63	0,25	2800	1.4	16	5	0,77	625	825	
3100	29	M09	IEC63	0,18	1400	1.4	16	5	0,77	625	825	
3400	23	M10	IEC56	0,14	2800	1:10	16	5	0,74	625	780	
5000	15	M11	IEC56	0,14	2800	1:16	16	5	0,38	620	620	
6000	7	M12	IEC56	0,09	1400	1:16	16	5	0,68	620	620	
7500	4	M13	IEC56	0,09	1400	1:30	16	5	0,59	570	570	

ALI4-VRS (ballscrew 20x5) (Vac)												
Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]		
										ALI4-F	ALI4	
3000	58	M32	IEC63	0,25	2800	1.4	20	5	0,77	625	880	
3800	29	M33	IEC63	0,18	1400	1.4	20	5	0,77	625	850	
4200	23	M34	IEC56	0,14	2800	1:10	20	5	0,74	625	850	
6000	15	M35	IEC56	0,14	2800	1:16	20	5	0,38	620	800	
7500	7	M36	IEC56	0,09	1400	1:16	20	5	0,68	620	800	
9000	4	M37	IEC56	0,09	1400	1:30	20	5	0,59	570	720	

ALI4 24 Vdc												
Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]		
										ALI4-F	ALI4	
600	100	M20	D.85		3000	1.4	18	8	0,31	1000	1040	
1100	50	M21	D.85		3000	1.4	18	4	0,29	500	1040	
2800	20	M22	D.85		3000	1:10	18	4	0,28	500	905	
4100	13	M23	D.85		3000	1:16	18	4	0,26	500	750	
6800	7	M24	D.85		3000	1:30	18	4	0,22	500	580	
10000	4	M25	D.85		3000	1:50	18	4	0,20	480	480	

ALI4 - VRS (ballscrew 16x5) 24 Vdc

Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]	
										ALI4-F	ALI4
2400	63	M26	D.85		3000	1.4	16	5	0,77	625	797
3400	25	M27	D.85		3000	1:10	16	5	0,74	625	897
3900	16	M28	D.85		3000	1:16	16	5	0,68	625	741
6800	8	M29	D.85		3000	1:30	16	5	0,59	575	575
7500	5	M30	D.85		3000	1:50	16	5	0,53	555	555

ALI4 - VRS (ballscrew 20x5) 24Vdc

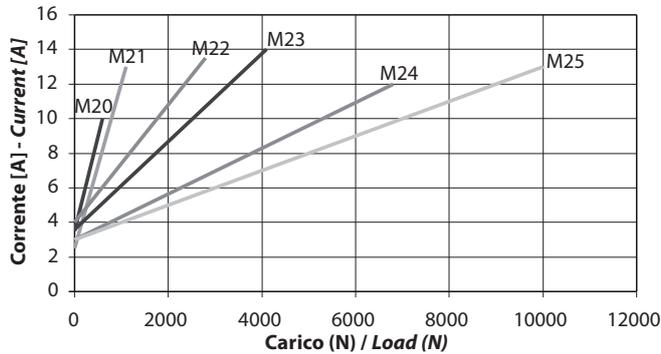
Fmax Fmax (N)	Velocità Speed (mm/s)	Versione Version	Taglia motore Motor size	Potenza motore Motor power (KW)	Giri motore Motor speed (rpm)	Rapporti Riduzione Gearbox Reduction Ratio	D vite Screw D (mm)	Passo Pitch (mm)	Rendimento Efficiency	Corsa max (mm) Max stroke [mm]	
										ALI4-F	ALI4
4300	25	M38	D.85		3000	1:10	20	5	0,74	625	1.000
5000	16	M39	D.85		3000	1:16	20	5	0,68	625	950
9000	8	M40	D.85		3000	1:30	20	5	0,59	575	750
9000	5	M41	D.85		3000	1:50	20	5	0,53	555	660

Nota: Tutti i motori IEC71 sono con flangia ed albero ridotti IEC63.

Note: All motors IEC71 are with reduced motorflange and shaft IEC63.

DIAGRAMMI DI CORRENTE - CURRENT DIAGRAM

Diagramma di corrente motore 24Vdc con vite trapezia
24 Vdc Motor current diagram with acme screw



DIAGRAMMI DI VELOCITÀ - SPEED DIAGRAM

Diagramma di velocità motore 24Vdc con vite trapezia
24 Vdc Motor speed diagram with acme screw

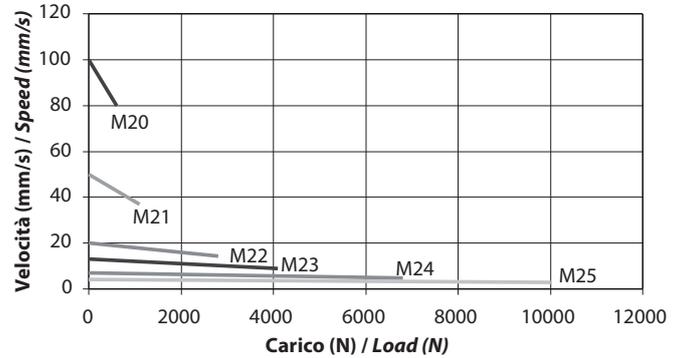


Diagramma di corrente motore 24Vdc con vite ricircolo di sfere VRS 16x5
24 Vdc Motor current diagram with ball screw VRS 16x5

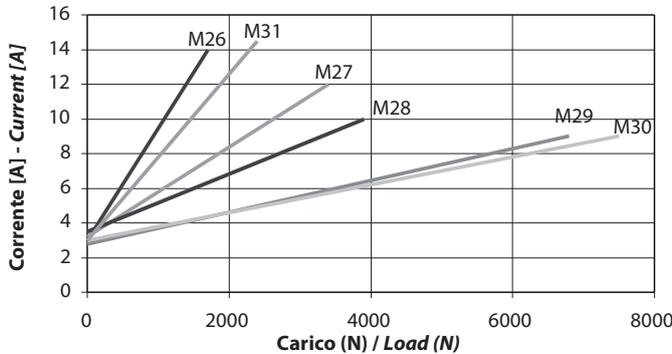


Diagramma di velocità motore 24Vdc con vite ricircolo di sfere VRS 16x5
24 Vdc Motor speed diagram with ball screw VRS 16x5

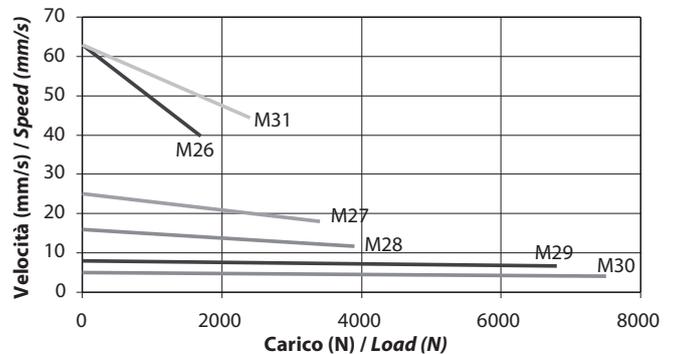


Diagramma di corrente motore 24Vdc con vite ricircolo di sfere VRS 20x5
24 Vdc Motor current diagram with ball screw VRS 20x5

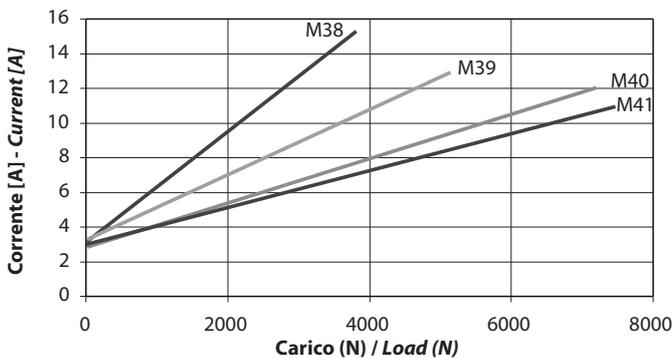
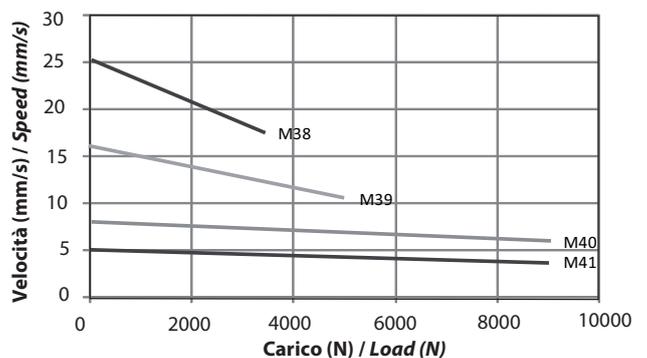


Diagramma di velocità motore 24Vdc con vite ricircolo di sfere VRS 20x5
24 Vdc Motor speed diagram with ball screw VRS 20x5

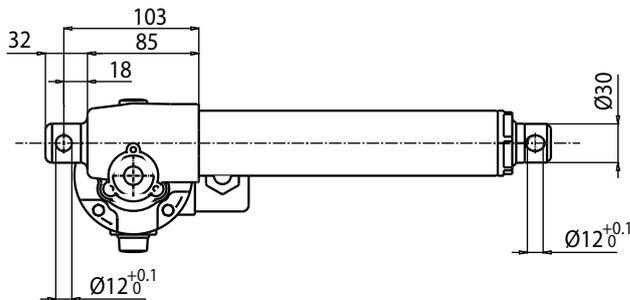
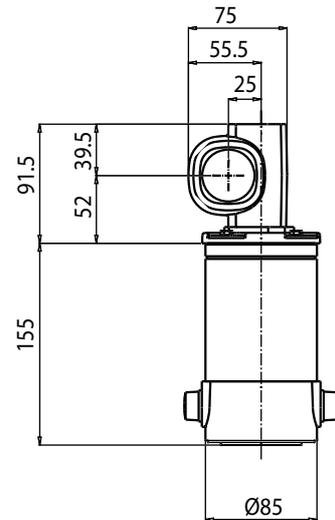
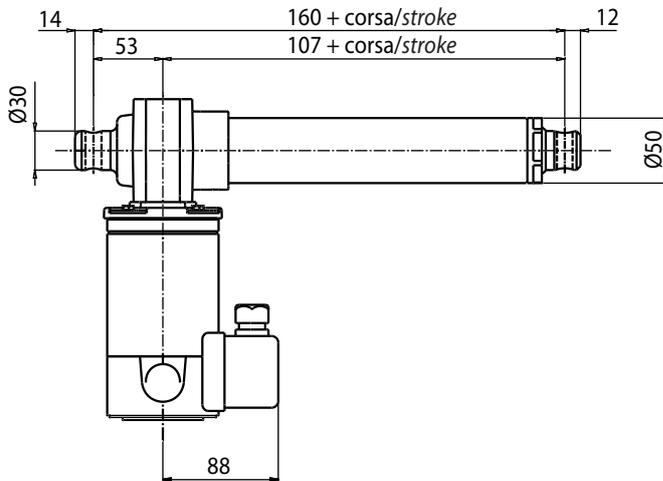


Diagrammi riferiti alla tensione di alimentazione 24Vdc.
 Per tensione 12Vdc raddoppiare il valore di corrente e ridurre il valore di carico del 20%. Per tensione 36Vdc ridurre il valore di corrente del 30% e lasciare inalterato il carico.

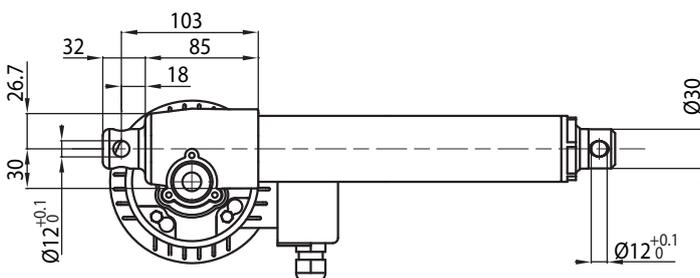
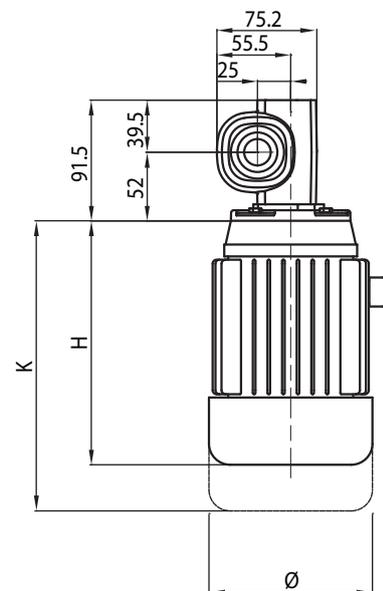
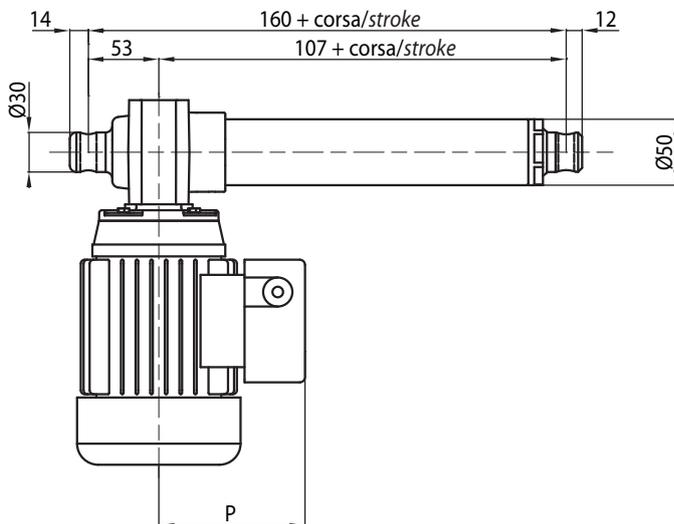
Diagrams valid for 24Vdc power supply.
 For 12Vdc power supply currents are doubled and loads are 20% lower. For 36Vdc power supply currents are 30% lower and loads remain the same.

