



Proyecto Fin de Carrera

INTEGRACIÓN DE MECANISMOS PARA EL
MOVIMIENTO BIDIMENSIONAL DE INDUCTORES
EN COCINAS DE INDUCCIÓN FLEXIBLE

Autor

Jesús Ricardo Ruiz Gracia

Director

Juan Lladó París

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

2013

AGRADECIMIENTOS

Finalizo con el presente proyecto una etapa de mi vida que siempre recordaré, sólo tengo buenos recuerdos de todos los compañeros y amigos que he hecho.

Quiero agradecer a BSH Electrodomésticos España S.A. la posibilidad que me ha brindado de realizar este PFC dentro del Proyecto OTRI: “Análisis e implementación de inductores móviles en cocinas de inducción”.

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a Juan y Beatriz, por haberme dirigido este proyecto de fin de carrera. Por todas las atenciones, por su apoyo y por todo lo que me han enseñado durante este tiempo.

A Manuel, *el andaluz*, mi compañero de despacho y de proyecto, con el que prácticamente he convivido a diario durante estos casi 2 años. Gracias por tu ayuda y por todos los buenos momentos.

A mis padres, Francisco y Pilar, porque son las personas más importantes de mi vida, a ellos les debo todo lo que soy y lo que tengo. Sé que sin ellos yo no sería yo, ni estaría donde estoy. Esto también es mérito vuestro, ya que sin vosotros nunca lo habría conseguido.

Al resto de mi familia: mi hermano Fran, mi prima Esther, mis tíos Josemaría, José y Mª Jesús, y mis abuelos.

Al resto de profesores que me han impartido clase a lo largo de mi vida. En especial, a aquellos que confiaban en mí y me animaron a estudiar esta carrera.

A todos mis compañeros y amigos de la Universidad, por todos los buenos momentos vividos durante estos años, por los viajes, las fiestas y por todas las horas de estudio compartidas, que al final han merecido la pena. Mención especial a todo el “Club de Fans de Imberbe”, pero sobre todo a Fredy, con el que he compartido muchísimas cosas y me ha ayudado en momentos fundamentales de la carrera.

A todos mis amigos de siempre, parte esencial en mi vida, en particular a David, Fernando, Mario, Tito y Elena, y a todas las demás personas que se han cruzado en mi camino y que me han hecho ser quien soy.

A todos ellos, GRACIAS.

INTEGRACIÓN DE MECANISMOS PARA EL MOVIMIENTO BIDIMENSIONAL

DE INDUCTORES EN COCINAS DE INDUCCIÓN FLEXIBLE

RESUMEN

El presente proyecto, fruto del acuerdo de colaboración entre la empresa BSH y la Universidad de Zaragoza, se centra en el diseño de un prototipo mecánico para proporcionar movimiento bidimensional a los inductores de una cocina de inducción que posteriormente pueda ser incorporado en las cocinas comerciales. El objetivo es dotar a una cocina de inducción de tres inductores móviles que permitan el calentamiento de hasta seis recipientes de cualquier tamaño colocados aleatoriamente en cualquier posición de la placa.

El desarrollo de las tareas realizadas comienza con un análisis de la tecnología actual en cocinas de inducción y de los avances existentes en cocinas de inducción flexible. Posteriormente, analizando todas las configuraciones estructurales posibles para el sistema mecánico de movimiento, se selecciona un sistema de 3 brazos robóticos (R+R) como el mejor sistema capaz de realizar el movimiento de los inductores.

Con el uso del programa informático Matlab, se calcula el posicionado y dimensionado de los 3 brazos robóticos para que el sistema cumpla las restricciones acordadas previamente con BSH. Se realiza el modelo matemático de simulación de movimiento y se calculan los pares necesarios de los motores implementándolo en un programa realizado en Matlab.

Se realizan varias alternativas de diseño para los brazos robóticos con los programas informáticos de CAD 3ds Max y Nx-Unigraphics, calculándose su resistencia a los esfuerzos mediante el Método de los Elementos Finitos con la herramienta de CAE de Nx-Unigraphics. Una vez elegida la mejor alternativa para el sistema de brazos robóticos, se realizan los planos acotados de los elementos que han sido creados específicamente para este proyecto con el programa Nx-Unigraphics, y se escogen las soluciones comerciales para el resto de componentes. Finalmente, comienza su construcción y montaje en el Taller de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.

Como en todo proceso de diseño, ha habido una evolución temporal en el desarrollo del proyecto según se avanzaba en el diseño del prototipo, o iban surgiendo problemas a los que había que enfrentarse y solucionar. Para el correcto desarrollo del proyecto, se han mantenido reuniones periódicas con los responsables de la empresa BSH, en las que se han ido presentando los avances realizados y acordando los siguientes pasos a seguir.

Índice de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Análisis de la tecnología actual en cocinas de inducción	1
1.2	Inducción flexible. Ventajas e inconvenientes.....	2
1.3	Objeto y alcance del proyecto.....	4
1.4	Estructura de contenidos	7
2.	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO A NIVEL DE PROTOTIPO	9
2.1	Especificaciones obligatorias.....	9
2.2	Especificaciones deseadas.....	11
3.	CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DEL SISTEMA MECÁNICO	13
3.1	Elección del sistema mecánico de movimiento	13
3.2	Estructura general del sistema mecánico de movimiento.....	14
4.	DESARROLLO TÉCNICO DEL PROTOTIPO	15
4.1	Posición de anclaje en el bastidor y dimensionado de los brazos robóticos	15
4.2	Selección previa de material y forma de la sección de los brazos robóticos.....	22
4.3	Selección de los motores comerciales	25
4.3.1	Modelo matemático simplificado de simulación de movimiento.....	25
4.3.2	Cálculo de los pares necesarios para cada motor	30
4.3.3	Cálculo del diámetro del eje para motor	31
4.3.4	Selección de los motores paso a paso.....	32
4.4	Alternativas de diseño del brazo robótico	35
4.4.1	Ánáisis de soluciones al enrollamiento de los cables.....	35
4.4.2	Selección de la geometría óptima para cada brazo	38
4.5	Cálculo resistente del brazo robótico final	44
5.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO.....	49
5.1	Componentes principales del sistema de brazos robóticos.....	49
5.2	Sistema de transmisión de movimiento y cableado	51

5.3	Uniones entre elementos del sistema mecánico	53
5.4	Controlador de los motores y placa electrónica	58
5.5	Montaje y lista de piezas del diseño final	60
5.6	Implementación del sistema de brazos robóticos en conjunto cocina.....	63
6.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO: OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO.....	67
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
8.	ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	71
	ANEXOS	77
	Anexo A. ESTUDIOS PREVIOS.....	77
A.1.	Análisis de las cocinas de inducción actuales del grupo BSH.....	77
A.2.	Análisis de las patentes en inducción flexible	86
	Anexo B. DIFERENTES SISTEMAS MOVIMIENTO PLANTEADOS.....	89
B.1.	Bocetos iniciales.....	89
B.1.1	Mismo sistema mecánico para cada inductor.....	89
B.1.2	Diferente sistema mecánico para cada inductor	93
B.2.	Sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos	95
B.2.1	Alternativas sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos	95
B.2.2	Modelado matemático sistema traslación.....	105
B.3.	Elección de sistema mecánico de movimiento para prototipo.....	108
	Anexo C. SISTEMA ELEGIDO PARA PROTOTIPO (R+R)	109
C.1.	Elección previa de material	109
C.2.	Cálculo de motores	112
C.2.1	Código de Matlab para cálculo de motores	112
C.2.2	Gráficas obtenidas en Matlab	119
C.2.3	Hojas de características de motores	120
C.3.	Diferentes modelos desarrollados de brazos robóticos	122
C.4.	Análisis Elementos Finitos prototipo final.....	129
C.5.	Propiedades de la aleación de Aluminio serie 7	131

Anexo D.	PIEZAS COMPONENTES DE PROTOTIPO Y UNIONES.....	135
Anexo E.	MÉTODOS Y NORMATIVA.....	139
Anexo F.	CATÁLOGOS.....	143
Anexo G.	PLANOS.....	151

PREFACIO

El proyecto se ha llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, y se enmarca dentro del Proyecto INNPACTO 2011 “Plataforma de encimeras de inducción eficientes 2015” y del Proyecto OTRI Universidad de Zaragoza de Investigación y Desarrollo (2012/0245), entre BSH Electrodomésticos España S.A. y la Universidad de Zaragoza, con título “Análisis e implementación de inductores móviles en cocinas de inducción” y duración de 1 Enero de 2012 a 31 de Octubre de 2014.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Análisis de la tecnología actual en cocinas de inducción

El calentamiento por inducción se fundamenta en la generación de calor por fenómenos electromagnéticos y corrientes de Foucault e histéresis magnética. La aplicación doméstica de este sistema de calentamiento es reciente, debido fundamentalmente a que requiere el uso de tecnologías electrónicas de complejidad muy superior al resto de electrodomésticos de su segmento, contando con numerosas ventajas frente a otros sistemas de cocción:

- Ahorro energético
- Rapidez de calentamiento
- Seguridad (son superficies de cocción frías)

En la actualidad, la tecnología de calentamiento en cocinas domésticas por inducción se encuentra lo suficientemente consolidada, como para que resulte difícil encontrar diferencias notables entre las encimeras de inducción de los distintos fabricantes. Todos ellos presentan modelos con estéticas parecidas (cristales vitrocerámicos que son suministrados por unos pocos proveedores en todo el mundo a todos los fabricantes de cocinas), y con similares características electrónicas: potencias máximas suministrables, número y tamaño de los fuegos, disposición de los mismos, etc. En el Anexo A.1 se ha realizado un estudio en profundidad sobre las características de todos los modelos de los que dispone actualmente el grupo BSH.

En los segmentos Top del mercado de cocinas de inducción es donde más se valoran las prestaciones tecnológicas que las diferencian de las demás, de ahí que interese dotar a la cocina de características especiales y novedosas que aporten mayor valor añadido al producto y si es posible a un precio competitivo.

Entre las diversas necesidades del mercado no cubiertas a plena satisfacción hasta el momento por las cocinas de inducción destaca el conseguir superficies de cocción activas en su totalidad, así el usuario puede colocar uno o varios recipientes de cualquier tamaño y forma, en la posición de la placa encimera que desee, por lo que se dispondrá de una superficie de inducción con una flexibilidad total.

Hoy en día existen en el mercado cocinas de inducción que se presentan como solución flexible de cocinado (figura 1.1), si bien su tecnología es diferente y van orientadas a distintos segmentos del mercado. Una de estas tecnologías que se ha adoptado consiste en colocar múltiples inductores estáticos que cubran casi de forma completa el cristal vitrocerámico de forma que cuando el usuario coloca el recipiente en cualquier posición se activan sólo aquellos inductores que quedan debajo.



Figura 1.1. Distintas soluciones comerciales presentes en inducción para aportar superficies flexibles (de más rígida -arriba- a más flexible -abajo-)

1.2 Inducción flexible. Ventajas e inconvenientes

En los últimos años, el concepto de las zonas de calentamiento flexibles ha sido introducido en las cocinas con el fin de hacer frente a la demanda de flexibilidad de los usuarios. El objetivo principal es hacer cocinas adaptables al uso de diferentes recipientes, de cualquier forma y tamaño colocados aleatoriamente sobre la placa vitrocerámica. Como resultado, han surgido muchas soluciones teóricas que presentan diferentes ventajas e inconvenientes: el tamaño de la zona de calentamiento puede ser adaptado por medio de inductores concéntricos activados independientemente (figura 1.2.a); por otra parte, el ajuste a la forma del recipiente puede lograrse con inductores circulares situados de forma no concéntrica (figura 1.2.b), con formas alargadas (figura 1.2.c), o combinando ambos tipos; finalmente, existe el concepto de superficie totalmente activa, que está compuesta por una red de pequeños inductores (figura 1.2.d).

Entre las limitaciones que presentan estas soluciones destaca la necesidad de incrementar el número de inductores y la complejidad de las etapas inversoras para obtener una gran flexibilidad, lo que conlleva mayores costes. Además, pequeños devanados y formas no circulares de los inductores son menos eficientes, y el acoplamiento magnético entre inductores puede causar que los bloques inversores no funcionen adecuadamente, o incluso su fallo si hay un acoplamiento significativo.

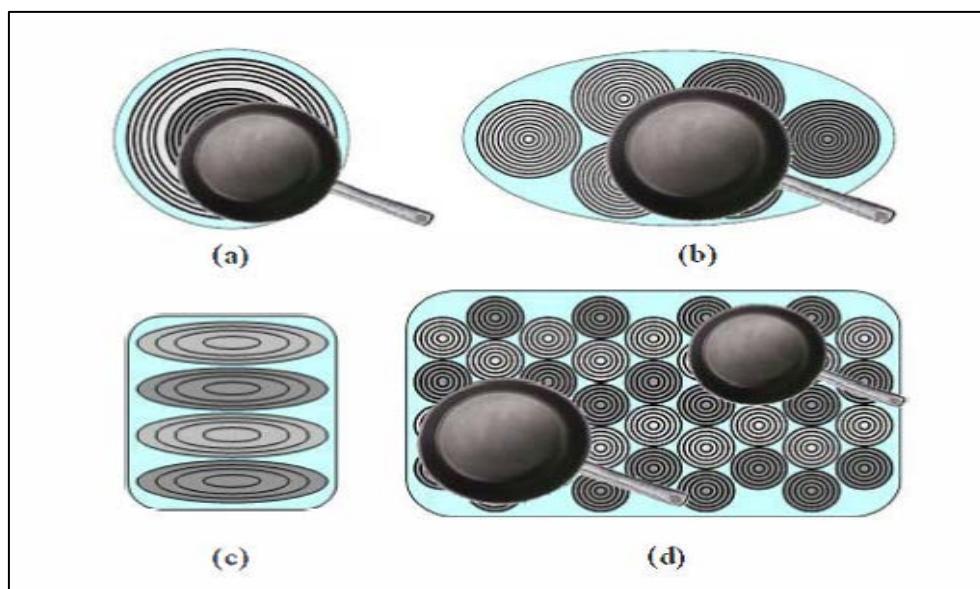


Figura 1.2. Zonas flexibles en cocinas de inducción.

Como solución alternativa, se ha propuesto por varios investigadores la movilidad de los inductores mediante mecanismos que sitúan el inductor debajo del recipiente y que le comunican, en caso necesario, un movimiento que barre toda la base del recipiente. Las patentes existentes que hacen referencia a las investigaciones mencionadas se recogen en el Anexo A.2.

1.3 Objeto y alcance del proyecto

Para mejorar las prestaciones que presentan las soluciones existentes en cocinas de inducción flexibles (tabla 1-1), se ha propuesto la movilidad en 2D (figura 1.3) de los inductores a partir de la implementación de un sistema mecánico que mueva los inductores hasta debajo de la posición en la que el usuario ha colocado el recipiente. De esta forma, con un mínimo número de inductores se puede cubrir cualquier posición, tamaño y forma de varios recipientes. El objeto es conseguir un producto con más prestaciones y versatilidad que pudiera ser asequible a todos los segmentos del mercado con un muy buen comportamiento térmico.

	Inductores estáticos		Inductores móviles
	Ovalados	Múltiples mini-inductores	
Coste	Bajo	Alto	Medio
Flexibilidad	Media	Alta	Alta
Eficiencia	Media	Media	Alta
Distribución térmica	Regular	Buena	Muy buena

Tabla 1-1. Comparación prestaciones de soluciones a inducción flexible.

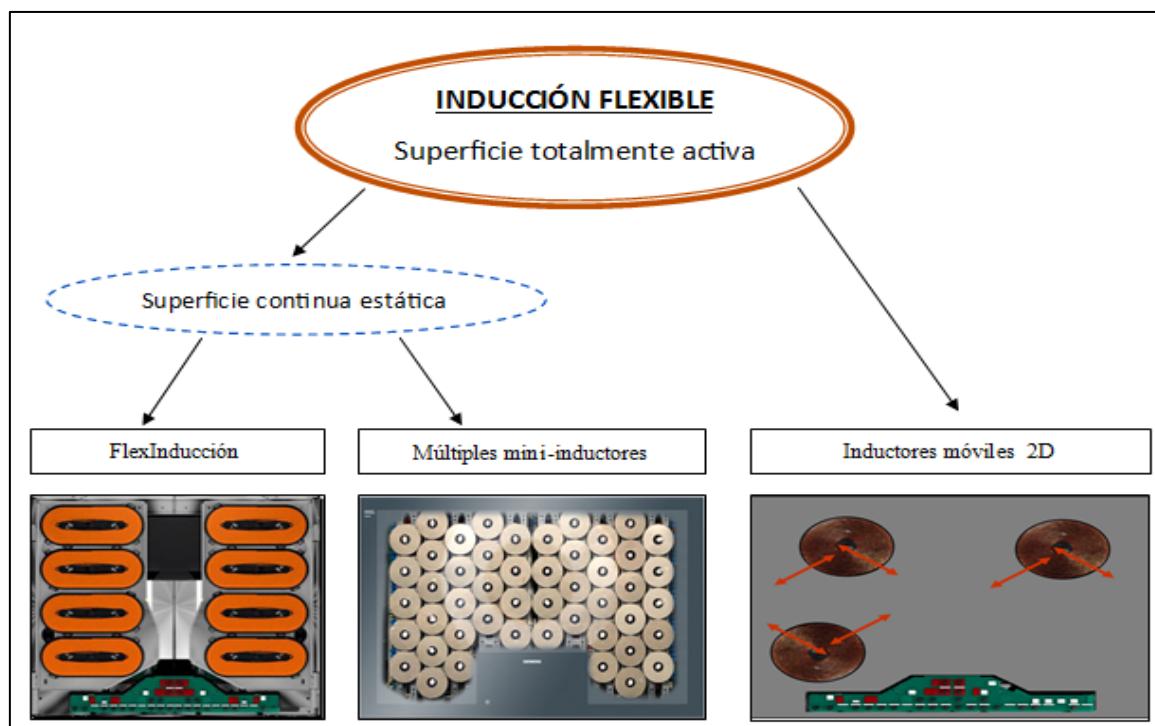


Figura 1.3. Inducción flexible.

En el diseño mecánico los aspectos más relevantes a considerar son la configuración estructural, el dimensionado del sistema mecánico y la elección de sus puntos de fijación en el bastidor de la cocina, que conjuntamente con las estrategias de movimiento y de calentamiento seleccionadas, le confieran a la cocina una flexibilidad total.

Las estrategias óptimas de movimiento se deben basar en que se proporcione cobertura a toda la superficie de cocción con un número mínimo de inductores iguales, de diámetro medio, con restricciones de movimiento al ser un espacio o área de trabajo limitado donde se pueden producir problemas de interferencias y de choques.

Por otra parte, las soluciones de calentamiento de los recipientes (figura 1.4) podrán ser de tipo estático, si el inductor permanece fijo debajo del recipiente, o dinámico, ya sea describiendo su centro trayectorias diversas en función de la forma de la base del recipiente (figura 1.5) o que deba calentar dos recipientes.

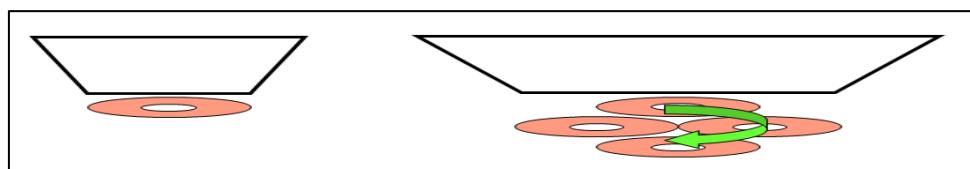


Figura 1.4. Calentamiento estático y dinámico de un recipiente.

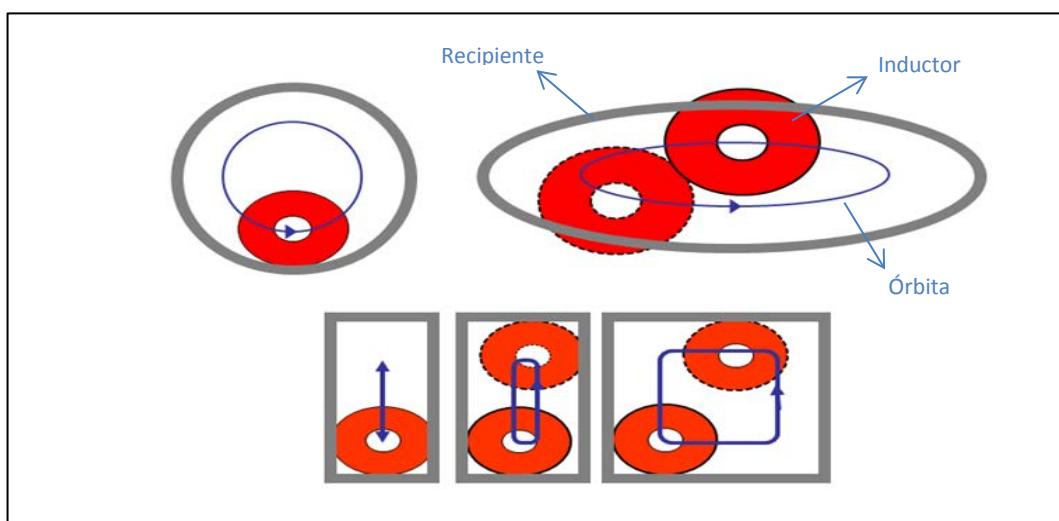


Figura 1.5. Distintos tipos de trayectorias en calentamiento dinámico.

Las principales actividades llevadas a cabo en el proyecto, han sido:

- Análisis de mercado de las cocinas de inducción comerciales y de la tecnología actual de inductores móviles, revisando los artículos y patentes existentes al respecto. Se realizan tablas comparativas entre la tecnología actual y la del prototipo UNIZAR de 3 inductores móviles que se desarrolla a lo largo de este proyecto, con el programa Microsoft Excel.
- Definición de los condicionantes obligados y deseados en el diseño del prototipo, de acuerdo a los criterios definidos por la empresa BSH, estableciendo las especificaciones a satisfacer por el diseño.
- Examen y selección de varios sistemas mecánicos de movimiento, llegando al resultado de que el sistema más apropiado para las especificaciones y objetivos impuestos por BSH, es el sistema de 3 brazos robóticos con dos rotaciones cada uno (R+R).
- Realización de dos programas en Matlab, uno para calcular la geometría óptima de los brazos robóticos y la posición de su anclaje en el bastidor introduciendo las restricciones necesarias, y otro para calcular el par necesario de cada motor, obtenido a partir del modelo matemático de simulación del movimiento calculado previamente.
- Diseño de todas las alternativas de sistemas mecánicos de movimiento analizadas, mediante los programas de CAD 3ds Max y NX-Unigraphics, desarrollando en detalle las diferentes configuraciones de sistemas de brazos robóticos.
- Cálculo de los esfuerzos soportados por las alternativas seleccionadas mediante el Método de los Elementos Finitos, para ello se ha utilizado la herramienta de CAE del programa NX-Unigraphics, eligiendo el motor de cálculo Nastran.
- Bocetos y planos de los prototipos, incluyendo el listado de componentes, materiales, tipos de uniones y accionamientos.
- Fabricación y montaje del prototipo en el Taller de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.

Queda fuera del alcance de este proyecto todos los temas relacionados con la transferencia óptima de calor entre inductor y recipiente, la sensorización de los brazos robóticos, los algoritmos y estrategias de control de los inductores para su movimiento y para el calentamiento, y el sistema de detección de los recipientes sobre la placa.

1.4 Estructura de contenidos

La organización del documento es la siguiente: en el capítulo 2 se describen todas las especificaciones que debe cumplir el diseño a nivel de prototipo de acuerdo a los criterios definidos por BSH. El capítulo 3 se dedica a la realización de un estudio en el que se decide la mejor configuración estructural para el movimiento de los inductores, para en el capítulo 4 hacer el desarrollo técnico completo del prototipo, elaborando y analizando diferentes alternativas de sistemas de brazos robóticos. En el capítulo 5 se detalla la construcción y el montaje del prototipo, incluyendo el listado de componentes, materiales, tipos de uniones y accionamientos, y su implementación física en el conjunto cocina. Finalmente, se establecen las futuras líneas de investigación para la optimización del prototipo.