ATTUATORE SENZA FINE CORSA / ACTUATOR WITHOUT LIMIT SWITCHES

AL14 - versione C.C. / D.C. Version



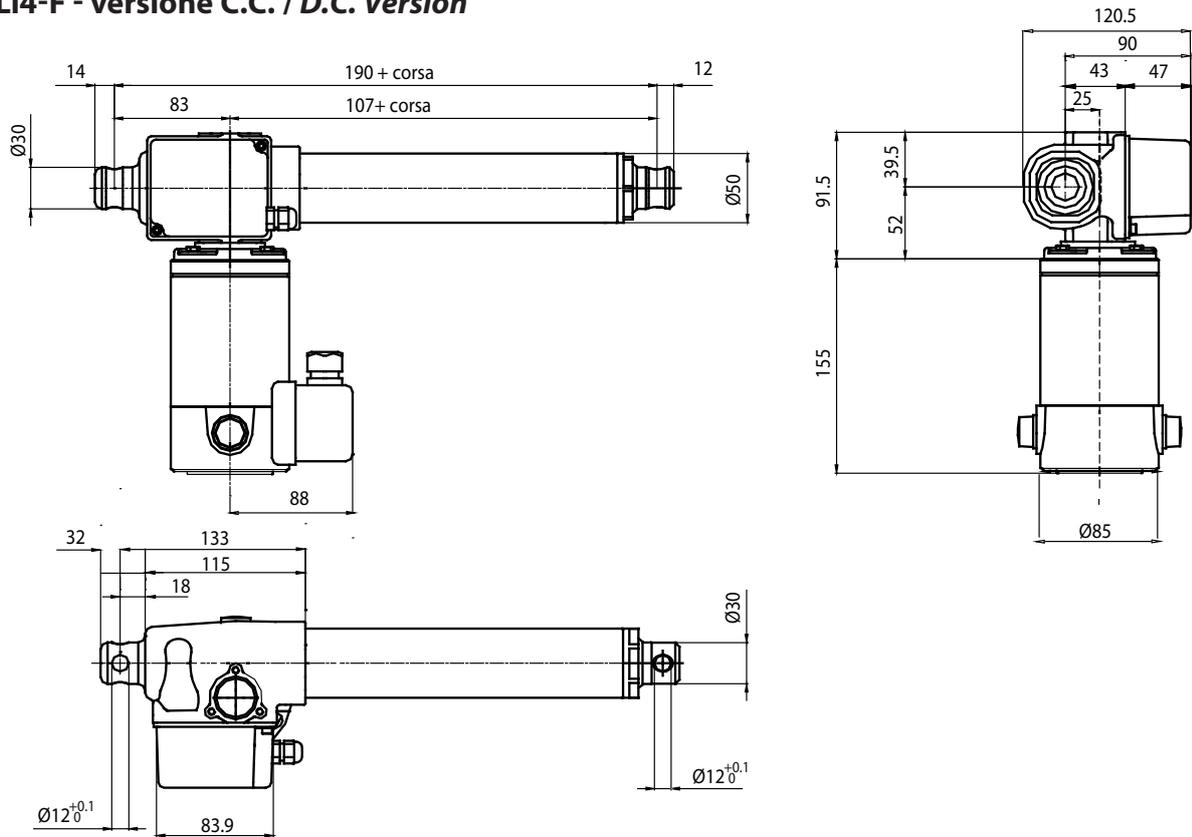
AL14 - versione C.A. / A.C. Version



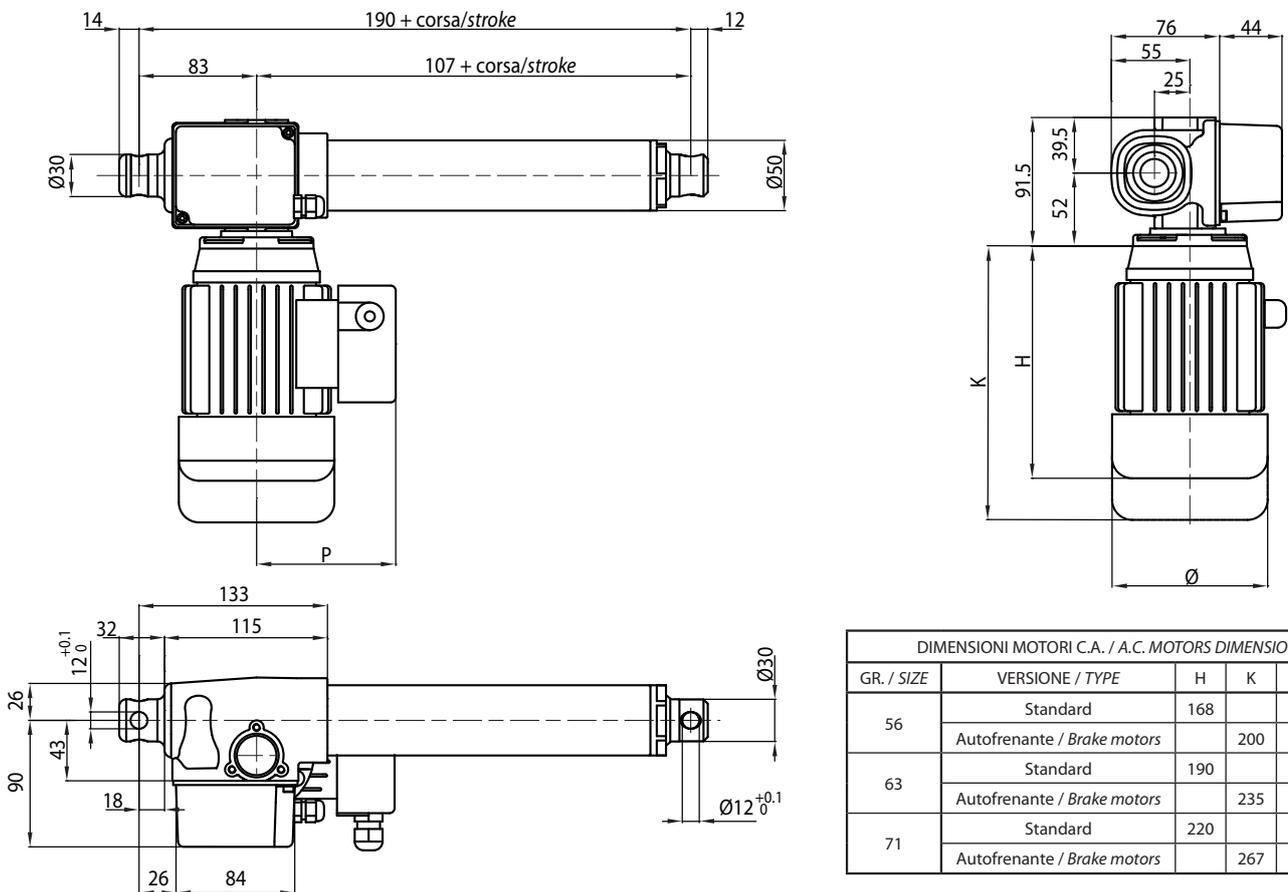
DIMENSIONI MOTORI C.A. / A.C. MOTORS DIMENSIONS					
GR. / SIZE	VERSIONE / TYPE	H	K	Ø	P
56	Standard	168	116	108	
	Autofrenante / Brake motors		200		
63	Standard	190	129	110	
	Autofrenante / Brake motors		235		
71	Standard	220	146	121	
	Autofrenante / Brake motors		267		

ATTUATORE CON FINE CORSA INTEGRATO / ACTUATOR WITH INTEGRATED LIMIT SWITCHES

ALI4-F - versione C.C. / D.C. Version

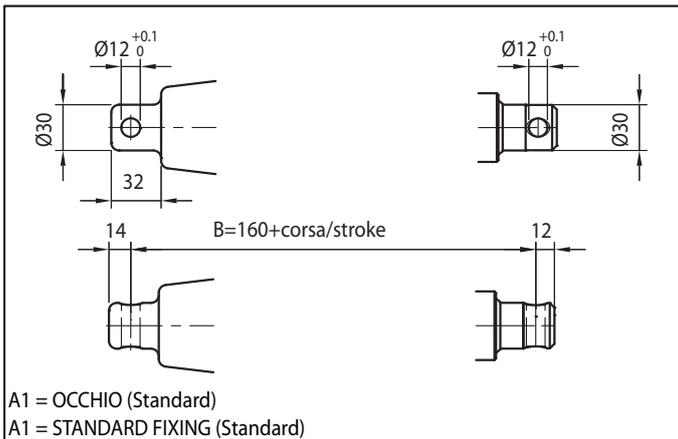


ALI4-F - versione C.A. / A.C. Version

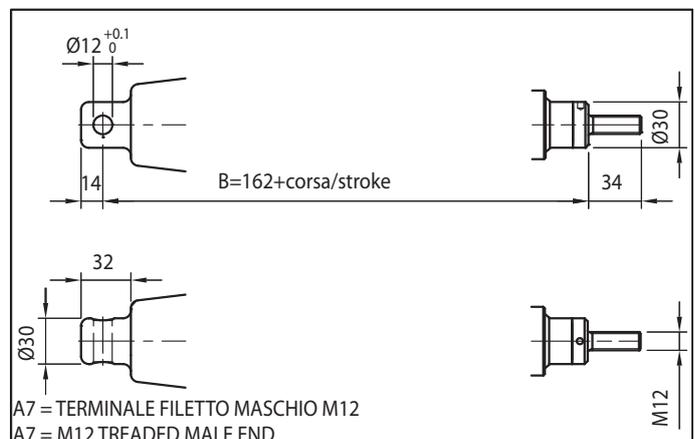
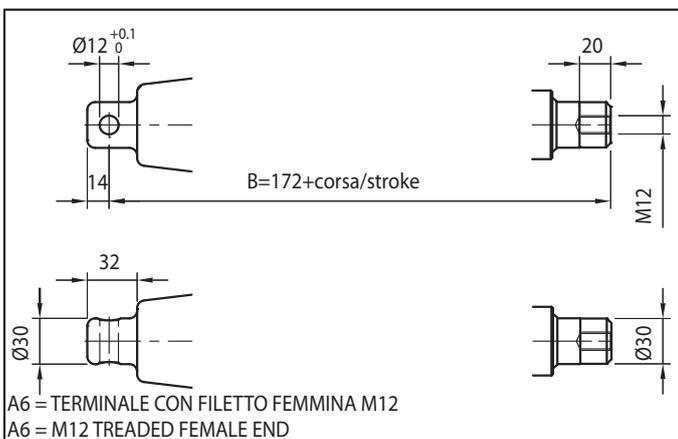
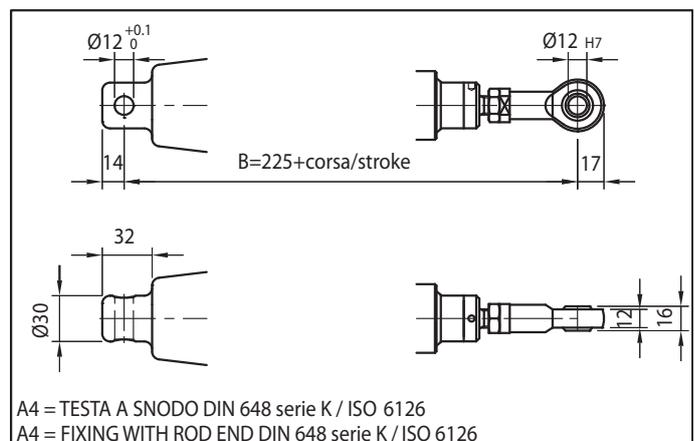
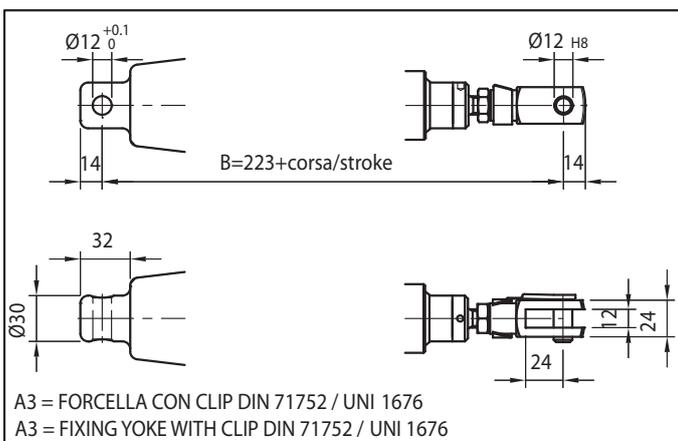
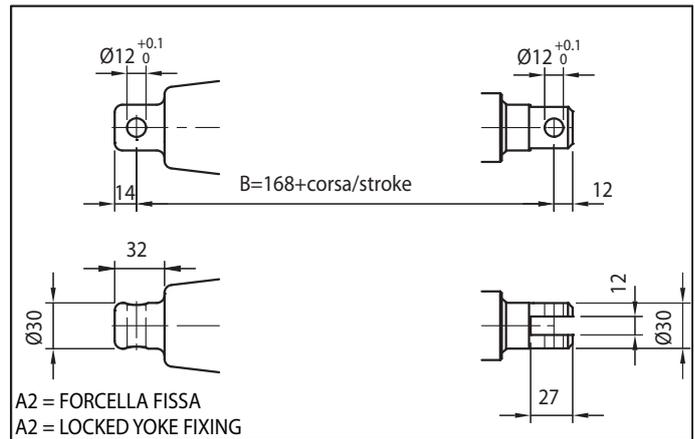


DIMENSIONI MOTORI C.A. / A.C. MOTORS DIMENSIONS					
GR. / SIZE	VERSIONE / TYPE	H	K	Ø	P
56	Standard	168	116	108	
	Autofrenante / Brake motors		200		
63	Standard	190	129	110	
	Autofrenante / Brake motors		235		
71	Standard	220	146	121	
	Autofrenante / Brake motors		267		

Attacchi anteriori



Front ends



Nota: Variazioni quota "B" in base al modello
Nota: "B" dimension variations depending on model

ALI4 = Vedi figure / See pictures
ALI4-F = + 30 mm
ALI4-FCM = + 42,5 mm
con chiocciola di sicurezza "G" aggiungere 30 mm / with safety nut "G" = + 30 mm
(Es. ALI4-F opzione "G" = +30) / (i.e. ALI4-F "G" option = +30)

ALI4-VRS (versione 16x5) = + 25 mm ALI4-VRS (versione 20x5) = + 40 mm
ALI4-VRS-F (versione 16x5) = + 55 mm ALI4-VRS-F (versione 20x5) = + 70 mm
ALI4-VRS-FCM (versione 16x5) = + 53 mm ALI4-VRS-FCM (versione 20x5) = + 68 mm

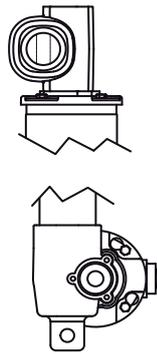
AR0 / AR1 = + 15 mm

Protezione Soffietto / Bellows = + 15 mm
(escluso versione FCM; per versione FCM contattare MecVel)

(excluding FCM version, for version FCM contact MecVel)

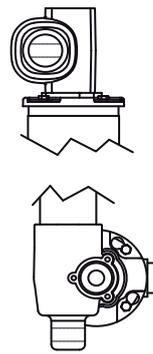
ALI4 - ALI4-F

Attacco posteriore



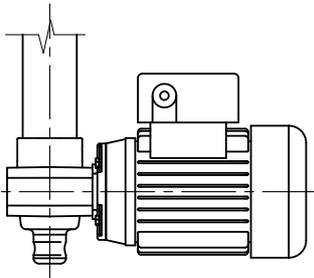
P1
(Standard)

Rear end

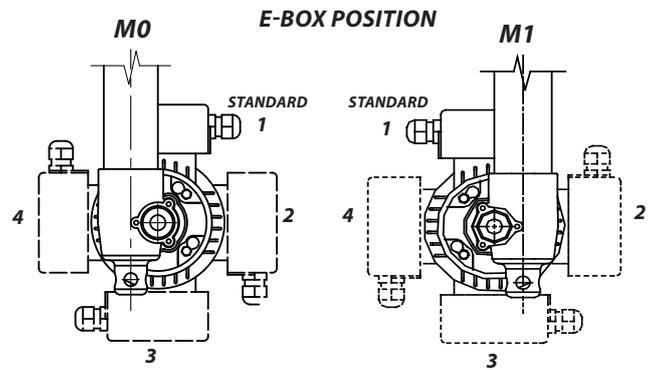


P2
Ruotato di 90°
Rotated through

ORIENTAMENTO MORSETTIERA



ALI4



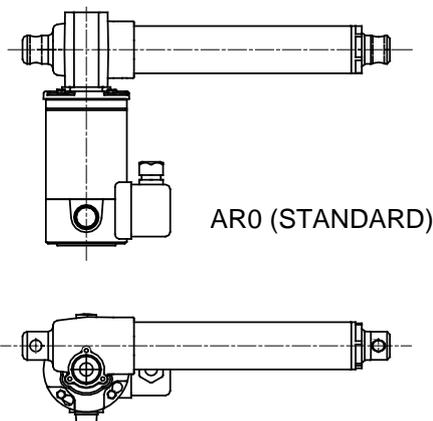
Dispositivo antirotazione

Il dispositivo di Antirotazione vincola la rotazione dell'asta traslante attorno al proprio asse: indispensabile in caso di carico non guidato. Con attacco anteriore A3, A4, A6, ed A7 è consigliabile utilizzare tale dispositivo per prevenire lo svitamento del terminale qualora non saldamente fissato.