A continuación de la memoria se disponen varios anexos en los que se profundiza y explica en mayor detalle los estudios previos, la elección de la configuración estructural óptima, los diferentes sistemas planteados de brazos robóticos, los ensayos realizados por el Método de los Elementos Finitos y los catálogos utilizados para la elección de los componentes comerciales, finalizando con los planos realizados para la fabricación de los elementos diseñados expresamente para este proyecto, y que han sido utilizados por el Taller de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza para la construcción y montaje del prototipo.

2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO A NIVEL DE PROTOTIPO

El proceso de diseño de un prototipo mecánico que dote de movimiento en 2D a los inductores de una cocina se realiza a partir de una propuesta metodológica, que tras el planteamiento y estructuración del proyecto contempla el desarrollo de un listado jerarquizado de necesidades y de los posibles problemas que se vayan a presentar en su materialización, antes de proceder al análisis de las soluciones que se adopten para solventar estos problemas e implementarlas en el diseño del prototipo previo a su construcción y puesta a punto sometiéndolo a diferentes pruebas de funcionalidad y uso.

Los criterios que se van a utilizar para establecer las especificaciones que debe satisfacer el prototipo hacen referencia: a la interacción directa con el usuario; a los principios físico-técnicos de funcionamiento; a los elementos o componentes; y a la fabricación, aun cuando un prototipo es único y su construcción no coincide con su producción industrial.

Las necesidades se han jerarquizado clasificándolas en dos grupos: obligatorias, cuyo cumplimiento es estrictamente necesario para que la solución sea aceptada; y deseadas, que en esta primera fase de desarrollo del prototipo no se consideran como relevantes.

2.1 Especificaciones obligatorias

Los requerimientos obligatorios que debe satisfacer el prototipo antes de su diseño y construcción, son:

- 1)** El tamaño de la placa de cocina es un rectángulo de 726mm x 482mm.
- 2)** El número de inductores móviles será de 3.
- 3)** Los inductores serán iguales, y de doble corona con diámetros 12 cm y 18 cm.
- 4)** Los inductores se moverán en un mismo plano horizontal paralelo al plano horizontal de la placa.
- 5)** Los recipientes a calentar serán de base circular y su diámetro estará comprendido entre 7 y 32 centímetros. Según estadísticas del grupo BSH, el 95 % de los recipientes comerciales son de base circular, y el 90 % de estos presentan un diámetro comprendido entre 15 y 21 centímetros.

- 6)** La flexibilidad del prototipo será del 100 %, siendo capaz de calentar hasta un máximo de 6 recipientes de cualquier tamaño colocados en cualquier posición.
- 7)** La distancia máxima entre el plano horizontal de la placa y el plano horizontal de cada inductor debe ser igual o menor de 1 milímetro, para que el campo de inducción magnética se transmita correctamente a los recipientes y así cumpla los requisitos de funcionamiento de la placa de inducción.
- 8)** Los sistemas mecánicos encargados de proporcionar movimiento a cada inductor serán lo menos complejos posibles, pudiendo diferir en las dimensiones.
- 9)** El inductor debe ser capaz de realizar un calentamiento dinámico (describir su centro una trayectoria circular debajo del recipiente) si el recipiente a calentar es igual o mayor a 21 centímetros.
- 10)** Si un único inductor calienta 2 recipientes, el tiempo máximo que puede transcurrir desde que parte de una posición de calentamiento y regresa a la misma es de 20 segundos.
- 11)** El tiempo máximo de respuesta de un inductor es de 6 segundos.
- 12)** El volumen ocupado por el sistema mecánico de movimiento debe minimizarse para evitar interferencias o choques entre sus componentes y con otros elementos de la cocina.
- 13)** Los accionamientos para corregir el movimiento del inductor serán de tipo eléctrico.
- 14)** Se debe evitar en lo posible la transmisión de movimiento desde cada accionamiento para minimizar el número de componentes, facilitar el montaje, y la accesibilidad en caso de reparación.
- 15)** Bajo nivel de fricción seca en las uniones eliminándose los lubricantes.

2.2 Especificaciones deseadas

Por otra parte, entre los requerimientos deseables pero no relevantes que deben contemplarse en una posterior etapa de optimización del prototipo se incluyen:

- La altura del sistema mecánico de movimiento será la menor posible para tener un tamaño acorde a las cocinas existentes en el mercado.
- La situación y tamaño del display.
- La cocina durante su vida útil, 10 años (10.000 horas de funcionamiento \approx 3h/día), no requerirá mantenimiento.
- El nivel de ruido y de vibraciones será tal que no existirán quejas de los usuarios.
- Los componentes del sistema mecánico de movimiento presentan una baja dependencia de tolerancias de fabricación, ajustes y acabados.
- Una alta resolución (precisión) en el posicionado y en la descripción de las trayectorias por el centro del inductor en el calentamiento.
- Los materiales que se escogen para los componentes del sistema mecánico de movimiento deberán ser en lo posible reciclables tanto por imposición legal como por la creciente sensibilidad ciudadana.
- Los componentes del sistema mecánico de movimiento deberán adquirirse y/o fabricarse a un coste razonable.

Los problemas que se han detectado durante el desarrollo del proyecto, son:

- El posicionamiento de los brazos robóticos en la carcasa de la cocina.
- El dimensionamiento de los brazos robóticos.
- La selección de los accionamientos comerciales.
- Las posibles interferencias o choques entre los brazos robóticos, y de estos con la carcasa de la cocina y otros elementos ya sean electrónicos o del circuito de refrigeración.
- La rotura o enrollamiento de los distintos cables que salen del inductor, de los sensores y de los accionamientos.
- La existencia de zonas de la placa que no sean accesibles por ningún inductor.

3. CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DEL SISTEMA MECÁNICO

3.1 Elección del sistema mecánico de movimiento

En el estudio de la cinemática de sólidos en un plano, la situación de un punto y su movimiento vienen definidos por dos parámetros independientes, resultando que el mecanismo, o estructura de cadena abierta, necesario para modelizar este estado debe poseer dos grados de libertad. Las soluciones esquemáticas más sencillas (figura 3.1) combinan enlaces entre los sólidos que componen la estructura: de tipo traslacional, T, de ejes ortogonales situados en el plano de movimiento; y, de tipo rotacional, R, de ejes perpendiculares al plano.

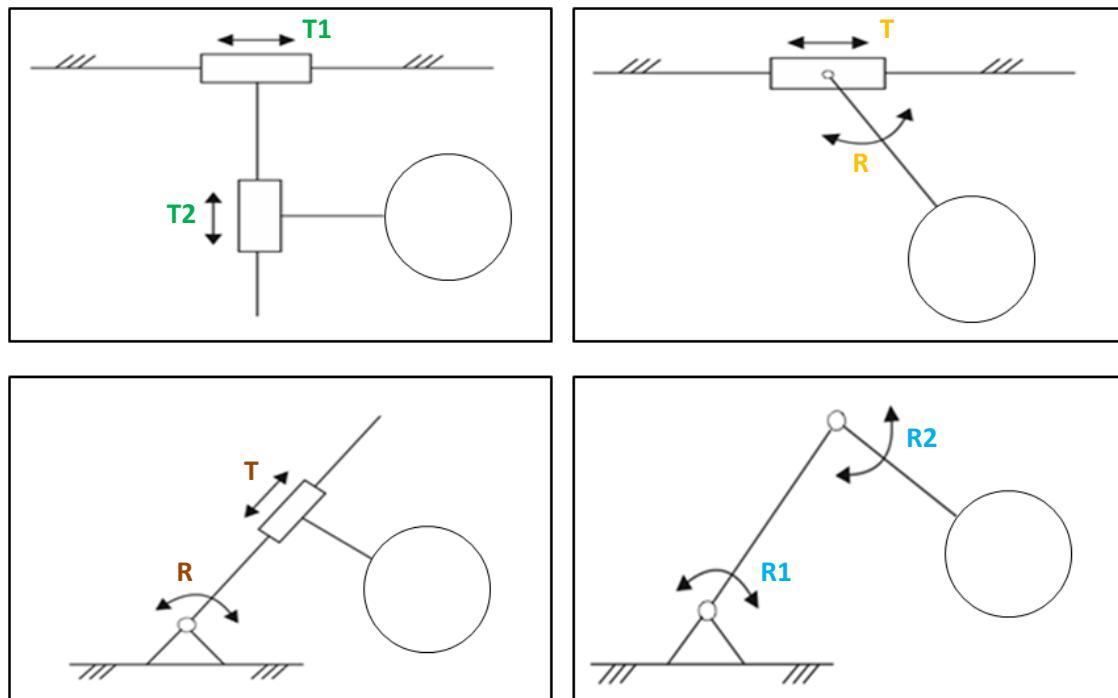


Figura 3.1. Esquemas cinemáticos de mecanismos con 2 G.L.

El mecanismo que más se adapta a los requerimientos obligatorios definidos en el capítulo 2, es la configuración estructural R+R, donde los accionamientos, motores eléctricos rotativos, actúan directamente sobre cada sólido, no siendo necesario transmitir el movimiento, con lo que se minimiza el número de componentes así como el volumen ocupado, y se facilita el montaje y la accesibilidad al mismo. Esta decisión se explica en profundidad en el Anexo B.

3.2 Estructura general del sistema mecánico de movimiento

La estructura de cada mecanismo se integrará en un brazo robótico constituido (figura 3.2), por:

- Una estructura mecánica o mecanismo de cadena abierta cuyo sólido final será solidario al inductor.
- Los accionamientos que confieren movimiento a los sólidos de la estructura.
- Los captadores (sensores) necesarios para el control que permitan conocer el estado mecánico de cada sólido así como el estado del entorno.
- El sistema de control que manda a los accionamientos a partir de la definición de los movimientos a realizar, previo tratamiento de la información suministrada por los captadores.

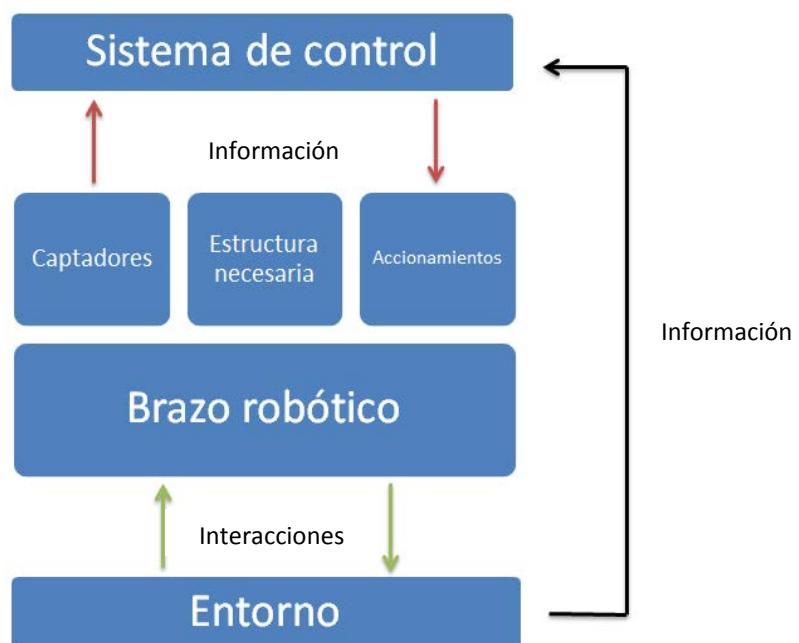


Figura 3.2. Estructura general del brazo robótico

La tarea encomendada al brazo robótico será realizar el calentamiento de uno o varios recipientes situados sobre una placa vitrocerámica mediante un inductor que se desplace paralelamente a la superficie de la placa. El objetivo es situar el centro del inductor en una posición determinada de un plano horizontal que en calentamiento estático se colocaría debajo del centro del recipiente, y en calentamiento dinámico debería poder describir trayectorias contenidas en dicho plano.

4. DESARROLLO TÉCNICO DEL PROTOTIPO

4.1 Posición de anclaje en el bastidor y dimensionado de los brazos robóticos

Se formula un problema de optimización con restricciones y función objetivo no lineales, de forma que se pueda implementar su resolución en Matlab, y que mediante algoritmos de búsqueda calcule los puntos de anclaje óptimos de los brazos y sus dimensiones características. A continuación se presentan los pasos seguidos para su realización.

1) Definir función objetivo

El objetivo de la optimización es maximizar el área que pueden alcanzar los centros de tres inductores móviles que trabajan conjuntamente en una placa de inducción. El centro de cada inductor posee dos grados de libertad, uno por cada rotación.

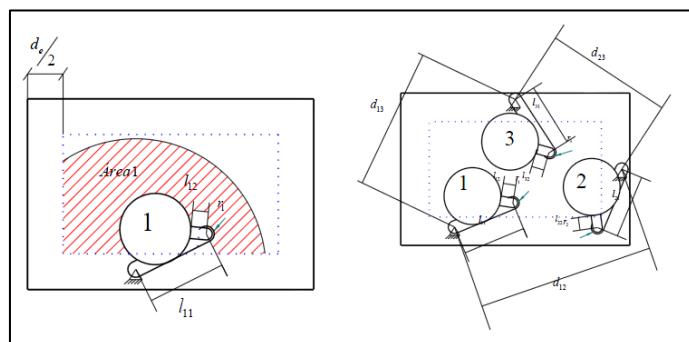


Figura 4.1. Área de trabajo de un brazo robótico y visión de conjunto del sistema.

2) Descripción del espacio de trabajo

El espacio de trabajo se define como un rectángulo de dimensiones ($a \times b$) en el que se anclan tres brazos robóticos (figura 4.2) de dos grados de libertad que mueven tres inductores dobles de diámetro de corona exterior d_e y de corona interior d_i .

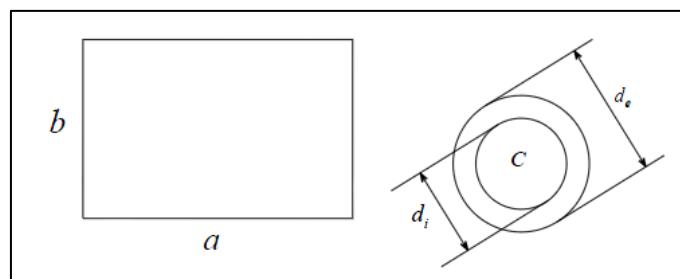


Figura 4.2. Dimensiones características de bastidor e inductor.

3) Parámetros y datos de entrada

Los parámetros son una serie de magnitudes fijas, que no pueden modificarse, y que condicionan aspectos esenciales del diseño como la forma, tamaño y materiales. En la optimización del área que pueden alcanzar los tres inductores, los parámetros que vienen impuestos son la dimensión del bastidor ($a \times b$), los diámetros de las dos coronas del inductor, y la anchura de las barras del brazo robótico.

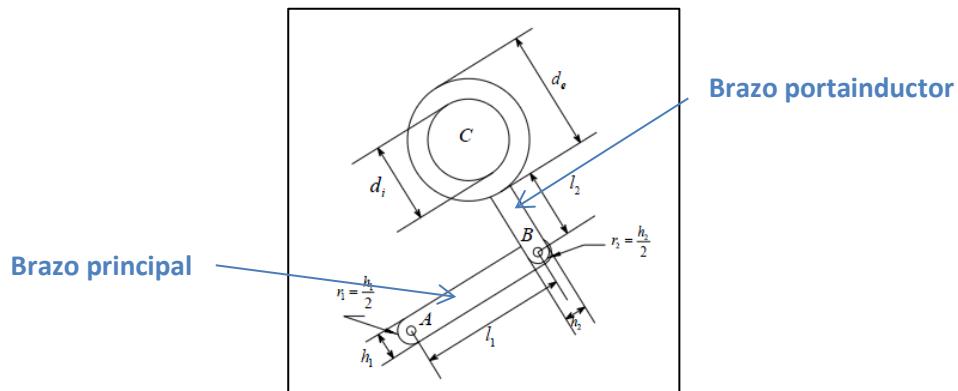


Figura 4.3. Parámetros del brazo robótico.

Considerando h_2 la anchura de la barra 2 (brazo portainductor) siempre menor que h_1 , y siendo r_1 y r_2 función de la anchura de brazo, los únicos parámetros que influyen son: a , b , r_1 , d_e .

4) Variables de diseño

Las variables de diseño son el grupo de magnitudes que lo caracterizan y que son susceptibles de ser modificadas para mejorar las características del propio diseño. Son las incógnitas del problema de optimización, en este caso, los puntos de anclaje (puntos de fijación al bastidor) y las dimensiones de los brazos robóticos.

$$x_i \{x_{a1}, y_{a1}, x_{a2}, y_{a2}, x_{a3}, y_{a3}, l_{11}, l_{12}, l_{13}\}$$

$$x_{1:6} = \{x_{a1}, y_{a1}, x_{a2}, y_{a2}, x_{a3}, y_{a3}\}$$

$$x_{7:9} = \{l_{11}, l_{12}, l_{13}\}$$

5) Variables de estado

Las variables de estado solo dependen de los parámetros y de las variables de diseño. En este problema, la longitud del brazo portainductor es función del brazo principal, así como de la distancia mínima entre el punto de anclaje del mecanismo y los bordes del bastidor.

Si esta relación no se cumpliese, no se podría garantizar que el centro del inductor fuera capaz de acceder a todos los puntos de su área de trabajo, ni que el brazo portainductor frente al brazo principal pudiera realizar giros completos, por lo tanto se debe de cumplir: $y_a + l_1 = l_2 + d_e$. En un cálculo inicial, se obtuvo una primera solución introduciendo esta relación como: $l_1 = l_2 + d_e$, colocando el inicio del brazo junto al borde del bastidor, pero tras los primeros diseños de brazos robóticos, se observó que no era la mejor solución y se modificó esta relación, introduciendo la distancia y_a como incógnita del problema.

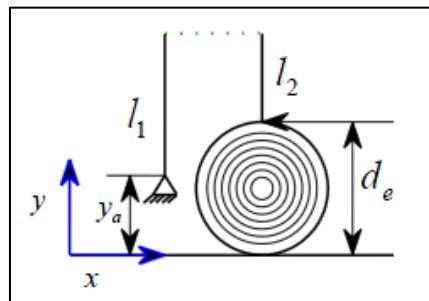


Figura 4.4. Relación entre longitudes de brazos.

6) Restricciones

- Distancia mínima entre brazos robóticos (figura 4.5):
 - Impuesta por la geometría propia de cada brazo.

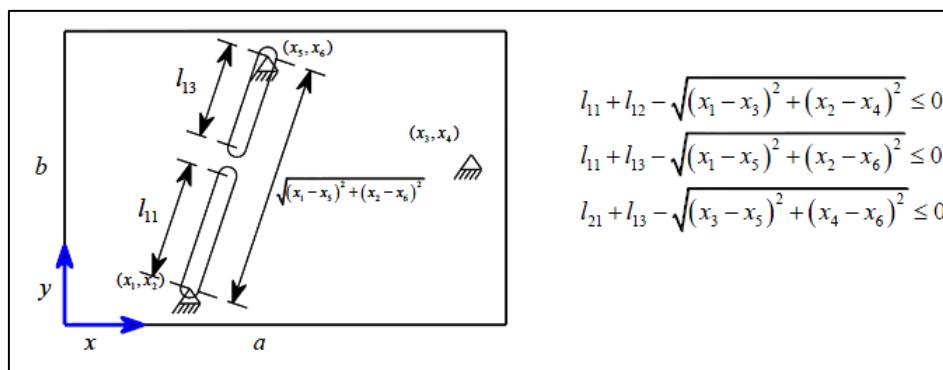


Figura 4.5. Distancia mínima entre anclajes y restricciones asociadas.

- Distancia mínima del anclaje al borde del bastidor (figura 4.6):

- Para que el brazo pueda moverse, la distancia mínima del punto de anclaje a los bordes del bastidor deberá ser mayor al radio del brazo principal.

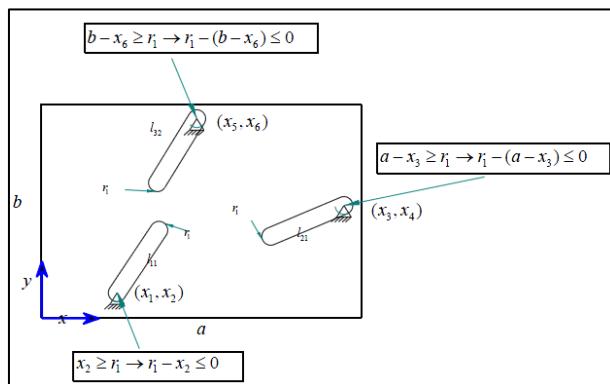


Figura 4.6. Distancia mínima a los bordes y restricciones asociadas.

- Trayectorias circulares:

- Los diámetros de las coronas del inductor doble, son los mismos que los de las trayectorias circulares que ha de atender el inductor (figura 4.7).

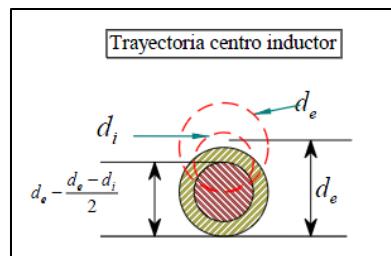


Figura 4.7. Trayectoria del centro del inductor

- Para un punto cualquiera, sin restricciones geométricas, existen siempre dos soluciones simétricas respecto a la línea que une el punto de anclaje con el centro del inductor (figura 4.8).

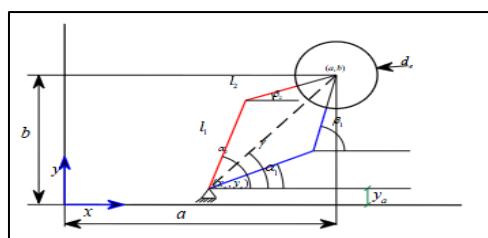


Figura 4.8. Soluciones geométricas para un punto del área de alcance.

- Teniendo en cuenta cómo afecta el borde del bastidor a las soluciones, existen zonas dentro del área de alcance con sólo una solución posible (figura 4.9).

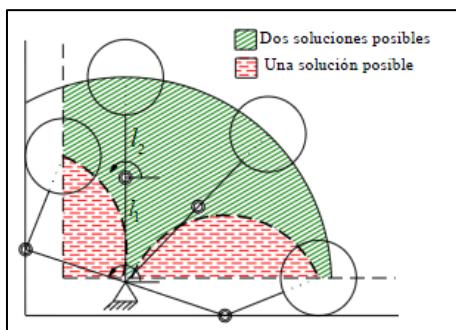


Figura 4.9. Soluciones posibles con restricciones geométricas.

La trayectoria ha de ser recorrida por el centro del inductor de forma continua, para lo cual habrá que garantizar que ninguna, dentro del área de trabajo, incluya puntos de las dos zonas de solución única.

En el caso que se indica en la figura 4.10, si $x_a \leq S$, existirían trayectorias circulares que no se podrían realizar, en cambio siempre que sea mayor que S , se garantiza que todas las trayectorias circulares en el área de trabajo del inductor son posibles. S , es igual $x_2 + r_1$, siendo (x_2, y_2) el centro del segundo área de solución única.