Antirotation device

The Anti-rotation device avoids push rod spinning around its own axis when travelling: it is essential in case of not guided load. When using A3, A4, A6 and A7 front ends it is advisable to use this option to prevent front end from unscrewing in case it is not properly fixed.

ALI4 ALI4-F

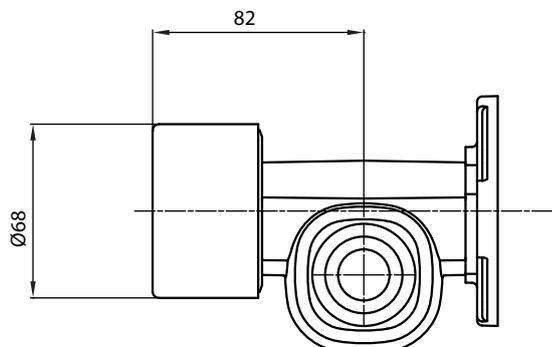


AR0 (STANDARD)

AR1

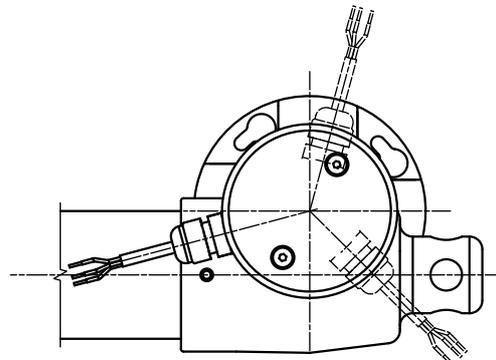
ENCODER

- Lato opposto motore solo ALI4 E ALI4-F
- Alimentazione Encoder 3,8 V - 24 Vdc
- PUSH-PULL
- 2 canali - 4 impulsi/giro
- Corrente massima d'uscita: 100 mA



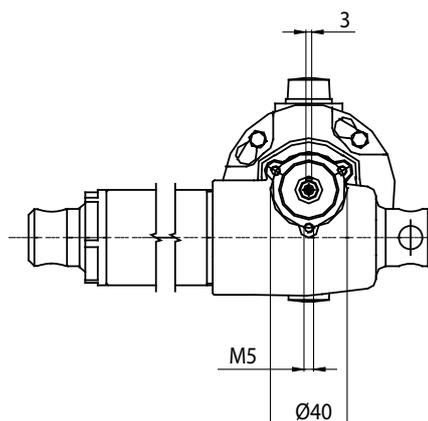
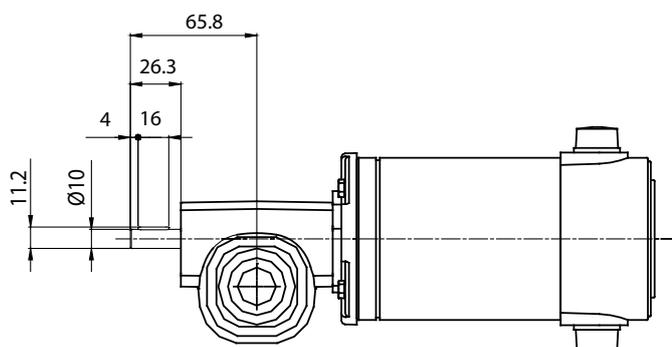
ENCODER

- Opposite side of motor available only on ALI4 and ALI4-F
- Encoder Power Supply 3,8 V - 24 Vdc
- PUSH-PULL
- 2 CH - 4 ppr
- Maximum output current: 100 mA



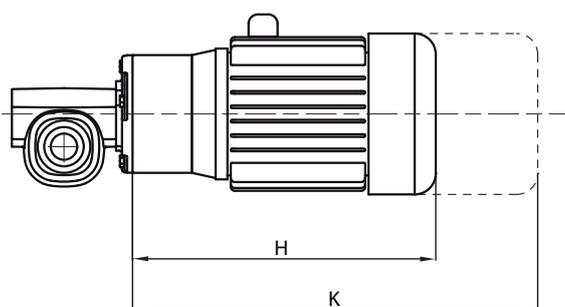
Sporgenza albero opposta al motore solo ALI4 e ALI4-F

Shaft opposite side of motor available only on ALI4 and ALI4-F



Limitatore di coppia

Opzione "S"



Torque limiter

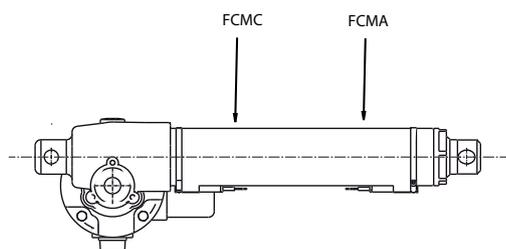
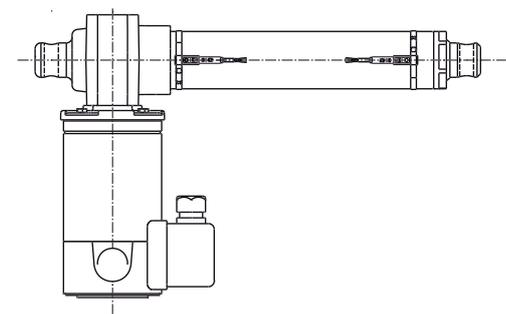
Option "S"

DIMENSIONI MOTORI C.A. / A.C. MOTORS DIMENSIONS			
GR. / SIZE	VERSIONE / TYPE	H	K
56	Standard	213	
	Autofrenante / Brake motors		251
63	Standard	235	
	Autofrenante / Brake motors		280
71	Standard	265	
	Autofrenante / Brake motors		312
DIMENSIONI MOTORI C.C. / D.C. MOTORS DIMENSIONS			
GR. / SIZE	VERSIONE / TYPE	H	
65	Standard	180	
80	Standard	202	

Nota: L'intervento del limitatore di coppia avviene ad un valore pari al 150/160% del carico nominale.

Note: Torque limiter reacts at 150-160% of nominal load.

Fine corsa magnetici FCM



Magnetic limit switches

FCMC = Finecorsa magnetico chiusura

FCMA = Finecorsa magnetico apertura

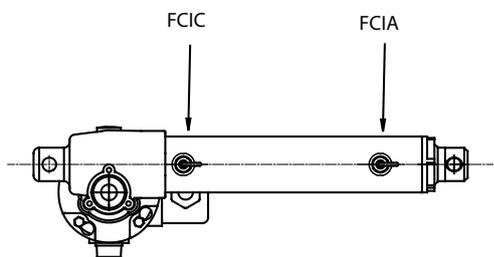
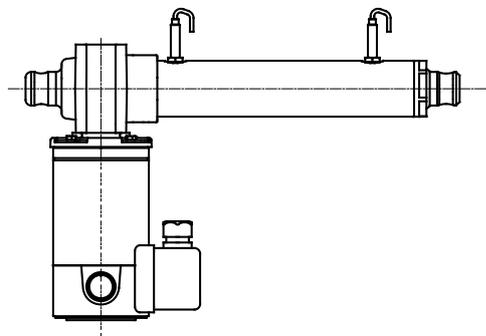
N.B. per la scelta del tipo di sensore vedi pag. 92;
per orientamento vedi pag. 91

FCMC = All-closed magnetic switch

FCMA = All-opened magnetic switch

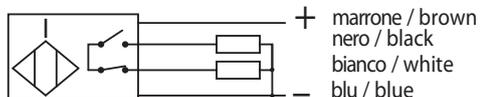
*N.B. For selection of type magnetic switch see page 92;
for position see page 91*

Fine corsa induttivi FCI



Inductive sensors FCI

NA + NC



+ marrone / brown
nero / black
bianco / white
- blu / blue

FCIC = Finecorsa induttivo chiusura

FCIA = Finecorsa induttivo apertura

Caratteristiche tecniche:

Tensione di alimentazione (UB): 5 ÷ 40 Vdc

Temperatura di funzionamento: - 25° ÷ + 75°C

Grado di protezione: IP67

Visualizzazione stato di uscita: LED giallo

N.B. per orientamento vedi pag. 91

FCIC = All-closed inductive sensor

FCIA = All-opened inductive sensor

Technical data:

Supply voltage (UB): 5 ÷ 40 Vdc

Temperature range: - 25° ÷ + 75°C

Degree of protection: IP67

Switch status indicator: yellow LED

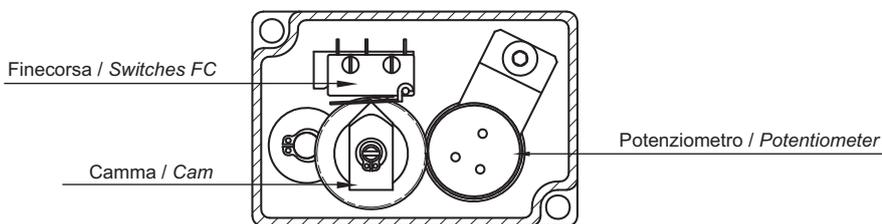
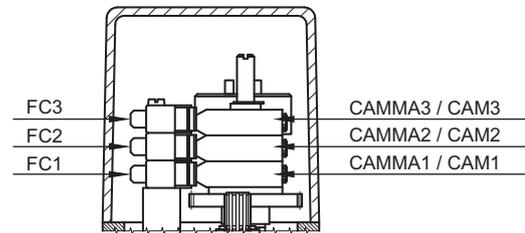
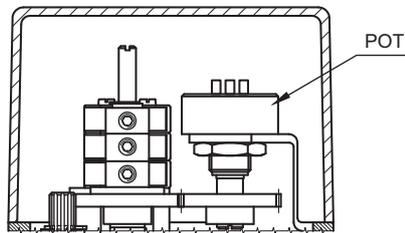
N.B. For position see page 91

Dispositivi Controllo Corsa Elettrici / Elettronici

Stroke Control Devices Electric / Electronic

FINE CORSA E POTENZIOMETRI INTEGRATO (ALI4-F)
Gruppo controllo corsa (fine corsa e potenziometro)

INTEGRATED LIMIT SWITCHES AND POTENTIOMETER (ALI4-F)
Stroke Control devices Assembly



- FC1 - micro inferiore
- FC2 - micro centrale
- FC3 - micro superiore
- CAMMA 1 - camma inferiore
- CAMMA 2 - camma centrale
- CAMMA 3 - camma superiore
- POT - potenziometro

- FC 1 - lower microswitch
- FC 2 - middle microswitch
- FC 3 - upper microswitch
- CAM 1 - lower cam
- CAM 2 - middle cam
- CAM 3 - upper cam
- POT - potentiometer

Nota: la combinazione fine corsa + potenziometro dev'essere valutata con il nostro Ufficio Tecnico per corse eccedenti rispetto a quelle riportate sulle tabelle delle prestazioni

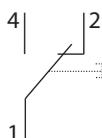
Nota: for microswitches + potentiometer versions contact our Technical Dept. in case strokes exceed values mentioned on performance tables.

Fine corsa - Limit switches		
Prestazioni / Performance	Tipo / Type	
	XCF	XGG (speciale a richiesta - on request)
Tensione / Voltage	250 Vac	230 Vac / 30 Vdc
Carico resistivo / Resistive load	10 A	16 A
Carico motore / Motor load	2 A	6 A

Caratteristiche tecniche micro

Le caratteristiche dei microinterruttori di finecorsa montati sono le seguenti:

- Alloggiamento: resina fenolica / melaminica termosaldada
- Meccanismo: azione a scatto con molla in bronzo / berillio. Un contatto in scambio NC/NO

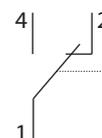


- Contatti: argento
- Terminali: dorati
- Vita meccanica: 3×10^5 (XGG) azionamenti non impulsivi.

Switches technical features

Limit Switches Features

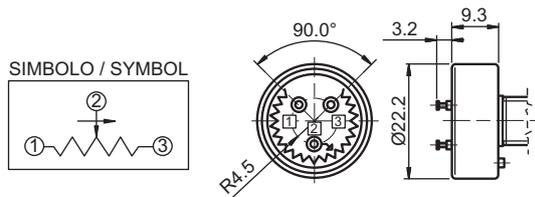
- Housing: Phenolic-melamine thermosetting
- Mechanism: Snap-action coil spring mechanism with beryllium / bronze spring. Changeover contact, normally-closed / normally-open.



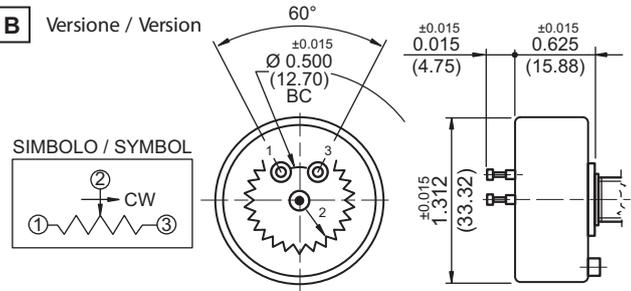
- Contacts: fine silver
- Terminals: gold flashed
- Mechanical life: 3×10^5 (XGG) cycles minimum (impact free actuation).