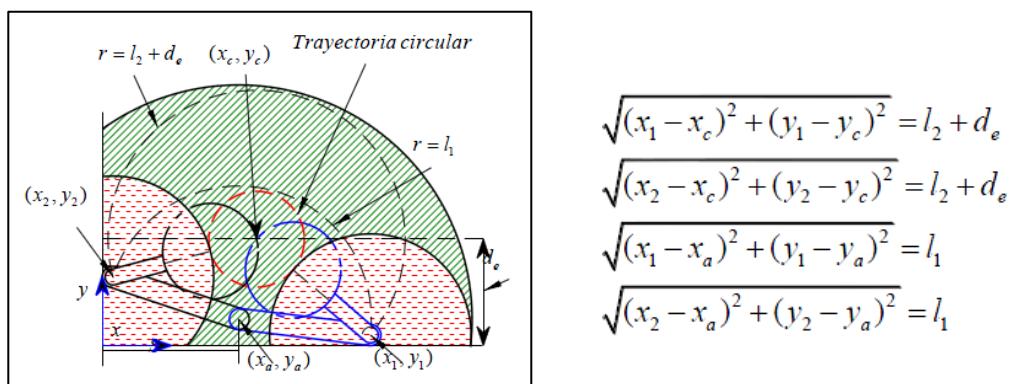


Figura 4.10. Cálculo del parámetro S y sistema de ecuaciones para despejarlo.

7) Implementación en Matlab

Se implementa la búsqueda del óptimo en el espacio de diseño que definen las restricciones utilizando la función de Matlab “fmincon.m”, la cual resuelve problemas multivariados sujetos a restricciones no lineales a través de la búsqueda del mínimo o máximo de una función, denominada “función objetivo”:

$$\min_x f(x) \text{ tal que} \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ A \cdot x \leq b \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

8) Selección del algoritmo de optimización

La función “fmincon.m” de Matlab puede trabajar con cuatro algoritmos distintos de búsqueda, ‘Interior-point’, ‘sqp’, ‘active-set’, y ‘trust-region-reflective’.

- ‘trust-region-reflective’, requiere que se le provea del gradiente de la función, y solo permite límites o restricciones de igualdad lineales, por lo cual se descarta su uso.
- ‘active-set’, transforma un problema con restricciones en uno de minimización simple, a través de funciones de penalización y cumpliendo las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), el problema que genera la resolución de problemas no lineales, es que cuando no se puede garantizar que el espacio de diseño que definen las restricciones es convexo, aun cumpliendo las condiciones de óptimo de KKT, solo se puede garantizar que ese mínimo es un mínimo local, por lo que se debe entrar al algoritmo por distintos puntos (distintas soluciones iniciales que inician el algoritmo), para buscar el mínimo “más global”, sin poder garantizar de ninguna manera que el óptimo alcanzado sea global.
- ‘SQP’, busca el mínimo resolviendo una secuencia de problemas cuadráticos, donde la función Lagrangiana es aproximada por una función cuadrática, y las restricciones son linealizadas en el entorno de búsqueda.
- ‘Interior Point’, al igual que el algoritmo ‘active-set’, aproxima el problema con restricciones, a uno sin restricciones penalizando la función objetivo, el problema aproximado es una secuencia de problemas con restricciones de igualdad, que a diferencia del problema inicial de inecuaciones son más simples de resolver.

9) Conclusiones y resultados

El problema de optimización da como resultado 3 sistemas de brazos robóticos con diferentes longitudes de brazos y colocados en diferentes posiciones del bastidor. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4-1 y en la figura 4.11.

Sistema Brazos Robóticos	Posición Anclaje (mm)	Longitud Brazo Principal entre ejes (mm)	Longitud Brazo Portainductor entre ejes (mm)	Área cubierta por cada Brazo Robótico (cm ²)
Número 1	X=249.64 Y=44.410	186.05	50.45	1115.73
Número 2	X=678.81 Y=241.00	211.70	78.88	989.14
Número 3	X=311.53 Y=42.418	158.73	36.56	1059.59
				Total= 3164.47

Tabla 4-1. Valores para posición de anclaje y longitudes de los 3 sistemas de brazos robóticos calculados.

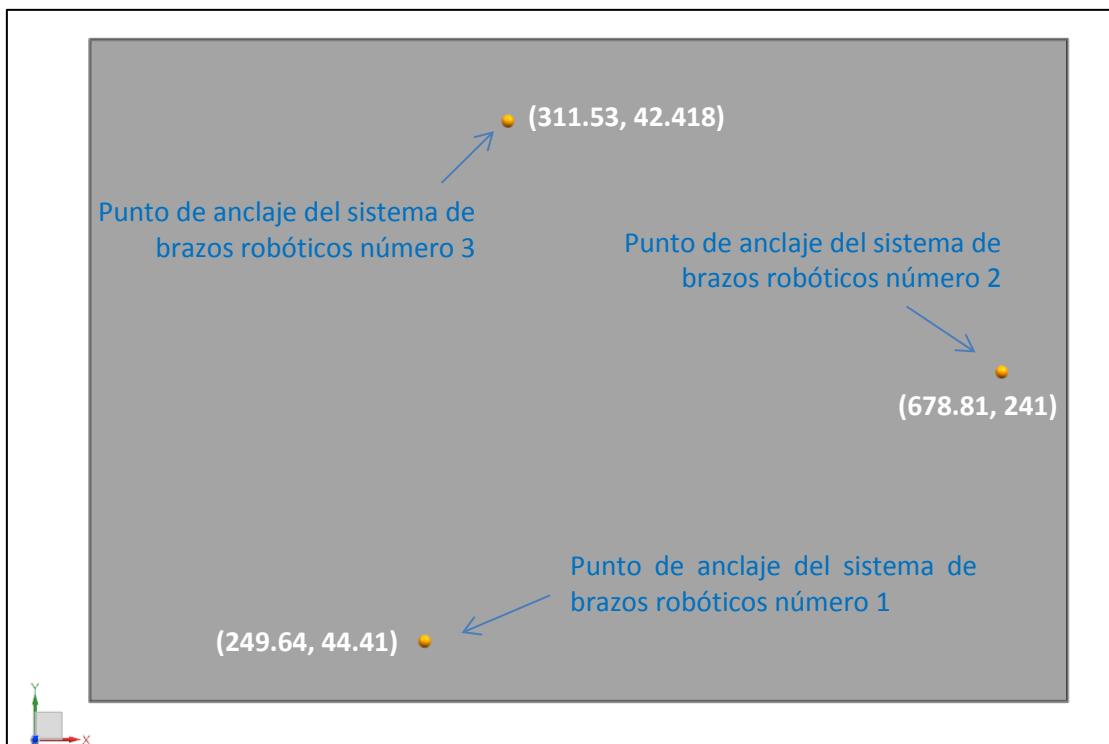


Figura 4.11. Posiciones de anclaje (mm) sobre bastidor de los brazos robóticos.

4.2 Selección previa de material y forma de la sección de los brazos robóticos

Todos los cálculos que se realizan por el Método de los Elementos Finitos en el proyecto se llevan a cabo con la herramienta de CAE de la que dispone el programa NX-Unigraphics, utilizando el motor Nastran. Los primeros cálculos que se realizaron para elegir el material del que sería fabricado el prototipo final son simplificaciones del sistema real, para posteriormente realizar estudios mucho más profundos según se fue avanzando en el diseño del prototipo.

Para elegir el material se hacen pruebas con diferentes formas de secciones y materiales (Acero y Aluminio), analizando su flecha y su tensión máxima. Inicialmente se simplifica el cálculo a una barra empotrada de sección rectangular (20x15mm) y 211 milímetros de longitud, que es el brazo más largo que se ha calculado con el programa de Matlab (pertenece al sistema de brazos robóticos número 2), y por lo tanto será el caso más restrictivo, ya que al tener mayor longitud, su flecha será superior a la del resto del brazos.

Para analizar su comportamiento, se hace un estudio de dos situaciones diferentes:

- Brazo portainductor a 90º, que trabajará principalmente a torsor.
- Brazo portainductor totalmente estirado, que sufrirá el mayor flector.

Las cargas introducidas para este estudio han sido:

- Peso de cada material, que se introduce en el programa Nx-Unigraphics como fuerza de gravedad según la densidad de cada material.
- Momento y fuerza que crearía el peso del inductor en el brazo principal. El peso del inductor que nos facilitó BSH, y que se ha tomado como ejemplo, es de 4.07 N, y se multiplica por un factor de seguridad de 7, para disponer de un gran margen de cálculo.

En el Anexo C.1. se encuentra más información al respecto de estos dos estudios realizados.

Brazo a 90º:

Cuando los brazos formen un ángulo de 90º, el brazo principal trabajará fundamentalmente a torsor, debido al momento que el sólido brazo portainductor y el inductor crean sobre él. Tras el análisis realizado por el Método de los Elementos Finitos, los datos obtenidos son los que se presentan en la tabla 4-2, donde se aprecia que siendo todos los desplazamientos inferiores a la flecha máxima permitida de 1 milímetro, la sección en I es la que peor soporta los esfuerzos a torsor, y que los brazos fabricados en acero tienen la menor flecha pero un peso mayor.

Por todo ello, se descarta el diseño de los brazos con una sección en I, y se decide continuar el estudio con la sección rectangular de perfil lleno (maciza) de aluminio, y la sección rectangular de perfil delgado (2mm) de acero, ya que disponen de la mejor relación flecha-peso.

Tipo de sección	Material	Desplazamiento (mm)	Tensión Von Mises (Mpa)	Peso (N)
Sección en I	Acero	0.031	21.41	1.8854
	Aluminio	0.093	20.99	0.6528
Sección rectangular perfil lleno	Acero	0.003	2.36	4.32
	Aluminio	0.007	2.34	1.4971
Sección rectangular perfil delgado (2mm)	Acero	0.004	5.59	1.8854
	Aluminio	0.008	5.45	0.6528

Tabla 4-2. Valores de desplazamientos y tensión de Von Mises a torsor.

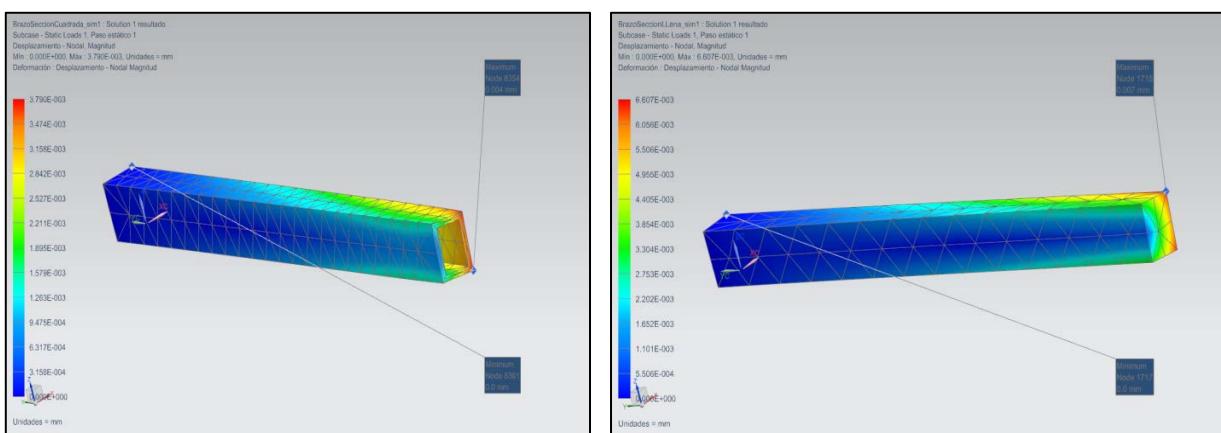


Figura 4.12 Flecha a torsor sección perfil delgado (Acero) y sección llena (Aluminio).

Brazo estirado:

Cuando los brazos se encuentren totalmente estirados, el brazo principal trabajará fundamentalmente a flector, debido al momento que el sólido brazo portainductor y el inductor crean sobre él. Tras el análisis realizado por el Método de los Elementos Finitos, los resultados obtenidos son los que se presentan en la tabla 4-3. Para este estudio, se analizan ya únicamente las secciones elegidas tras el primer estudio a torsor.

Tipo de sección	Material	Desplazamiento (mm)	Tensión Von Mises (Mpa)	Peso (N)
Sección rectangular perfil lleno	Aluminio	0.175	8.141	1.4971
Sección rectangular perfil delgado (2mm)	Acero	0.0917	12.451	1.8854

Tabla 4-3. Valores de desplazamientos y tensión de Von Mises a flector.

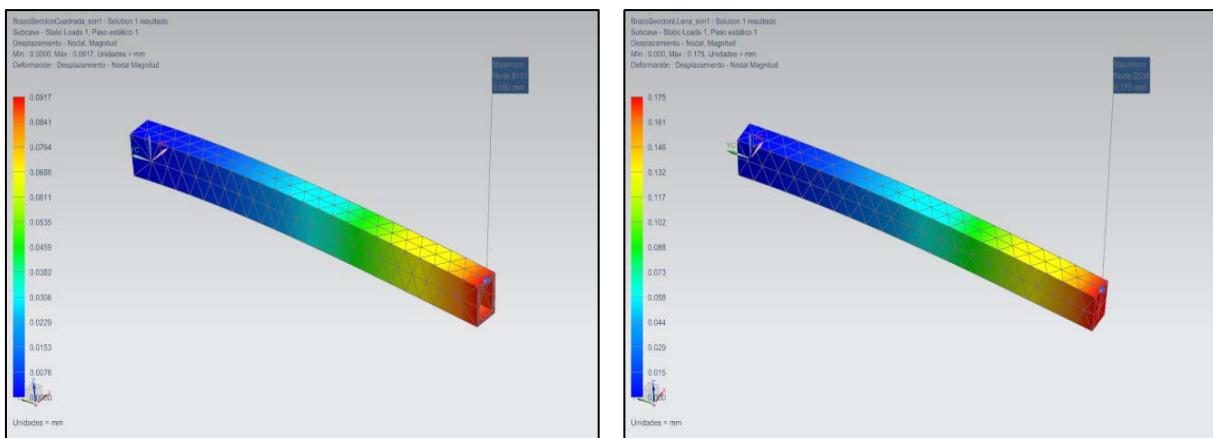


Figura 4.13. Flecha a flector sección perfil delgado (Acero) y sección llena (Aluminio).

La sección de perfil delgado de acero tiene la ventaja de que tiene una flecha menor, pero tiene varios inconvenientes:

- El acero es ferromagnético (material a evitar en la medida de lo posible en una cocina de inducción).
- Al estar hueca complicaría posible uniones atornilladas.
- Su mayor peso, hace que tenga mayor inercia y obligaría a utilizar motores con mayor par.

Como se verá en el capítulo 4.4, durante las primeras alternativas de diseño que se realizaron de diferentes sistemas de brazos robóticos, se mantuvieron como opciones para los brazos estos 2 tipos de secciones, ya que los dos cumplían el condicionante de tener una flecha máxima inferior a un milímetro. Pero finalmente, teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes mencionadas anteriormente, y que aunque la flecha del aluminio es mayor, cumple holgadamente las especificaciones para que se transmita el campo de inducción magnética (1 mm), el material elegido ha sido el aluminio, con la sección del brazo maciza (perfil lleno).

Posteriormente, como se mostrará en el capítulo 4.5, una vez elegida la geometría final de los brazos robóticos se realizaron cálculos de Elementos Finitos mucho más exhaustivos para confirmar estos cálculos iniciales, y comprobar que cada sistema de brazos robóticos cumplía con la flecha máxima exigida.

4.3 Selección de los motores comerciales

Para la selección de los motores comerciales, se calculó primero el modelo matemático de simulación de movimiento, para posteriormente implementarlo en un programa de Matlab y hallar los pares necesarios para cada motor. Finalmente se buscó la mejor solución entre todas las alternativas comerciales que ofrecía el mercado.

4.3.1 Modelo matemático simplificado de simulación de movimiento

Como paso previo a la selección de los motores y de las acciones que se generan en las uniones entre los diferentes sólidos, se determinan las ecuaciones que rigen el movimiento en

2D del sistema mecánico aplicando las ecuaciones de Euler-Newton: Teorema de la Cantidad de Movimiento (TCM) y Teorema del Momento Cinético (TMC).

El sistema mecánico se considera descompuesto en 2 sólidos rígidos:

- Sólido 1 (S1) :
 - Compuesto por el eje del motor 1, brazo 1 (brazo principal) y carcasa de motor 2.
 - Con masa, m_1 ; centro de masas, G_1 ; y momento de inercia en O, I_0 .
- Sólido 2 (S2):
 - Compuesto por el eje del motor 2, brazo 2 (brazo portainductor) y el inductor.
 - Con masa, m_2 ; centro de masas, G_2 ; y momento de inercia en G_2 , I_{G_2} .

La geometría del sistema, así como los grados de libertad (θ_1, θ_2) y coordenadas independientes ($\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$) se definen en la figura 4.14.

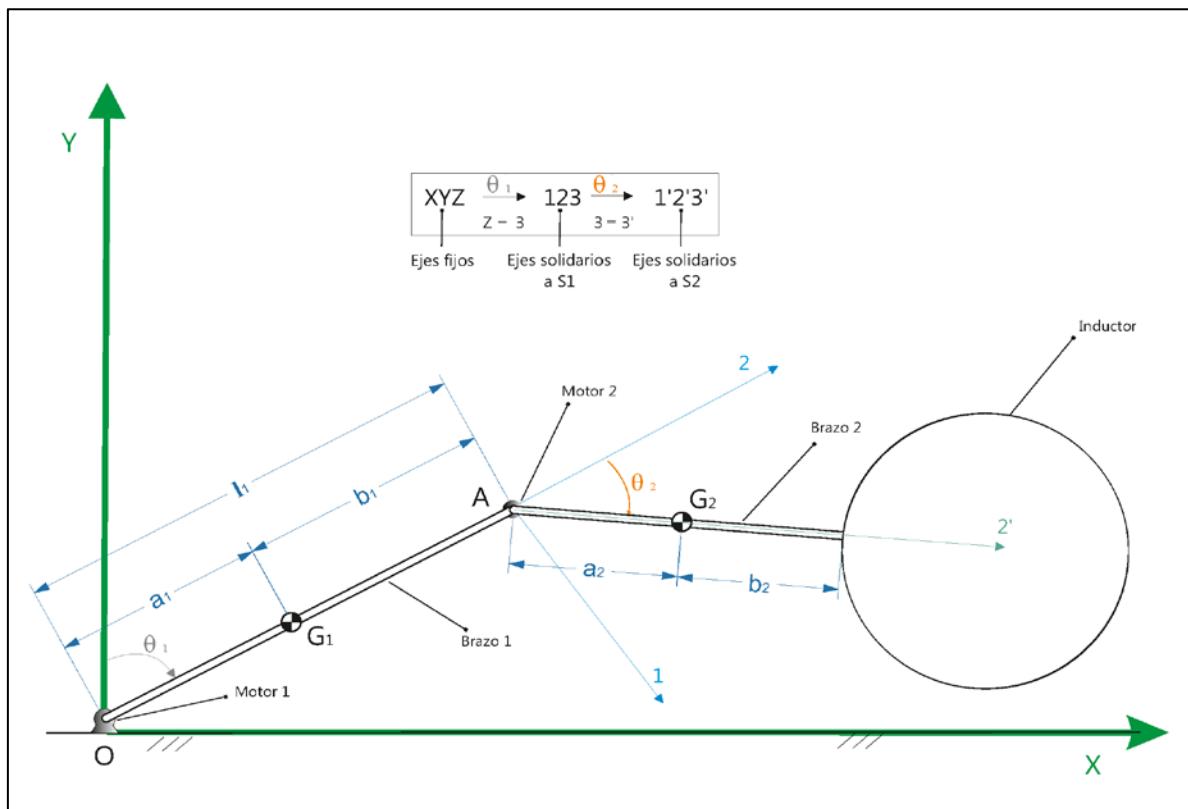


Figura 4.14. Parámetros geométricos y coordenadas independientes para estudio del movimiento de R+R.

Inicialmente se determinan las variables cinemáticas que definen el movimiento:

- Velocidad angular absoluta del sólido i, $\Omega_{abs}(S_i)$ i=1,2

$$\Omega_{abs}(S_1) = \overline{\dot{\theta}_1}; \quad \Omega_{abs}(S_2) = \overline{\dot{\theta}_1} + \overline{\dot{\theta}_2}$$

- Aceleración angular absoluta del sólido i, $\dot{\Omega}_{abs}(S_i)$

$$\dot{\Omega}_{abs}(S_1) = \overline{\ddot{\theta}_1}; \quad \dot{\Omega}_{abs}(S_2) = \overline{\ddot{\theta}_1} + \overline{\ddot{\theta}_2}$$

- Aceleración absoluta de G_i , $\bar{\gamma}_{abs}(G_i)$

- $\bar{\gamma}_{abs}(G_1) = \bar{\gamma}_{abs}(O) + \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_1) \wedge \overline{OG_1} + \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_1) \wedge (\bar{\Omega}_{abs}(S_1) \wedge \overline{OG_1})$, resultando:

$$\{\bar{\gamma}_{abs}(G_1)\}_{123} = \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 a_1 \\ -\dot{\theta}_1^2 a_1 \\ 0 \end{Bmatrix}_{123}, \text{ siendo: } \bar{\gamma}_{abs}(O) = 0, \text{ al ser O un punto fijo.}$$

- $\bar{\gamma}_{abs}(G_2) = \bar{\gamma}_{abs}(A) + \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_2) \wedge \overline{AG_2} + \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_2) \wedge (\bar{\Omega}_{abs}(S_2) \wedge \overline{AG_2})$, resultando:

$$\{\bar{\gamma}_{abs}(G_2)\}_{123} = \begin{Bmatrix} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) a_2 + \ddot{\theta}_1 l_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2^2 l_1 \sin \theta_2 \\ -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 + \ddot{\theta}_1 l_1 \sin \theta_2 - \dot{\theta}_1^2 l_1 \cos \theta_2 \\ 0 \end{Bmatrix}_{1'2'3'}, \text{ con:}$$

$$\bar{\gamma}_{abs}(A) = \bar{\gamma}_{abs}(O) + \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_1) \wedge \overline{OA} + \bar{\Omega}_{abs}(S_1) \wedge (\bar{\Omega}_{abs}(S_1) \wedge \overline{OA})$$

Las acciones verdaderas, a distancia y de enlace, actuantes sobre cada sólido se indican en las figuras 4.15 y 4.16:

- Γ_1, Γ_2 pares de los motores 1 y 2, respectivamente.
- F_1, F_2 fuerzas de enlace en O ejercidas por carcasa motor 1 sobre sólido 1.
- $F_{1'}, F_{2'}$ fuerzas de enlace en A ejercidas por sólido 1 sobre el sólido 2.

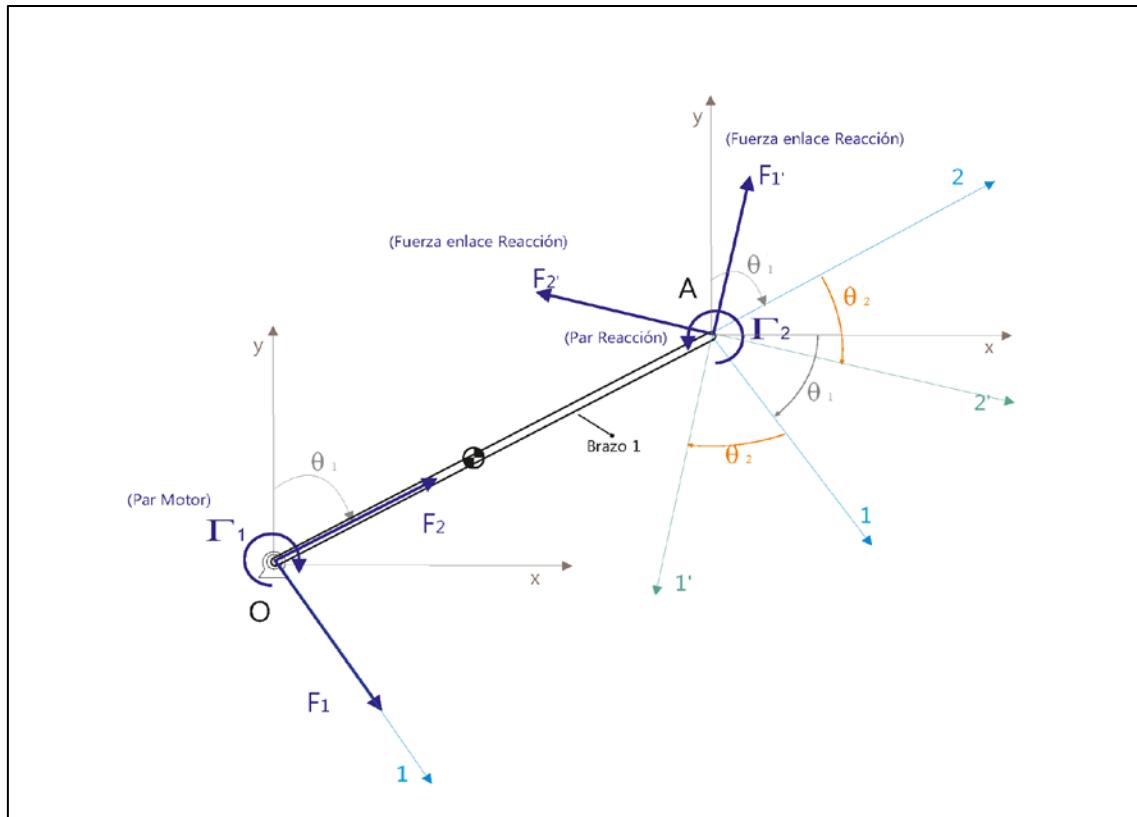


Figura 4.15. Acciones verdaderas sobre S1.