Potenziometro rotativo - Spinning potentiometer		
Prestazioni / Performances	Tipo / Type (A)	Tipo / Type (B)
Angolo max. di lavoro / Max. angle	340° ± 3°	352° ± 2°
Resistenza Ohm / Resistance	1K / 5K / 10K (standard)	1K / 5K / 10K (standard)
Alimentazione consigliata / Voltage	MAX 10 V	MAX 50 V
Linearità indipendente / Independent linearity	± 2%	± 1%
Tolleranza / Tolerance	± 20%	± 3%
Coefficiente deriva termica / Temperature coefficient of resistance	600 ppm / °C	20 ppm / °C

A Versione / Version

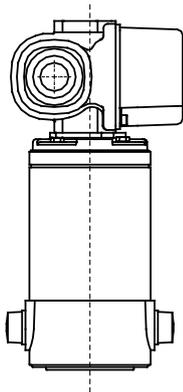


B Versione / Version



ORIENTAMENTO GRUPPO FINE CORSA
LIMIT SWITCHES BOX POSITION

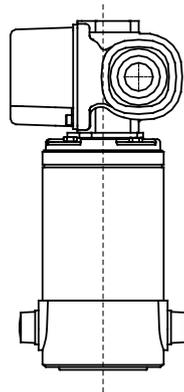
ORIENTAMENTO MOTORE
MOTOR POSITION



FC1

(Standard)

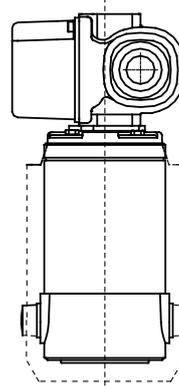
(solo M0/only M0)



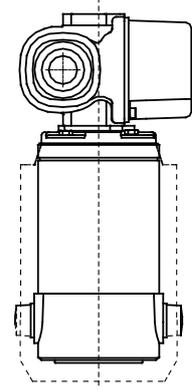
FC2

(solo M1/only M1)

ALI4-F



M1



M0

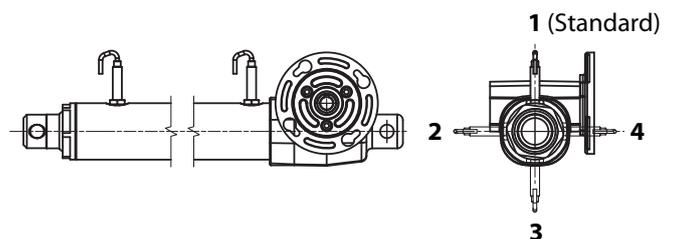
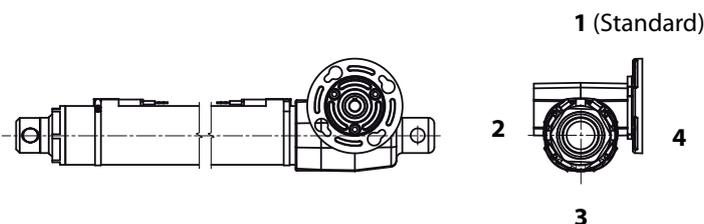
(Standard)

ORIENTAMENTO FCM
FCM POSITION

ORIENTAMENTO FCI
FCI POSITION

ALI4-FCM

ALI4-FCI



Fine corsa magnetici FCM - FCM magnetic Limit switches

Prestazioni / Performance	Tipo / Type		
	Reed NC	Reed NO	PNP
Tensione in DC / DC voltage	3 / 110 V	3 / 30 V	6 / 30 V
Tensione in AC / AC voltage	3 / 110 V	3 / 30 V	/
Corrente a 25°C / 25°C Current	0,5 A	0,1 A	0,20 A
Potenza / Power	20 VA	6 VA	4 W
Cavo alimentazione / Supply cable	PVC 2 x 0,14 mm	PVC 2 x 0,14 mm	PVC 3 x 0,14 mm
Lunghezza cavo / Cablelength		2500 mm	
Protezione / Protection		IP67	

Circuito Reed NC

Circuito con ampolla Reed normalmente chiusa protetta da varistore contro le sovratensioni generate all'apertura del circuito, e sistema di visualizzazione a LED.

Circuito PNP

Circuito con effetto di Hall con uscita PNP.

Protetto contro l'inversione di polarità e contro picchi di sovratensione.

Sistema di visualizzazione a LED.

Circuito Reed NO

Circuito con ampolla Reed normalmente aperta, protetta da varistore contro le sovratensioni generate all'apertura del circuito, e sistema di visualizzazione a LED.

Circuit Redd NC

Circuit with normally closed Reed switch protected by a varistor against overvoltages caused when switching off, with LED indicator.

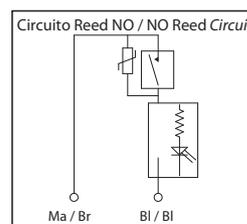
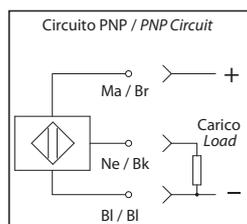
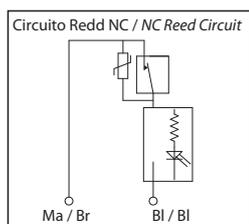
Circuit PNP

Circuit with Hall-effect switch and PNP outlet.

Protected against overvoltage spikes and reverse of polarity. With LED indicator.

Circuit Redd NO

Circuit with normally open Reed switch protected by a varistor against overvoltages caused when switching off, with LED indicator.



ENCODER

Encoder su motori CA

Encoder incrementale bidirezionale con (standard) e senza impulso di zero IP54.

Impulsi giro disponibili: 50 / 100 / 200 / 400 / 500 / 512 / 1000 / 1024 (standard)

Circuiti d'uscita disponibili: Line Drive 5 Vdc (standard) Push Pull 24 Vdc / Open Collector NPN 10 -30 Vdc / Open Collector PNP 10 -30 Vdc.

Rosso / Red	±Vdc
Nero / Black	0 Vdc
Ver de / Green	A
Giallo / Yellow	B
Blu / Blue	Z
Marrone / Brown	-A
Arancione / Orange	-B
Bianco / White	-Z

Encoder lato opposto motore solo ALI4 E ALI4-F

- Alimentazione Encoder 3,8 V - 24 Vdc
- PUSH-PULL
- 2 canali - 4 impulsi/giro
- Corrente massima d'uscita: 100 mA

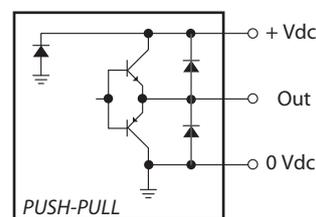
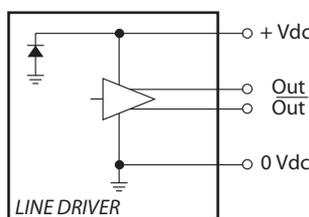
ENCODER

Encoder mounted on AC motors

Bidirectional incremental encoder, with (standard) or without zero-pulse, protection IP54.

Available ppr: 50 / 100 / 200 / 400 / 500 / 512 / 1000 / 1024 (standard)

Available output circuits: Line Drive 5 Vdc (standard) Push Pull 24 Vdc / Open Collector NPN 10 -30 Vdc / OpenCollector PNP 10 -30 Vdc.



Encoder opposite side of motor available only on ALI4 and ALI4-F

- Encoder Power Supply 3,8 V - 24 Vdc
- PUSH-PULL
- 2 CH - 4 ppr
- Maximum output current: 100 mA



RIFERIMENTO SIGLA D'ORDINAZIONE**Fine Corsa Meccanici:**

2FC2 = 2 Micro XGG

3FC2 = 3 Micro XGG

2FCD2 = 2 Micro cablati con diodi XGG

3FCD2 = 3 Micro di cui 2 cablati con diodi XGG

(solo per motori DC e per carichi fino a 6A di assorbimento)

Fine Corsa Magnetici:

2FCM0 = 2 Sensori circuito Reed NC

(versione standard in assenza di indicazioni)

2FCM1 = 2 Sensori circuito Reed NO

2FCM2 = 2 Sensori PNP

3FCM0 = 3 Sensori circuito Reed NC

(versione standard in assenza di indicazioni)

3FCM1 = 3 Sensori circuito Reed NO

3FCM2 = 3 Sensori PNP

Potenziometri:

POT01A = 1 k Ohm

POT05A = 5 k Ohm

POT10A = 10 k Ohm

(versioni standard)

POT01B = 1 k Ohm

POT05B = 5 k Ohm

POT10B = 10 k Ohm

(versioni speciali)

Encoder:

(solo su motore CC)

E01 = NPN 2 canali 1 ppr

(solo su motore CA)

E05 = Push Pull 1024 ppr

E06 = Line Drive 1024 ppr (standard)

E07 = Open Collector NPN

E08 = Open Collector PNP

(solo su cassa attuatore)

E00 = Push Pull 2 canali 4 ppr

E09 = Push Pull 1024 ppr

E10 = Line Drive 1024 ppr

E11 = Open Collector NPN

E12 = Open Collector PNP

E13 = Encoder non contemplato

(secondo richiesta cliente)

ORDERING KEY REFERENCES**Mechanical limit switches:**

2FC2 = 2 Micro XGG

3FC2 = 3 Micro XGG

2FCD2 = 2 XGG Microswitches diode-wired

3FCD2 = 3 XGG Microswitches, 2 of them diode-wired

(for DC motor only and for loads up to 6A)

Magnetic limit switches:

2FCM0 = 2 Sensors circuit Reed NC

(standard version without prior information)

2FCM1 = 2 Sensors circuit Reed NO

2FCM2 = 2 Sensors PNP

3FCM0 = 3 Sensors circuit Reed NC

(standard version without prior information)

3FCM1 = 3 Sensors circuit Reed NO

3FCM2 = 3 Sensors PNP

Potentiometers:

POT01A = 1 k Ohm

POT05A = 5 k Ohm

POT10A = 10 k Ohm

(standard version)

POT01B = 1 k Ohm

POT05B = 5 k Ohm

POT10B = 10 k Ohm

(standard version)

Encoder:

(only on DC motor)

E01 = NPN 2 channels 1 ppr

(only on AC motor)

E05 = Push Pull 1024 ppr

E06 = Line Drive 1024 ppr (standard)

E07 = Open Collector NPN

E08 = Open Collector PNP

(only on actuator housing)

E00 = Push Pull 2 channels 4 ppr

E09 = Push Pull 1024 ppr

E10 = Line Drive 1024 ppr

E11 = Open Collector NPN

E12 = Open Collector PNP

E13 = Encoder not considered above

(according to customer request)

Guida alla scelta della motorizzazione - Motor choice guideline

TIPO MOTORE / MOTOR TYPE

Versione / Version:	CC = corrente continua / DC = direct current CA = corrente alternata / AC = alternate current PD = PAM a disegno / <i>Special motorflange (provide drawing)</i>
Tensione / Voltage:	CC / DC = V12 / V24 / V36 / V48 CA / AC = 230/400/50 – 190/330/50 – 208/360/50 – 400/690/50 277/480/60 – 220/380/60 – 254/440/60 – 480/830/60 MT = Multitensione / <i>Multivoltage 230/50 (monofase / 1-phase)</i>
Tipo / Type: (Solo per CA / only for AC)	T = trifase / <i>3-phase</i> M = monofase / <i>1-phase</i> AT = trifase autofrenante / <i>3-phase with brake</i> AM = monofase autofrenante / <i>1-phase with brake</i> ME = monofase con condensatore elettronico / <i>1-phase with starting capacitor</i> AE = monofase autofr. con condensatore elettronico / <i>1-phase with brake and starting capacitor</i>
Grandezza / Size:	CC / DC: D.85 CA / AC: IEC 56/63/71
N°Poli / Pole:	CA / AC: 2 / 4 / 6
N°Giri / RPM's:	CC / DC: 3000 RPM 24 V (Standard) 12 V

Potenza CA / AC Power: kW						
IEC	kW trifase / 3-phase			kW monofase / 1-phase		
	2POLI / 2POLE	4POLI / 4POLE	6POLI / 6POLE	2POLI / 2POLE	4POLI / 4POLE	6POLI / 6POLE
56	0,09	0,06-0,09	-	0,09	0,06-0,09	-
63	0,18-0,25-0,37	0,18	-	0,18-0,25	0,13-0,18	-
71*	0,37-0,55	0,25-0,37	0,37	0,37-0,55	0,25-0,37	0,37

* **Nota:** Tutti i motori IEC71 sono con flangia ed albero ridotti IEC63.

Note: All motors IEC71 are with reduced motorflange and shaft IEC63.

VARIANTI MOTORE CA / AC MOTOR OPTIONS

Flangia tipo / Motorflange type:	PAM56B14 / PAM63B14 Nota: Tutti i motori IEC71 sono con flangia ed albero ridotti IEC63. Note: All motors IEC71 are with reduced motorflange and shaft IEC63.
Tipo servizio / Service rate:	S1 / S2 / S3
Classe isolamento / Insulation class:	F = standard (non indicare) / <i>standard (leave blank)</i> Specificare solo se diversa / Advise only if different than "F"
Grado Protezione / Protection Degree:	IP55 (non indicare / <i>leave blank</i>) IP65 TP = tropicalizzato / <i>tropicalization</i> IN = avvolgimento per inverter / <i>winding for inverters</i> ALTRO / OTHER = indicare per esteso / <i>advise</i> SENZA / NONE = omettere / <i>leave blank</i>

Freno / Brake:

FECC = freno elettromagnetico negativo in CC / *DC brake negative action (standard)*

Tensione di alimentazione

230V± 10% 50/60Hz dal lato A.C. dell'alimentatore freno. Il freno viene alimentato direttamente dall'alimentazione del motore. (standard)

Sono disponibili a richiesta motori con freni con alimentazione separata e con tensioni nel range (24-205 Vdc)

*In questo caso il freno necessita di una alimentazione separata da quella del motore. In questo caso la sigla diventa **FECC-AS-24Vdc***

Power Supply

230V±10% 50/60Hz AC side inside the brake. The brake is powered directly from the power supply of the motor (standard)

Motors with separated brake power supply and tensions in the range (24-205 Vdc) can be available on request.

In this case the brake needs a separated power supply from the motor and its code becomes **FECC-AS-24 Vdc**

FECA= freno elettromagnetico in CA / *AC brake*

Tensione di alimentazione

230/400V± 10% 50/60Hz. Il freno viene alimentato direttamente dall'alimentazione del motore.

Sono disponibili a richiesta motori con freni con alimentazione separata e con tensioni nel range (24-690 Vac) 50/60 HZ

*In questo caso il freno necessita di una alimentazione separata da quella del motore. In questo caso la sigla diventa **FECA-AS-230 Vac 50 HZ***

Power Supply

230/400V±10% 50/60Hz. The brake is powered directly from the power supply of the motor.

Motors with separated brake power supply and tensions in the range (24-690 Vac - 50/60 Hz) can be available on request.

In this case the brake needs a separated power supply from the motor and its code becomes **FECA-AS-230 Vac 50 HZ**

Alimentazione separata del freno / Separate brake power supply:

si ottiene tramite una morsettiere ausiliaria, con fissati i morsetti delle bobine freno, posizionata all'interno del coprimorsettiere motore.

achieved by means of an auxiliary terminal board, with fixed brake coil terminals, located inside the motor terminal box.

Nb. *Per tutti i motori predisposti inverter il freno deve avere sempre l'alimentazione separata*

Nb. *On all motors prepared for frequency converter the brake must always have a separate power supply*

SENZA = omettere / **NO BRAKE** = leave blank

Opzioni / Options:

LS = leva sblocco / *hand release lever (non indicare / leave blank)*

Nota: = non disponibile per motori IEC 50 IEC 56 / **NOTE:** *not available for motor IEC 50 IEC 56*

AB = albero bisporgente / *2'shaft*

IN = avvolgimento per inverter / *winding for inverters*

ALTRO / OTHER = indicare per esteso / *advise*

SENZA / NONE = omettere / *leave blank*

SIGLA DI ORDINAZIONE - ORDERING KEY

ALI4 / 0250 / M01 / CA-400/50-T-56-4-0,09 / B5+S1+AB / FC1 / M0 / 1 / E0 / 2FC0 / P0T01A / IP65 / AR0 / P1 / A1 / A+B / N.DIS

MODELLO / MODEL: _____

ALI4 / ALI4-F / ALI4-FCM / ALI4-FCI
 ALI4-VRS / ALI4-VRS-F / ALI4-VRS-FCM
 ALI4-VRS-FCI

CORSA / STROKE: mm _____

es. 250 mm = 0250

VELOCITÀ / SPEED: mm/s _____

ALI4 (Pag. 85-86)

Indicare: vedi tabelle / Advise: choose among

M00 = Velocità non contemplate / Not standard speed

Versione PAM / Flanged Version = Rpm

Indicare rapporto riduzione + passo stelo

Advise reduction ratio and screw pitch

MOTORE / MOTOR: (Pag. 98) _____

Indicare solo con motore: / Advise only if with motor:

In C.A.: versione, tensione, tipo, grandezza, n°poli, potenza
 version, voltage, type, size, n°pole, power

In C.C.: versione, tensione, grandezza, n°giri
 version, voltage, size, Rpm

In versione predisposizione motore "PAM" indicare: 0

With motorflange only put 0

In versione PAM a disegno indicare: PD

With special motorflange put: PD

VARIANTI MOTORE CA / AC MOTOR OPTIONS: (Pag. 98) _____

Flangia motore: solo in versione PAM - esempio PAM 56B14 indicare 56B14

Motorflange: for motorflange version only advise size - i.e. for IEC56 B14 put 56B14

Senza motore o con motore in C.C.: Omettere tutti i parametri sottoindicati

No motor or DC motor: leave all following parameters blank

Tipo Servizio: Indicare se diverso da S3 (std)

Service rate: Advise if different than S3 (std)

Classe isolamento: Indicare se diverso da F (std)

Insulation class: Advise if different than F (std)

Grado Protezione: Indicare se diverso da IP55 (std)

Protection Degree: Advise if different than IP55 (std)

Tipo freno: solo se autofrenante: ES, FECA

Brake type: for brakemotors only: ES, FECA

Opzioni: Indicare se richiesto (ES, AB Albergo Bisporgente)

Options: Advise if needed (ES, AB 2'shaft)

ORIENTAMENTO FINE CORSA / LIMIT SWITCHES POSITION: (Pag. 95) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank **FC1 / FC2**

ORIENTAMENTO MOTORE / MOTOR POSITION: (Pag. 95) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank **M0 / M1**

ORIENTAMENTO MORSETTIERA / E-BOX POSITION: (Pag. 91) _____

1 (Standard), 2, 3, 4

Senza Motore o motore in CC / No Motor or DC motor: Omettere / Leave blank

ENCODER / ENCODER: (Pag. 97) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank

FINE CORSA / LIMIT SWITCHES: (Pag. 97) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank

POTENZIOMETRO / POTENTIOMETER: (Pag. 97) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank

GRADO PROTEZIONE / PROTECTION CLASS: _____

IP50 (Std): omettere / leave blank

IP65

AA Allestimento Acciaierie / Steel works

Altro / Other: Specificare / Advise

DISPOSITIVO ANTIROTAZIONE / ANTIROTATION DEVICE: (Pag. 91) _____

Senza / None: Omettere / Leave blank

AR0: Std

AR1: 90°

ATTACCO POSTERIORE / REAR END: (Pag. 91) _____

P0 = Senza / None

P2 = Occhio / Eyelet (90°)

P1 = Occhio / Eyelet (standard)

P3 = Attacco a Disegno / Special (provide drawing)

ATTACCO ANTERIORE / FRONT END: ALI4 (Pag. 90) _____

A0 = Senza / None

A1 = Occhio / Eyelet (Std)

A2 = Forcella Fissa / Yoke

A3 = Forcella + Clip / Yoke + Clip

A4 = Testa a Snodo / Rod end

A6 = Femmina M12 / M12 female

A7 = Maschio M12 / M12 male

A9 = Attacco a Disegno / Special (provide drawing)

OPZIONI / OPTIONS: _____

C = Vite Scoperta / Naked Screw

A = Versione Inox (asta, attacco anteriore) / Stainless steel version (rod, front end)

B = Protezione soffiato / Bellows

FF = Verniciatura Ferromicacea (blu standard) / Standard Painting

E = Guarnizioni in viton / Viton seals

FA = Verniciatura Antirombo / Painting (milder but more elastic than the standard painting)

FM = Verniciatura Marina (5 strati) / Marine type Painting (5 layers)

G = Chiocciola di sicurezza / Safety nut

S = Limitatore di coppia su asse motore (Pag. 92) / Torque limiter on motor flange (Pag. 92)

T = Sporgenza albero opposta motore (solo ALI4 / ALI4-F) (Pag.92) / Additional shaft (opposite to motorside - ALI4 / ALI4-F only) (Pag. 92)

VARIANTI / VERSIONS: _____

N° Disegno / Drawing number: Per Condizioni non Contemplate / Presence of not standard options

Senza / None: Omettere / Leave blank

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Planos

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

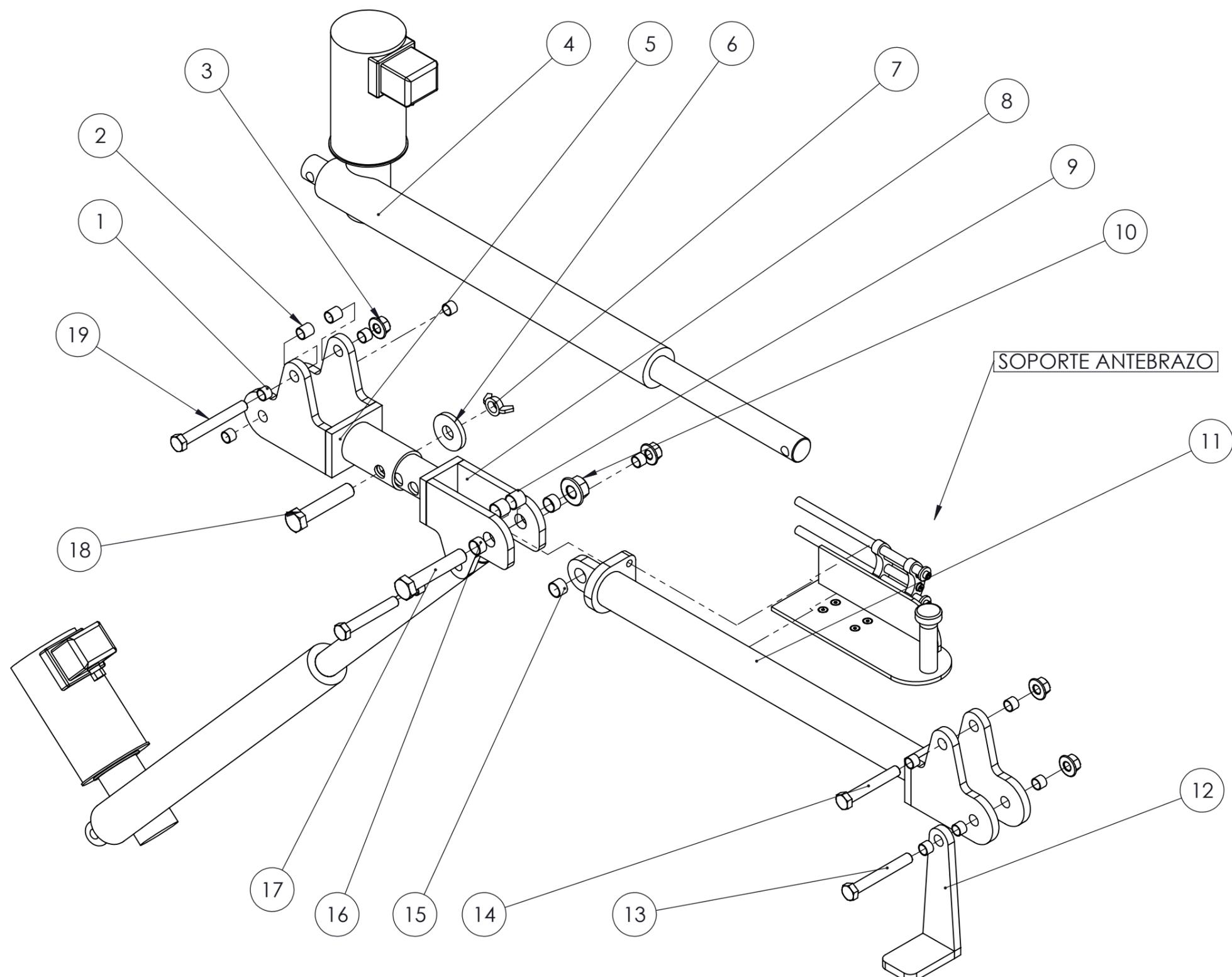
AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Planos.

Plano CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR.....	1.00
Plano RÓTULA HOMBRO BRAZO.....	1.01
Plano RÓTULA CODO BRAZO.....	1.02
Plano ANTEBRAZO.....	1.03
Plano PALA.....	1.04
Plano SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO.....	1.05
Plano GUÍA.....	1.05.01
Plano ENGANCHE GUÍA.....	1.05.02
Plano VÁSTAGO ENGANCHE.....	1.05.03
Plano REPOSABRAZOS.....	1.05.04



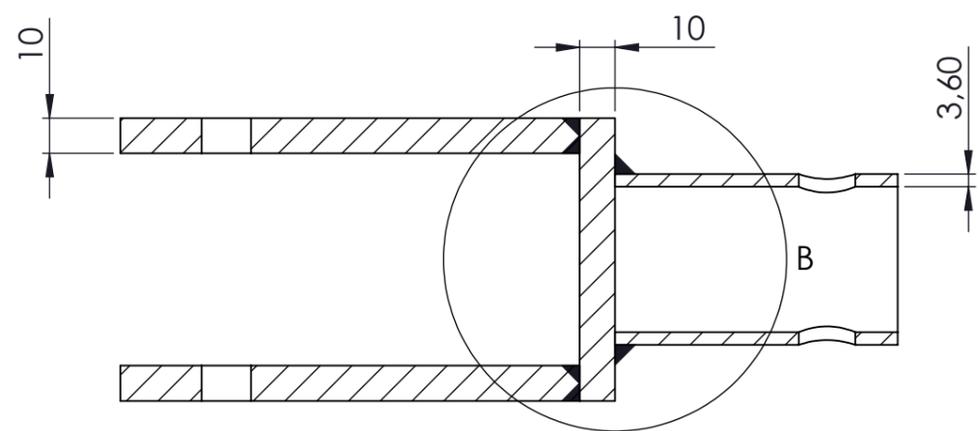
DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS

	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	Josue Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:5	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR			Nº P. :1.00 Nom.Arch: CONJUNTOBRAZOACTUADOR.SLDDRW

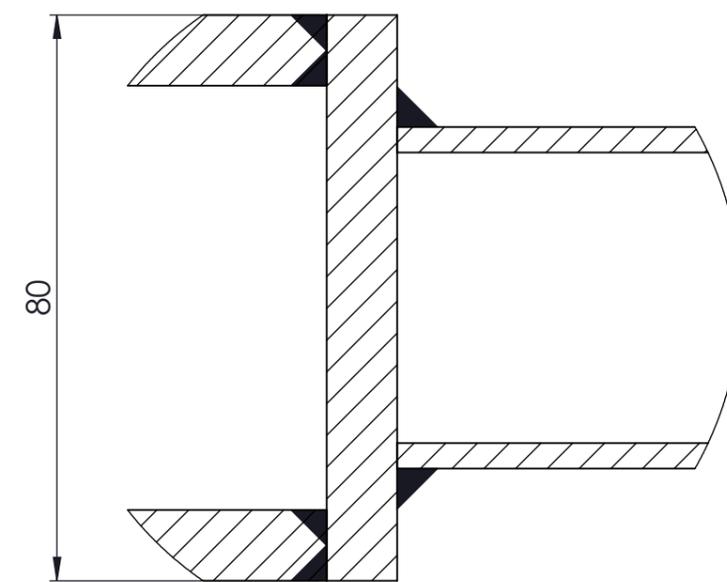
19	1	TORNILLO HEXAGONAL - M12 x 100- WC DIN 7990- g 5.6	DIN 7990	
18	1	TORNILLO HEXAGONAL - M16 x 80- WC DIN 7990- g 5.6	DIN 7990	
17	1	TORNILLO HEXAGONAL- M16 x 85- WC DIN 7990- g 5.6	DIN 7990	
16	2	CASQUILLO SBA 16x18x10 DIN 1494	DIN 1494	
15	1	CASQUILLO SBA 16x18x15 DIN 1494	DIN 1494	
14	2	TORNILLO HEXAGONAL - M12 x 80- WC DIN 7990- g 5.6	DIN 7990	
13	1	TORNILLO HEXAGONAL- M12 x 90- WC DIN 7990- g 5.6	DIN 7990	
12	1	PALA	1.04	AISI 1020
11	1	ANTEBRAZO	1.03	
10	1	TUERCA HEXAGONAL - M16 - N DIN 6923- g 5.6	DIN 6923	
9	2	CASQUILLO SBA 16x18x15 DIN 1494	DIN 1494	
8	1	RÓTULA CODO BRAZO	1.02	
7	1	TUERCA MARIPOSA M16 DIN 315- g 5.6	DIN 315	
6	1	ARANDELA PLANA ϕ 17,3 DIN 6340- 17	DIN 6340	
5	1	RÓTULA HOMBRO BRAZO	1.01	
4	2	ACTUADOR MECVEL ALI-4 M23 24VDC		
3	4	TUERCA HEXAGONAL- M12 - N DIN 6923- g 5.6	DIN 6923	
2	2	CASQUILLO SBA 12x14x15 DIN 1494	DIN 1494	
1	11	CASQUILLO SBA 12x14x10 DIN 1494	DIN 1494	
MARCA	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS