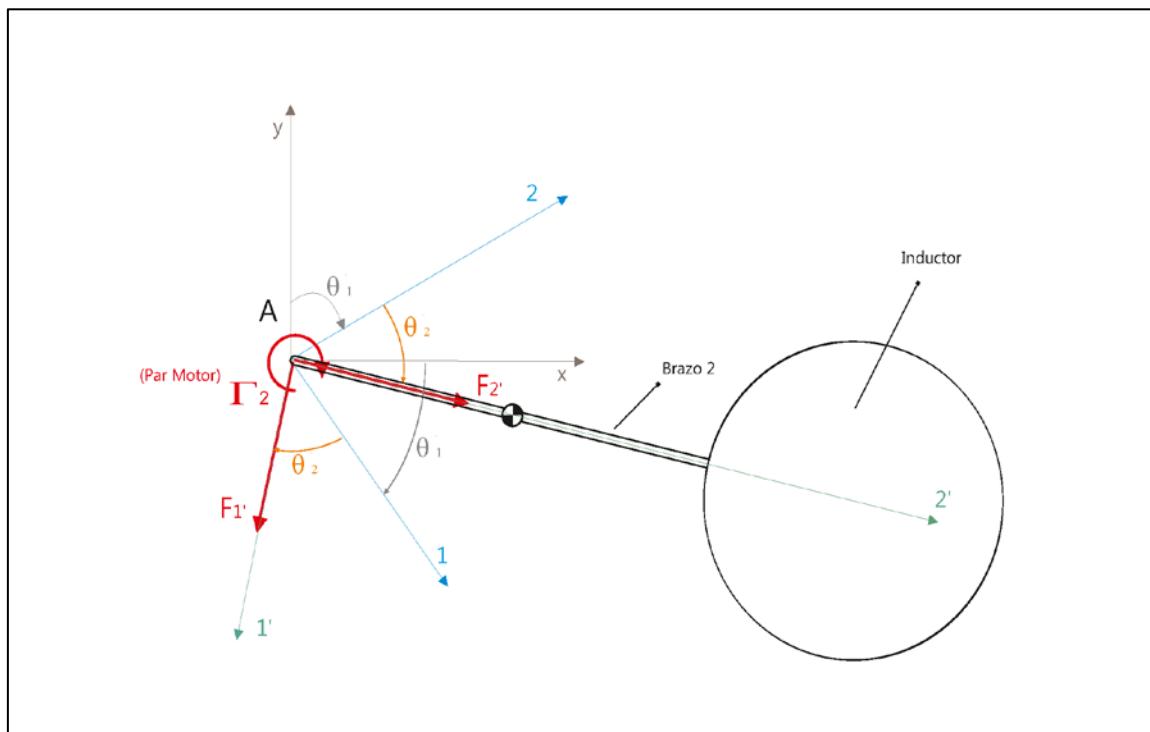


Figura 4.16. Acciones verdaderas sobre S2.

El modelo matemático presenta 6 incógnitas $\Gamma_1, \Gamma_2, F_1, F_2, F_{1'}, F_{2'}$ supuesto conocido el movimiento que comunican los motores. Para su elaboración se procede a aplicar los Teoremas Vectoriales a cada sólido:

- $\Sigma_{Si} F_{ext}(P_i) = m_i \{\bar{\gamma}_{abs}(G_i)\}$, con $\Sigma_{Si} F_{ext}(P_i)$: fuerzas verdaderas actuantes sobre el sólido i.
 - $\Sigma_{S1} \overline{M}_{ext}(O) = I_O \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_1)$ para el S_1 , con $\Sigma_{S1} \overline{M}_{ext}(O)$: momentos en O debidos a las acciones verdaderas actuantes sobre el S_1 .
 - $\Sigma_{S2} \overline{M}_{ext}(A) - \overline{AG}_2 \wedge m_2 \bar{\gamma}_{abs}(A) = I_A \dot{\bar{\Omega}}_{abs}(S_2)$ para el S_2 ,
- con $\Sigma_{S2} \overline{M}_{ext}(A)$: momentos en A debidos a las acciones verdaderas actuantes sobre S_2 , e $I_A = I_{G2} + m_2 a_2^2$, momento de inercia en A del S_2 .

El resultado final es un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden de 6 ecuaciones con 6 incógnitas:

$$F_{1'} = m_2 [(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) a_2 + \ddot{\theta}_1 l_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1 \sin \theta_2]$$

$$F_{2'} = m_2 [-(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 + \ddot{\theta}_1 l_1 \sin \theta_2 - \dot{\theta}_1^2 l_1 \cos \theta_2]$$

$$\Gamma_2 = m_2 a_2 (\ddot{\theta}_1 l_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1 \sin \theta_2) + (I_{G2} + m_2 a_2^2) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2), \text{ par necesario del motor 2.}$$

$$F_1 = m_1 \ddot{\theta}_1 a_1 + m_2 [(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) a_2 \cos \theta_2 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 \sin \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1]$$

$$F_2 = -m_1 \dot{\theta}_1^2 a_1 - m_2 [(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) a_2 \sin \theta_2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1]$$

$$\Gamma_1 = I_0 \ddot{\theta}_1 + \Gamma_2 + m_2 l_1 [(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) a_2 \cos \theta_2 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 \sin \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1], \text{ par necesario del motor 1.}$$

- Si $\Gamma_1 = 0$, el S_1 está frenado, requiriéndose un momento de frenado:

$$M_{FR1} = \Gamma_2 + m_2 l_1 (\ddot{\theta}_2 a_2 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2^2 a_2 \sin \theta_2)$$

- Si $\Gamma_2 = 0$, el S_2 está frenado sobre el S_1 , y se necesita un momento de frenado:

$$M_{FR2} = (I_{G2} + m_2 a_2^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 a_2 (\ddot{\theta}_1 l_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 l_1 \sin \theta_2)$$

4.3.2 Cálculo de los pares necesarios para cada motor

Para el cálculo de los pares que necesitará cada motor, se ha realizado un programa en Matlab en el que se han implementado las ecuaciones de movimiento del sistema. El programa proporciona en función de $\theta_1(t)$ y $\theta_2(t)$ los pares motores necesarios, así como los esfuerzos actuantes en los enlaces. El código completo del programa se detalla en el Anexo C.2.1.

Un brazo robótico siempre tiene dos maneras distintas y especulares de llegar a un punto concreto del plano (siempre que disponga de espacio físico), por lo tanto, inicialmente, se crea una función en Matlab en la que se simula el movimiento de un brazo que cubra toda su área de trabajo (un círculo): se hace que el brazo vaya a 10 puntos diferentes del perímetro de su área de trabajo (puntos más alejados a los que puede llegar), volviendo a su posición inicial entre punto y punto (figura 4.17). Se le da un tiempo para cada uno de estos 10 movimientos completos de 6 segundos.

La geometría implementada para en esta función es la del sistema de brazos robóticos número 1, ya que tiene un tamaño intermedio entre los 3 diferentes sistemas de brazos robóticos que se calcularon, obteniéndose los ángulos θ_1 y θ_2 que rigen el movimiento del brazo robótico.

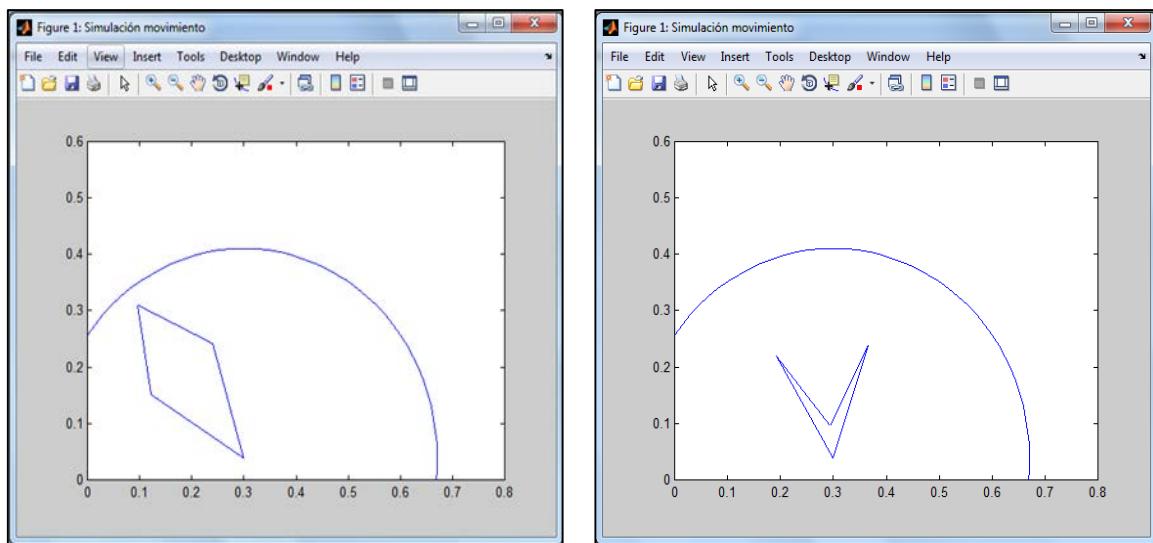


Figura 4.17. Dos posiciones diferentes del brazo durante la simulación de movimiento.

Una vez obtenidos los ángulos θ_1 y θ_2 para cada posición, se implementan las ecuaciones de movimiento del sistema calculadas anteriormente, obteniéndose una matriz en 3 dimensiones (10x6x101) por cada esfuerzo calculado.

Los valores máximos obtenidos para cada esfuerzo, son los presentados en la tabla 4-4. Las gráficas para cada esfuerzo se presentan en el Anexo C.2.2.

Resultados	Valores máximos
Γ_1	1.4 N·m
Γ_2	0.65 N·m
F_1	4.2 N
F_2	3.4 N
$F_{1'}$	4.3 N
$F_{2'}$	0.65 N

Tabla 4-4. Valores máximos para cada esfuerzo.

4.3.3 Cálculo del diámetro del eje para motor

Se calcula el diámetro mínimo que debe tener el eje del motor fijo, que será el más restrictivo al soportar el mayor peso del conjunto.

Para el cálculo se utiliza el sistema de brazos robóticos número 2, que tiene las mayores longitudes de brazos, y la sección rectangular de perfil delgado de acero. El eje se considerará de acero, con una resistencia a la fluencia de 351.632 MPa.