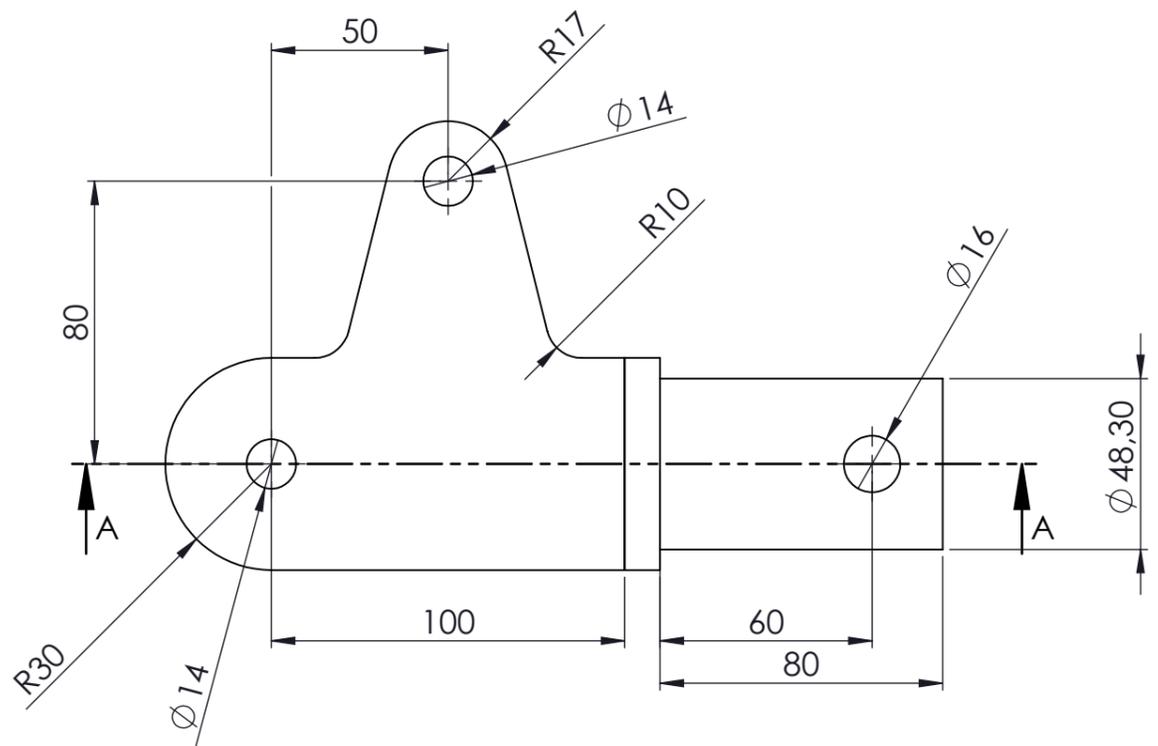
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado		Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado		Josue Cabrera Delgado		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:5	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR			Nº P.:1.00 LISTA DE MATERIALES



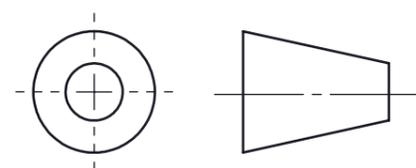
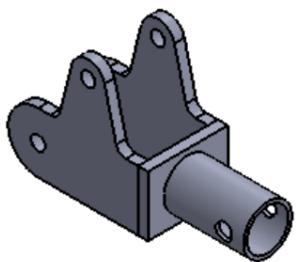
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



DETALLE B
ESCALA 1:1

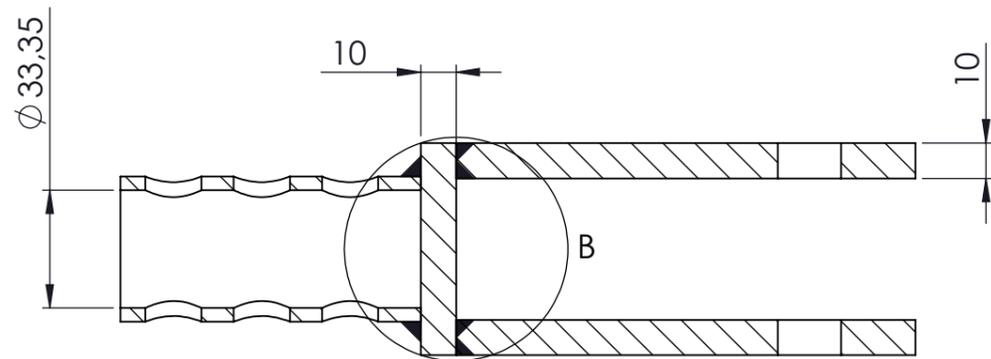


Chapas de acero AISI 1020
 Tubo 48.3x3.6 DIN 2448, Material P235TR1
 Soldadura en ángulo con garganta (a) de 4 mm, acabado cóncavo
 Soldadura a tope con penetración total, chaflanes a 45°
 Cotas en mm

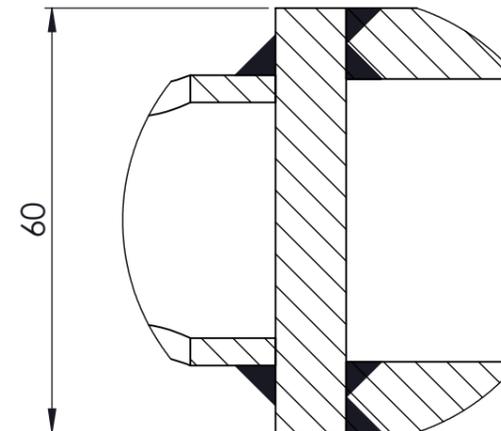


5	1	RÓTULA HOMBRO BRAZO	1.01	
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

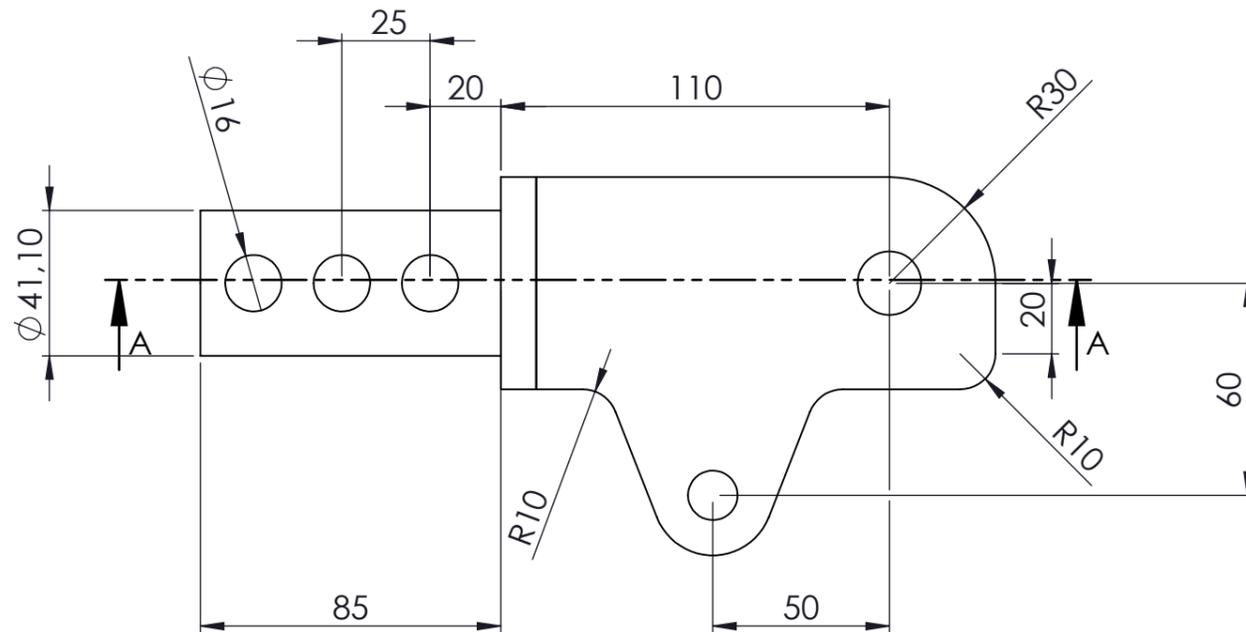
DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS				
Dibujado	Fecha	Autor	 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
Comprobado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Id. s. normas	Junio 2015	José Cabrera Delgado		
ESCALA:	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR		Nº P. 1.01	
1:2	RÓTULA HOMBRO BRAZO		Nom.Arch:RÓTULAHOMBROBRAZO.SLDDRW	



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



DETALLE B



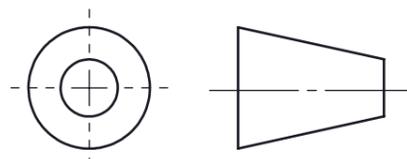
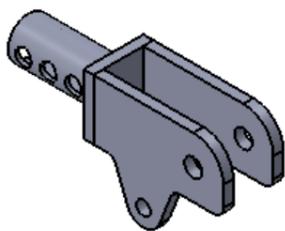
Chapas de acero AISI 1020

Tubo 42,4x4 DIN 2448, Material P235TR1, torneado exterior

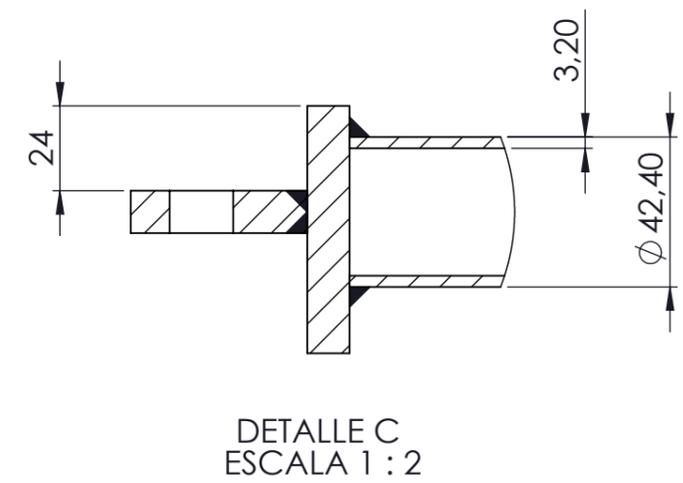
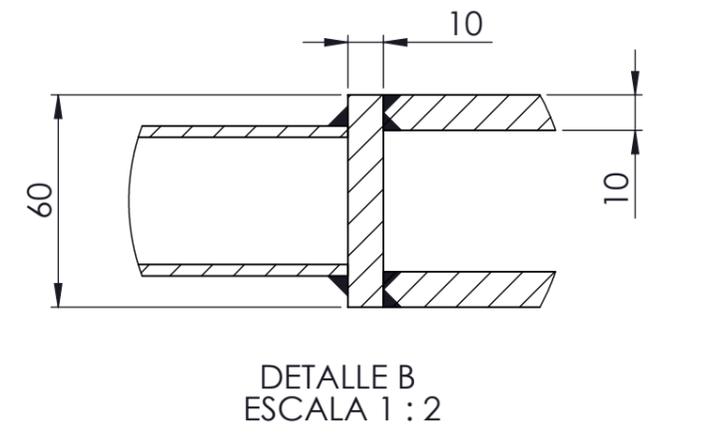
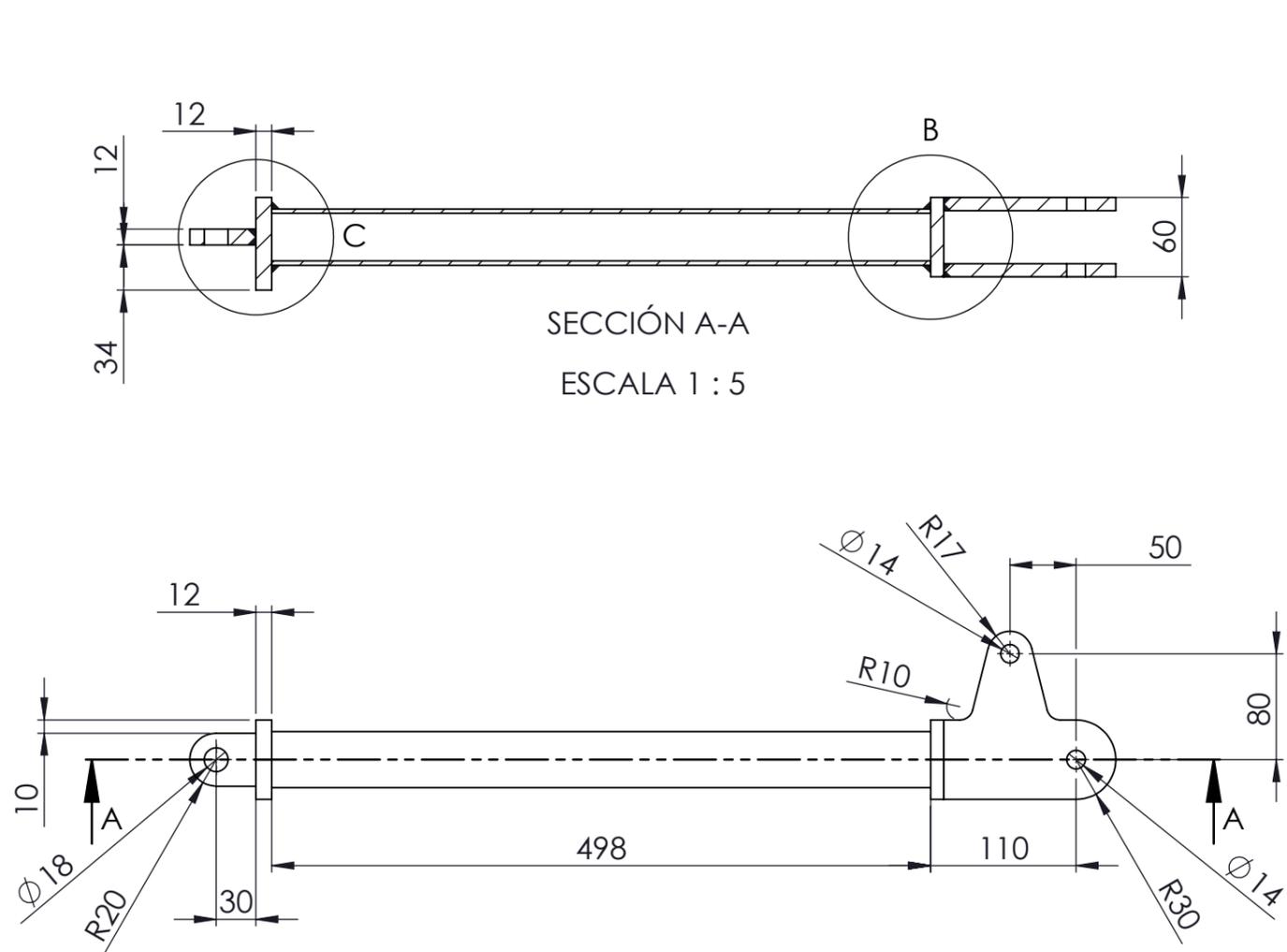
Soldadura en ángulo con garganta (a) de 4 mm, acabado cóncavo

Soldadura a tope con penetración total, chaflanes a 45°

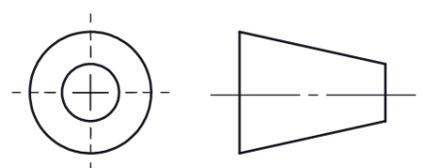
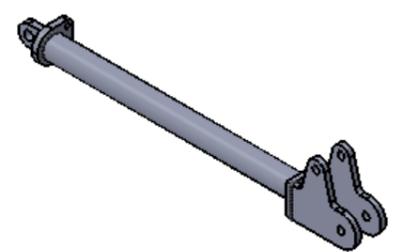
Cotas en mm



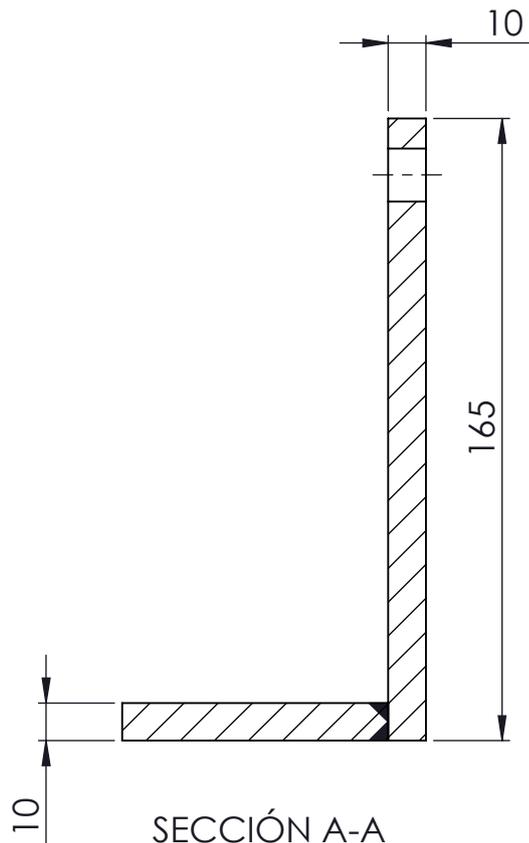
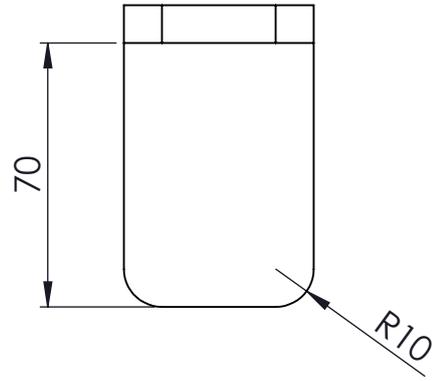
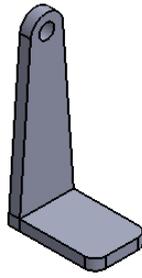
8	1	RÓTULA CODO BRAZO	1.02	
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL
DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS				
Dibujado	Fecha	Autor	 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
Comprobado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Id. s. normas	Junio 2015	José Cabrera Delgado		
		UNE-EN-DIN		
ESCALA:	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR		Nº P: 1.02	
1:2	RÓTULA CODO BRAZO		Nom.Arch:RÓTULACODOBRAZO.SLDDRW	



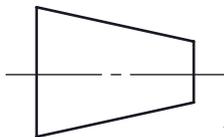
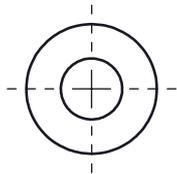
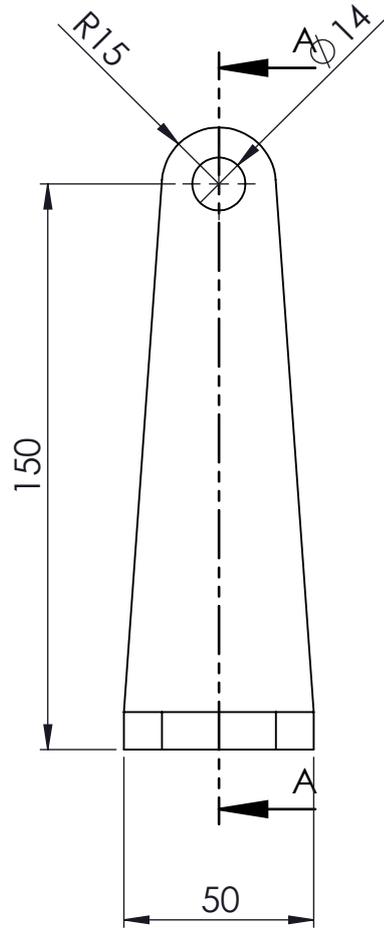
Chapas de acero AISI 1020
 Tubo 42.4x3.2 DIN 2448, Material P235TR1
 Soldadura en ángulo con garganta (a) de 4 mm, acabado cóncavo
 Soldadura a tope con penetración total, chaflanes a 45°
 Cotas en mm



11	1	ANTEBRAZO	1.03	
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL
DISEÑO DE UN EXOSQUELETO: BRAZOS				
Fecha		Autor		 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado		Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado		José Cabrera Delgado		
Id. s. normas		UNE-EN-DIN		Universidad de La Laguna Nº P.: 1.03 Nom.Arch:ANTEBRAZO.SLDDRW
ESCALA:		CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR		
1:5		ANTEBRAZO		



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

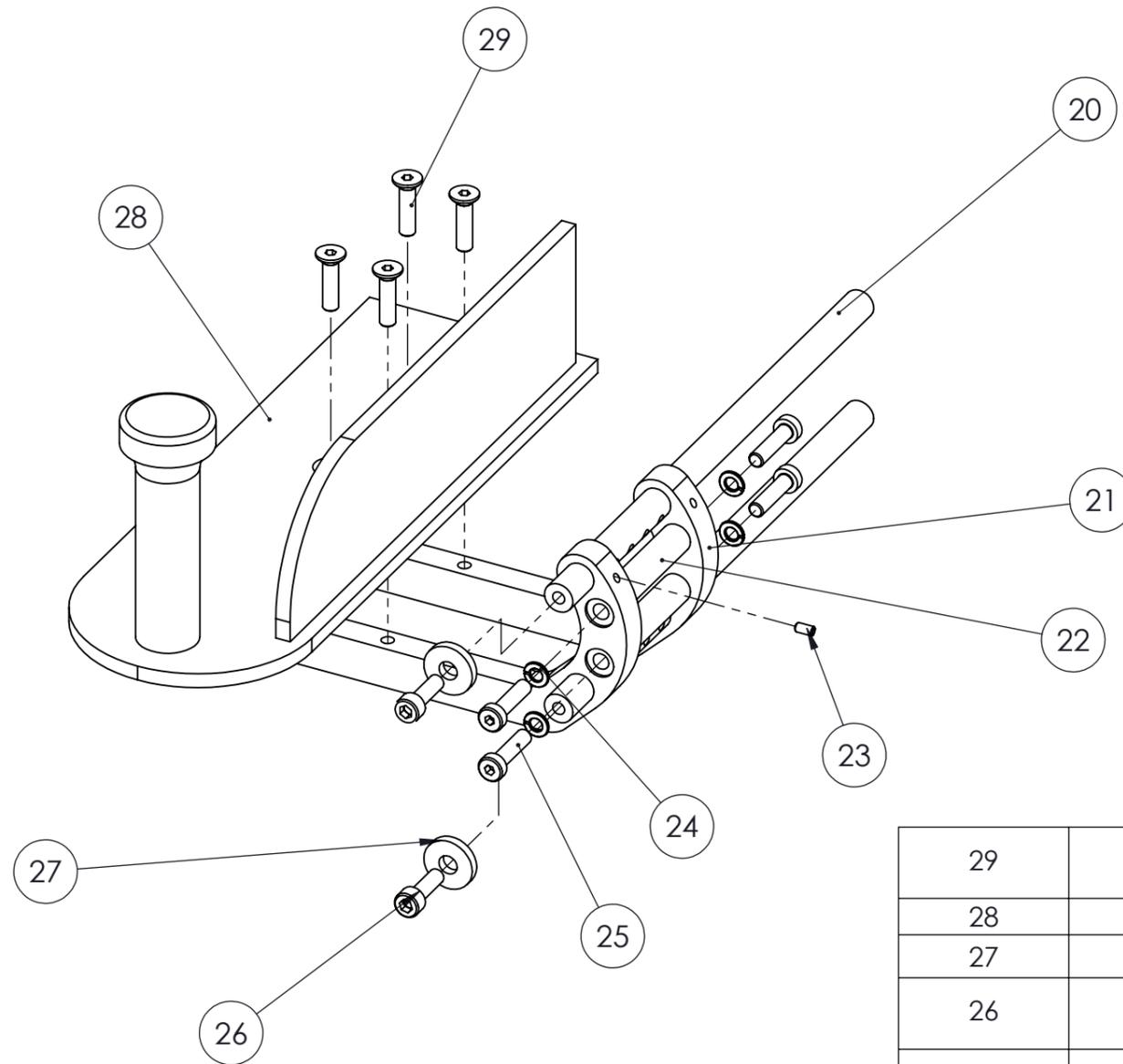


Soldadura a tope con penetración total, chaflanes a 45°
Cotas en mm

12	1	PALA	1.04	AI SI 1020
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS

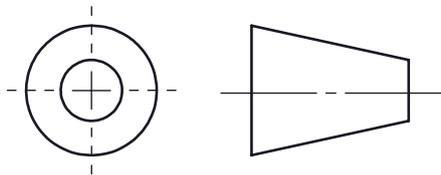
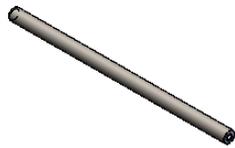
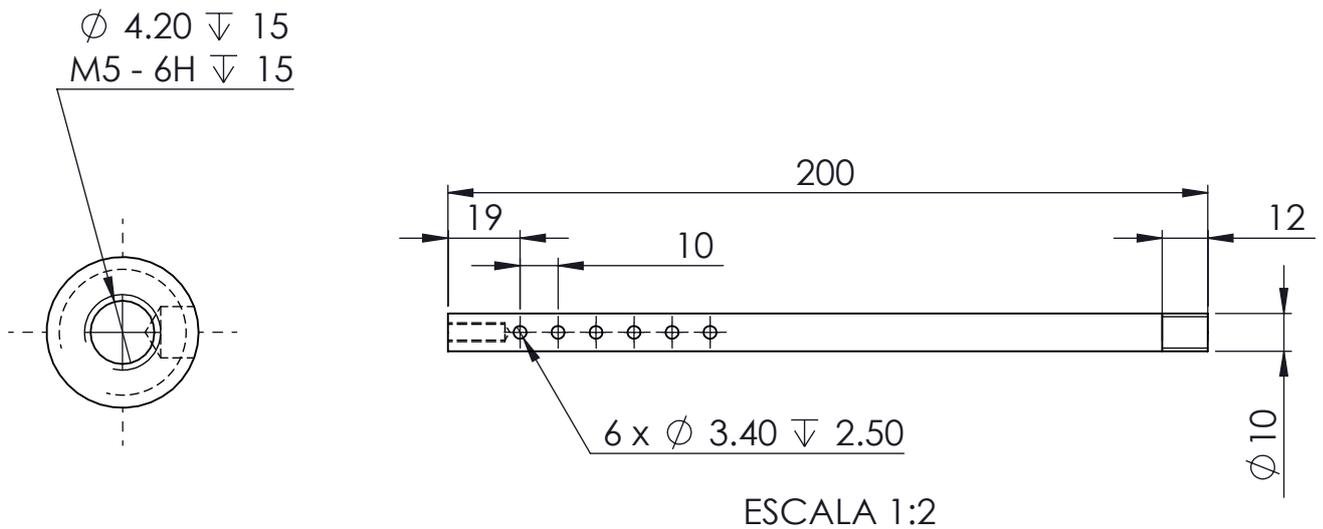
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	Josue Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA:	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR		Nº P.: 1.04	
1:2	PALA		Nom.Arch: PALA.SLDDRW	



29	4	TORNILLO AVELLANADO M5 x 20 --- 20N ISO 10642- g 5.6	ISO 10642	
28	1	REPOSABRAZOS	1.05.04	AISI 1020
27	2	ARANDELA PLANA ϕ 6.4 DIN 6340	DIN 6340	
26	2	TORNILLO REDONDO ALLEN M5 x 16 --- 16N ISO 4762- g 5.6	ISO 4762	
25	4	TORNILLO REDONDO ALLEN M5 x 20 -- - 17.6C DIN 7984- g 5.6	DIN 7984	
24	4	ARANDELA GROVER ϕ 4.55-FSt DIN 6905	DIN 6905	
23	1	TORNILLO PRISIONERO M3 x 6-C DIN 913- g 5.6	DIN 913	
22	2	VÁSTAGO ENGANCHE	1.05.03	AISI 1020
21	2	ENGANCHE GUÍA	1.05.02	AISI 1020
20	2	GUÍA	1.05.01	AISI 1020
MARCA	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOSQUELETO: BRAZOS

	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	Jose Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA:	CONJUNTO BRAZO CON ACTUADOR		Nº P.:1.05	
1:2	SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO		Nom.Arch: SUBCONJUNTOSOPORTEANTEBRAZO.SLDDRW	



Cotas en mm

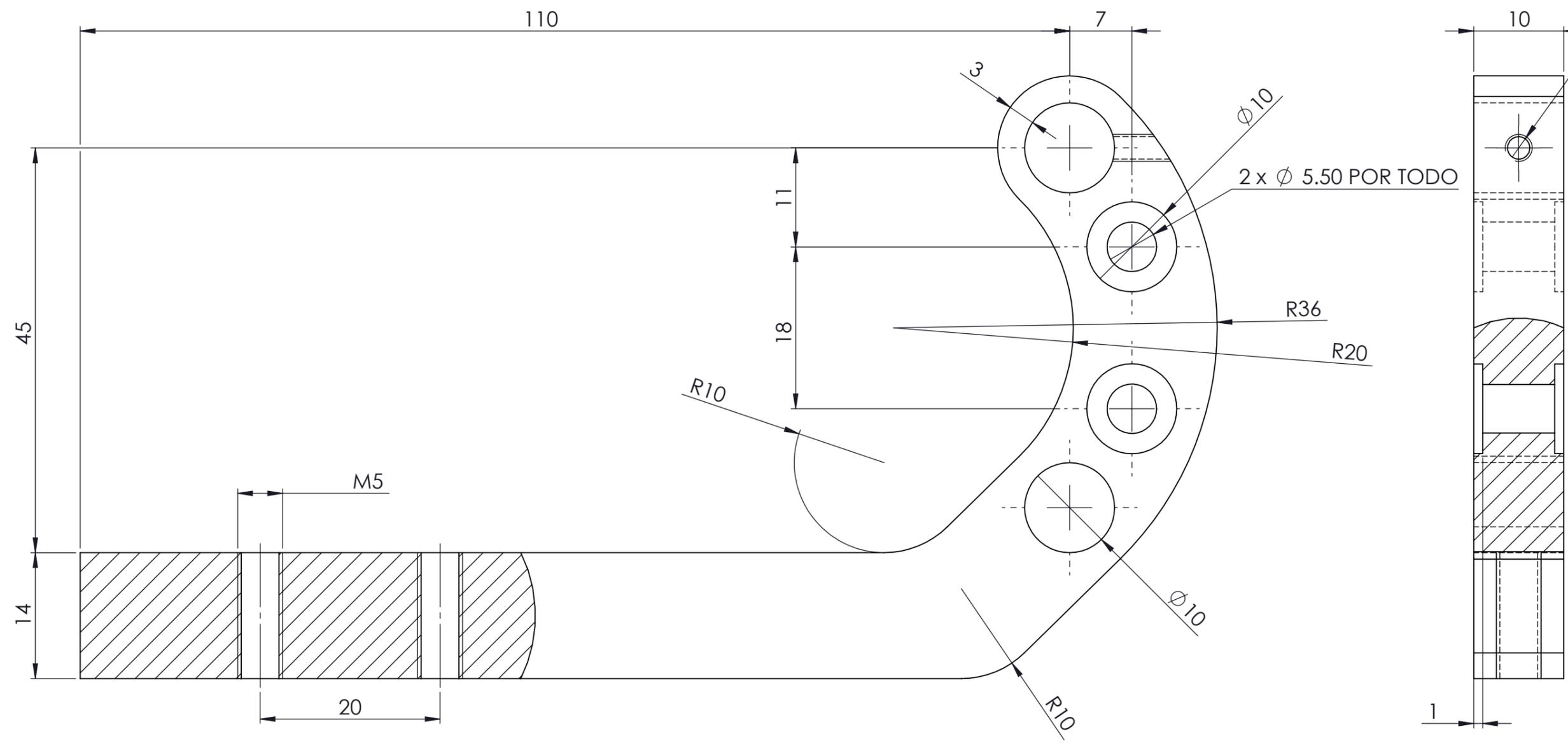
20	2	GUÍA	1.05.01	AISI 1020
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS

	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	José Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			

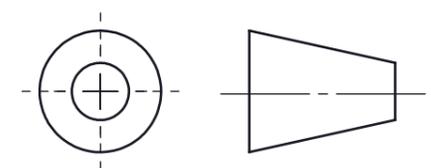
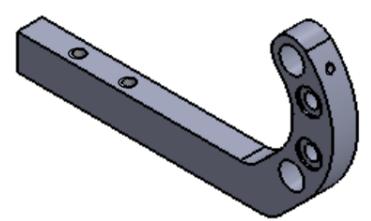
ESCALA:	SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO	Nº P. :1.05.01
2:1	GUÍA	Nom.Arch:GUÍA.SLDDRW

Ø 2.50 HASTA EL SIGUIENTE
M3 - 6H HASTA EL SIGUIENTE

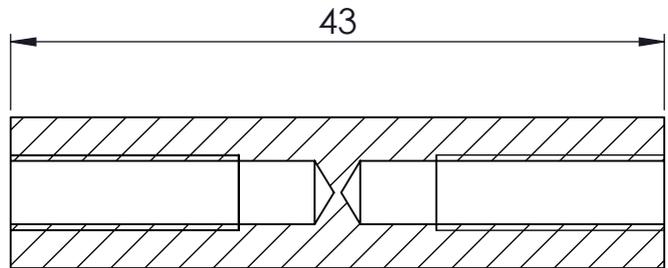
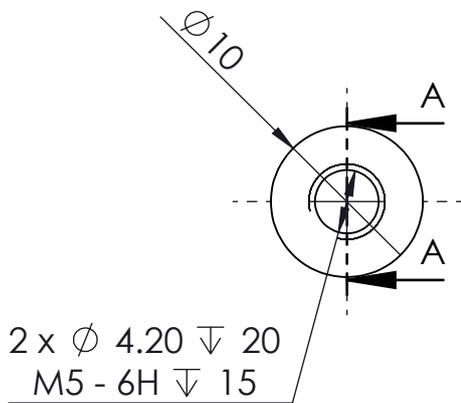


Cotas en mm

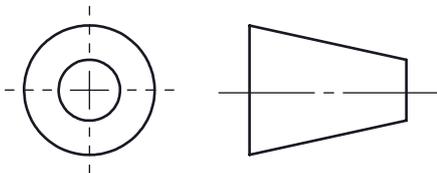
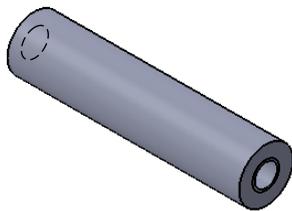
21	2	ENGANCHE GUÍA	1.05.02	AISI 1020
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL



DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS				
Dibujado	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Comprobado	Junio 2013	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	José Cabrera Delgado		
ESCALA:	SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO		Nº P. : 1.05.02	
2:1	ENGANCHE GUÍA		Nom.Arch:ENGANCHEGUÍA.SLDDRW	



SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1

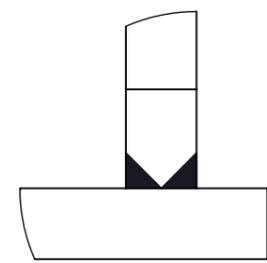
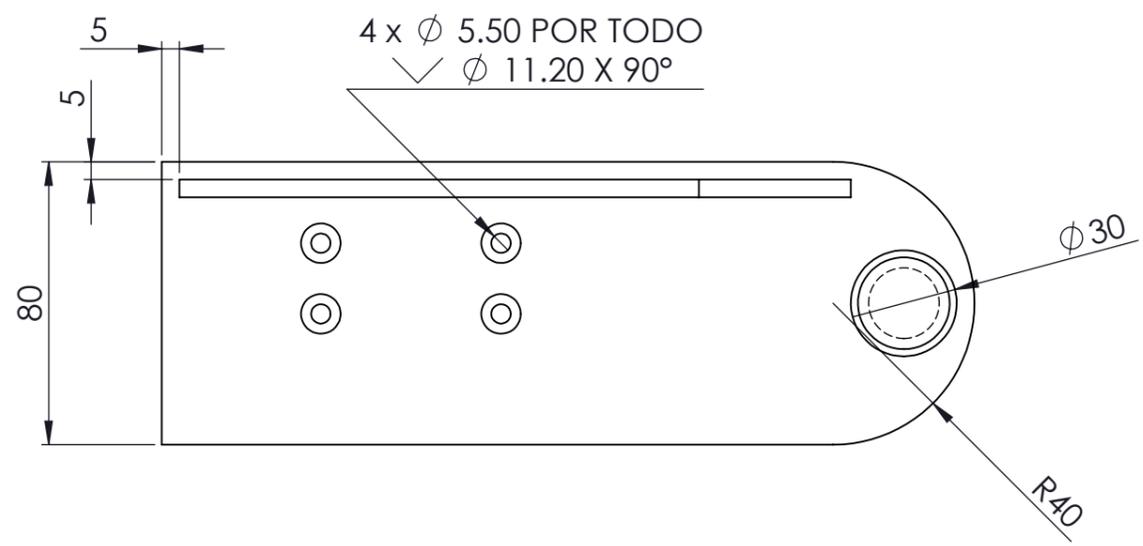


Cotas en mm

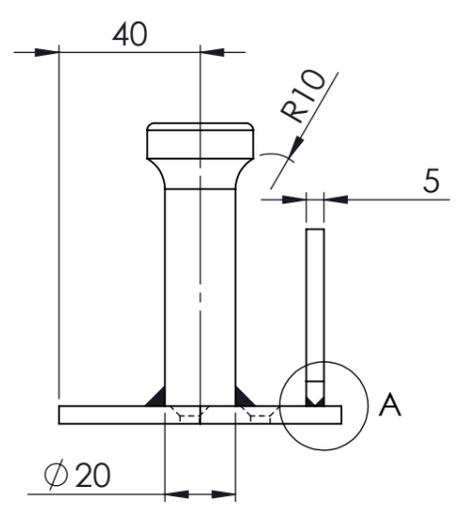
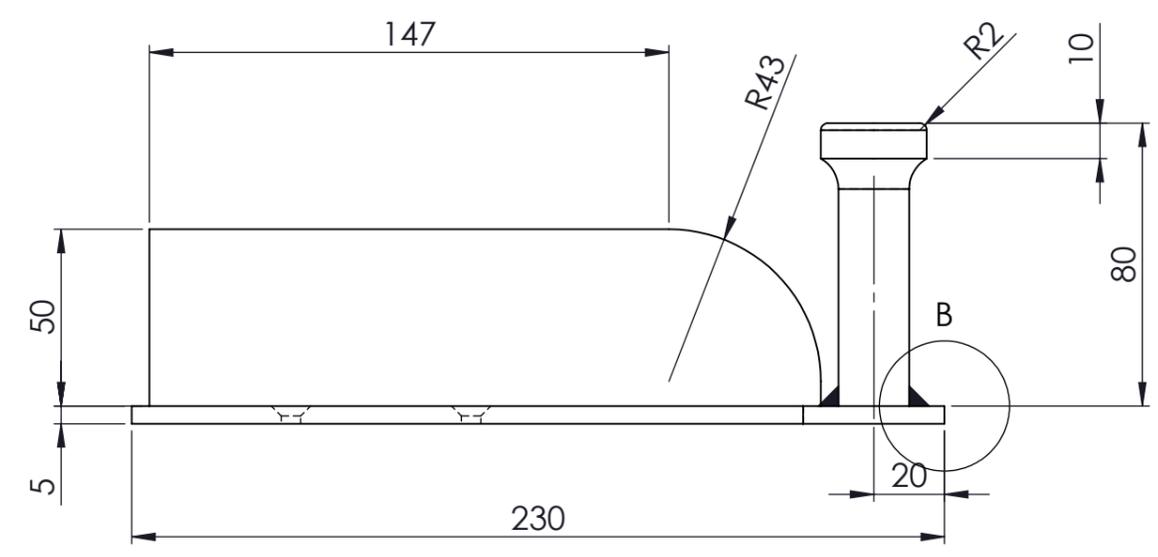
22	2	VÁSTAGO ENGANCHE	1.05.03	AI SI 1020
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOESQUELETO: BRAZOS

	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	José Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		Universidad de La Laguna	
ESCALA:	SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO		Nº P. :1.05.03	
2:1	VÁSTAGO ENGANCHE		Nom.Arch:VÁSTAGOENGANCHE.SLDDRW	

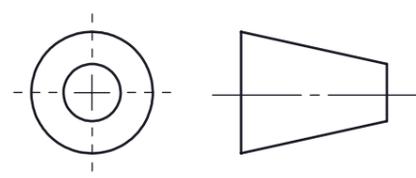
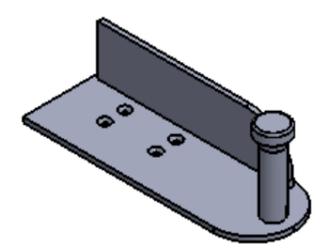


DETALLE A
 ESCALA 2 : 1



DETALLE B

Soldadura en ángulo con garganta (a) de 4 mm, acabado cóncavo
 Soldadura a tope con penetración total, chaflanes a 45°
 Cotas en mm



28	1	REPOSABRAZOS	1.05.04	AISI 1020
MARCA	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MATERIAL

DISEÑO DE UN EXOSQUELETO: BRAZOS				
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Dibujado	Junio 2015	Pablo Alberto Fuerte Rodríguez		
Comprobado	Junio 2015	José Cabrera Delgado		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA:	SUBCONJUNTO SOPORTE ANTEBRAZO		Nº P. :1.05.04	
1:2	REPOSABRAZOS			

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Pliego de Condiciones

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Pliego Condiciones.

1	Condiciones técnicas.....	186
2	Condiciones relativas al actuador.....	186

1 Condiciones técnicas.

Se contemplan las siguientes condiciones en lo relativo a la fabricación de las piezas y calidades mínimas exigibles:

- En la unión de piezas soldadas, el material de aporte a la soldadura no debe tener nunca una resistencia inferior a la menor de las piezas a unir. Las calidades de los distintos materiales se especifican en los planos. Además, las dimensiones de los cordones de soldadura no serán nunca inferiores a las indicadas en los planos.
- Las uniones soldadas se comprobarán visualmente y mediante algún ensayo (líquidos penetrantes, partículas magnéticas) con el fin de determinar la idoneidad de las mismas.
- La calidad de los materiales de tornillería será la indicada en los planos, y nunca inferior a 5.6.
- Los bujes o casquillos serán de bronce al aluminio CDA954 o de un bronce con propiedades mecánicas iguales o superiores.
- La calidad de los tubos no será nunca inferior a la indicada en los planos.
- Las dimensiones de los tubos, entendiendo por éstas los diámetros y espesores, no serán nunca menores a las indicadas en los planos. Se podrán disponer tubos de mayor diámetro y espesor siempre que no se condicione el espacio disponible para el montaje.
- No se emplearán tornillos, pernos, arandelas y demás materiales de tornillería de medidas inferiores a las contempladas en los planos.

2 Condiciones relativas al actuador.

Referente al actuador, se contemplan las siguientes condiciones:

- El actuador será el modelo ALI 4 de la marca MECVEL especificado en planos. En ningún caso podrá disponerse un actuador cuyas características mecánicas en cuanto a potencia, carga a elevar y velocidad sean menores.
- Adicionalmente, se podrá disponer de actuadores de otro modelo o incluso fabricante siempre que se garanticen las condiciones de funcionamiento correctas y no se limite el movimiento del brazo.

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Sección de Ingeniería Industrial

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Mediciones y Presupuesto

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un exoesqueleto: brazos

AUTORES

Cabrera Delgado, Josué

Fuerte Rodríguez, Pablo Alberto

Índice Mediciones y Presupuesto.

1	Mediciones.....	189
2	Presupuesto.....	191

1 Mediciones.

A continuación se detallan las mediciones llevadas a cabo para calcular el costo de las diferentes partidas que conforman el proyecto.

Coste final piezas (material +mecanizado)			
Nombre unidad		Subtotal (€)	
Chapas antebrazo		86,49	
Chapas rótula codo brazo		61,94	
Chapas rótula hombro brazo		62,69	
Chapas reposabrazos		94,75	
Chapas pala para el enganche de la carga		24,30	
Tubo brazo externo*		48,33	
Tubo brazo interno*		35,97	
Tubo antebrazo*		35,97	
Guía y vástago del soporte del antebrazo		11,86	
Total		462,30	
Costo soldadura			
Nombre unidad	Unidades	Precio unitario	Subtotal (€)
Electrodo de rutilo*	256	0,04	10,24
Mano de obra (horas)	1,5	50	75,00
Total			85,24

Tornillería			
Nombre unidad	N° unidades	Precio unitario	Subtotal (€)
Tuerca de mariposa	1	1,63	1,63
Tornillo M16*	25	0,44	11,00
Tornillos M12*	50	0,34	17,00
Tuerca M12*	50	0,42	21,00
Tuerca M16*	25	0,94	23,50
Tornillos M5*	50	0,37	18,50
Tornillo Prisionero*	100	0,17	17,00
Arandelas de diversos tamaños*	50	0,23	11,50
Total			121,13
Bujes			
Nombre unidad	N° unidades	Precio unitario (€)	Subtotal(€)
Bujes de diferentes medidas	18	0,69	12,42
Total			12,42

Sistema de accionamiento eléctrico			
Nombre unidad	Nº unidades	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Actuador ALI 4 ACME SCREW	2	750	1500
Cable	5	1	5
Total			1505

Tabla 46. Mediciones para el conjunto brazo, antebrazo, soporte del antebrazo y pala.

*Ciertos materiales como los perfiles circulares o la tornillería requieren cantidades mínimas de pedido. Esto se ha tenido en cuenta a la hora de efectuar las mediciones.

2 Presupuesto.

Determinas las distintas partidas, se expone el presupuesto de ejecución material del proyecto.

Presupuestos parciales (cantidades en euros)	
Coste final piezas (material+mecanizado)	462,30
Soldadura	85,24
Tornillería	121,13
Bujes	12,42
Sistema de accionamiento eléctrico	1505
Presupuesto de ejecución material (euros)	2186,09

Tabla 47. Presupuesto final.

El presupuesto de ejecución material asciende a la cantidad de DOS MIL CIENTO OCHENTA Y SEIS EUROS CON NUEVE CÉNTIMOS.