Utilizando la teoría de Von Mises para el cálculo de la tensión cortante máxima (Anexo E), el resultado es el siguiente:

$$\left. \begin{array}{l} M = 1.068 \text{ Nm} \\ T = 1.4 \text{ Nm} \\ Sy = 351.632 \text{ MPa} \\ S_{sy} = 175.82 \text{ MPa} \\ n = 2 \end{array} \right\} \rightarrow d = \left[\frac{27.7 \times 2}{\pi \times 351.632} (1.068^2 + 1.4^2)^{1/2} \right]^{1/3} = 4.42 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el diámetro del eje del motor fijo deberá ser mayor a 4.42mm para soportar los esfuerzos.

4.3.4 Selección de los motores paso a paso

Lo que se requiere para un calentamiento óptimo de los recipientes es un posicionamiento con un elevado grado de exactitud y una muy buena regulación de la velocidad, por lo que los motores paso a paso son ideales para el propósito del proyecto.

Un motor paso a paso, como todo motor, es en esencia un conversor electromecánico, que transforma energía eléctrica en mecánica. Mientras que un motor convencional gira libremente al aplicarle una tensión, el motor paso a paso gira un determinado ángulo de forma incremental (transforma impulsos eléctricos en movimientos de giro controlados), lo que le permite realizar desplazamientos angulares fijos muy precisos (pueden variar desde 0,50º hasta unos 90º).

Los motores de corriente continua y de corriente alterna se descartaron debido a los problemas que presentan, tales como la inercia mecánica o la dificultad para controlar su velocidad, ya que lo que se busca es la precisión en el giro.

Para la elección de los motores se tienen en cuenta dos condicionantes principales:

- Los motores tendrán un par igual o mayor al calculado anteriormente con el modelo matemático de movimiento implementado en el programa de Matlab, aplicándose si es posible un factor de seguridad de 3 a cada uno. Por lo tanto, los pares que deberían cumplir los motores serán de $4.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($1.4*3 \text{ N}\cdot\text{m}$), para el motor fijo, que transmite el movimiento al brazo principal, y de $1.95 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($0.65*3 \text{ N}\cdot\text{m}$), para el motor móvil, que transmite el movimiento al brazo portainductor.
- La altura del motor será la menor posible, ya que se busca una altura mínima para el sistema de brazos robóticos y el motor es uno de los elementos críticos en este aspecto, siendo además la altura del motor móvil inferior a la del motor fijo, para que se pueda producir el movimiento de los brazos de forma correcta, ya que si fuese más grande que el motor fijo, el motor móvil chocaría con el suelo de bastidor, y habría que elevar la posición del motor fijo.

Debido a la singularidad de los motores que se necesitaban para el prototipo, existían muy pocos modelos en el mercado que cumpliesen la relación exigida altura-par, por lo que se añadieron a la lista de posibles motores aquellos, que aunque los pares no cumpliesen con el coeficiente de seguridad de 3 deseado, estaban cerca del par calculado inicialmente con el modelo matemático. Las hojas de características de los motores elegidos se encuentran en el Anexo C.2.3.

De entre todos los modelos analizados que cumplían los requisitos (tabla 4-5), se selecciona para el motor fijo el modelo de la marca Crouzet 80 927 0 (motor + reductora), que dispone de un par de 5 N·m y una altura de 59.2 milímetros, cuando el resto de modelos con un par igual o superior a 1 N·m tenían una altura por encima de los 75 milímetros (figura 4.18). Ya que no se precisa una gran velocidad, se le escoge una reducción de 125 que facilite su control.

MARCA	MODELO	HOLDING TORQUE (N·m)	ALTURA (mm)
Hansen	Size 19	0.7	40.1
Crouzet	80 927 0	5	59.2
McLennan	23HS-309	0.95	76.2
Smart Motor	FL57STH76	1.85	76
Rotalink	M237618K48	1.65	76

Tabla 4-5. Comparativa entre diferentes modelos para selección de motor fijo.

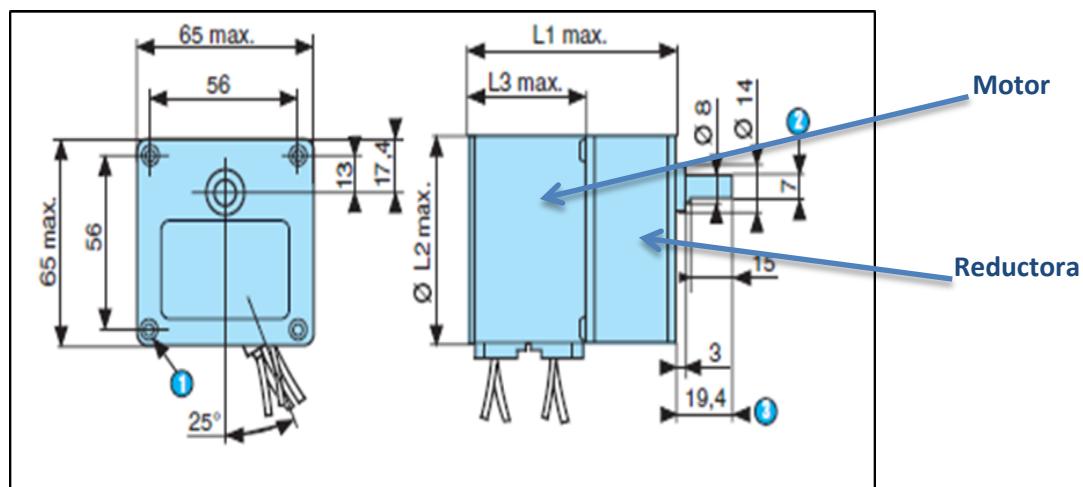


Figura 4.18. Medidas del modelo elegido para motor fijo (L_1 máx.=59.2mm).

Como se ha comentado anteriormente, la altura del motor móvil debía ser inferior a la altura del motor fijo (59.2 mm), por lo tanto, se dificultaba enormemente la búsqueda de un motor comercial que cumpliese las especificaciones (tabla 4-6). Se selecciona finalmente el modelo de la marca Crouzet 80 913 0 (motor + reductora), que tiene un par de 3 N·m y una altura de sólo 40.2 milímetros (figura 4.19), cuando el resto de modelos que tenían una altura inferior a los 59.2 milímetros, presentaban pares muy por debajo de 1 N·m. Se elige una reducción de 150 para la reductora del motor móvil.

MARCA	MODELO	HOLDING TORQUE (N·m)	ALTURA (mm)
SanyoDenki	SS2422	0.24	25.6
Crouzet	80 913 0	3	40.2
McLennan	23HS-104	0.52	52
Shinano Kenshi	SST43D216	0.42	40
Smart Motor	FL42STH47	0.43	47
Rotalink	M174518K415	0.54	45
Sonceboz	6500-15-2-1.6	0.32	38.7

Tabla 4-6. Comparativa entre diferentes modelos para selección de motor móvil.

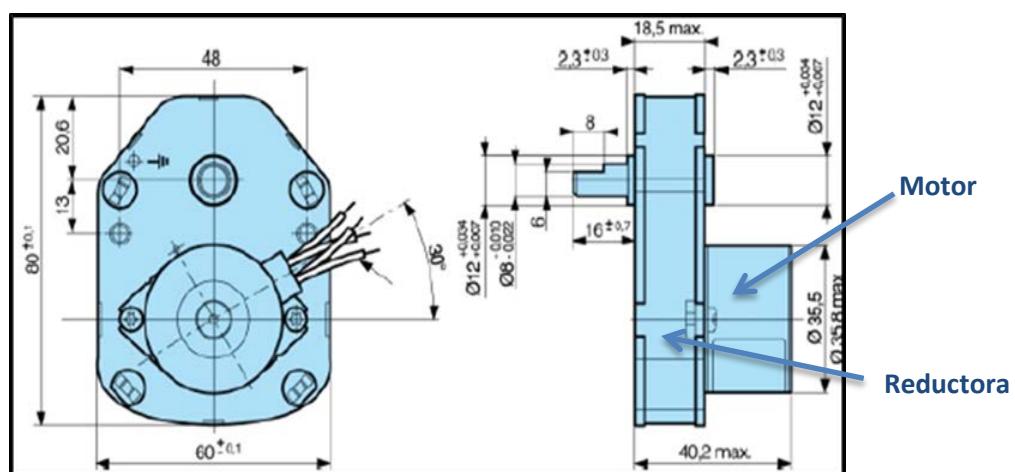


Figura 4.19. Medidas del modelo elegido para motor móvil.

4.4 Alternativas de diseño del brazo robótico

Una vez obtenidas las longitudes de los brazos robóticos y elegidos los modelos de los motores a utilizar, el siguiente paso consistió en darle la geometría adecuada a cada brazo para que resistiendo los esfuerzos a los que iba a ser sometido, el sistema tuviese la menor altura posible. Uno de los requisitos era que los 3 sistemas de brazos robóticos compartiesen los mismos elementos, exceptuando obviamente las longitudes de sus brazos, por lo tanto, en este apartado se va a presentar sólo el desarrollo del sistema de brazos robóticos número 2, que posee las longitudes de brazos más grandes y por lo tanto ha sido el más restrictivo a la hora del diseño.

4.4.1 Análisis de soluciones al enrollamiento de los cables

A lo largo de todo el proyecto se estudiaron multitud de alternativas para la forma de los brazos, las cuales se fueron descartando o modificando según se iba avanzando en el desarrollo, bien porque no cumplían las especificaciones requeridas, o porque tenían determinados problemas que había que solucionar. El punto de inflexión más importante en el desarrollo del proyecto fue el paso del cable de cobre que necesitan los inductores para su funcionamiento, que parte del mismo inductor y tiene que finalizar junto al motor fijo.

En un primer momento todas las alternativas se encaminaron a que el eje del motor móvil atacase directamente al brazo portainductor (figura 4.20), reduciéndose así el número de componentes necesarios para su funcionamiento, ya que de esta manera se evitaba introducir elementos para transmitir el movimiento del eje al brazo, como podían ser engranajes o correas, que aumentaban la complejidad del sistema.

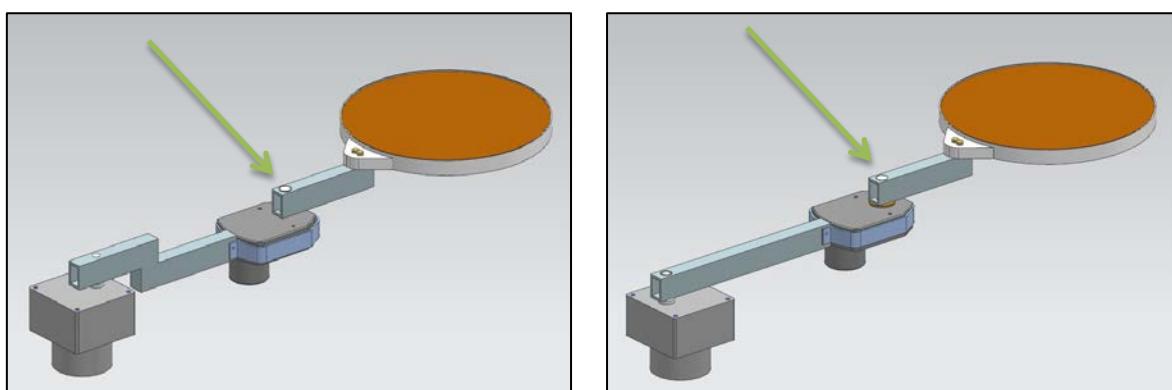


Figura 4.20. Alternativas previas de brazos con eje motor atacando directamente brazo portainductor

Debido a que es un sistema en movimiento, y a efectos de evitar el enrollamiento del cable con el propio brazo o con otros componentes del sistema, se llegó a la primera conclusión de que el cable debía pasar por el interior de los brazos, para facilitar y guiar su recorrido.

Se construyó un brazo de acero para realizar diversas pruebas para el paso del cable, se hizo pasar el cable por interior de los brazos y se comprobó que si el cable no pasaba por el eje de giro que une los dos brazos, existían muchos problemas en la posición en la que el brazo portainductor se cerraba sobre el brazo principal, tanto por la resistencia que ejercía el cable sobre el movimiento, como por el alargamiento de la longitud de cable que se generaba, y que en consecuencia había que recoger de alguna manera cuando el brazo portainductor volviese a la posición de estar completamente estirado (figura 4.21).

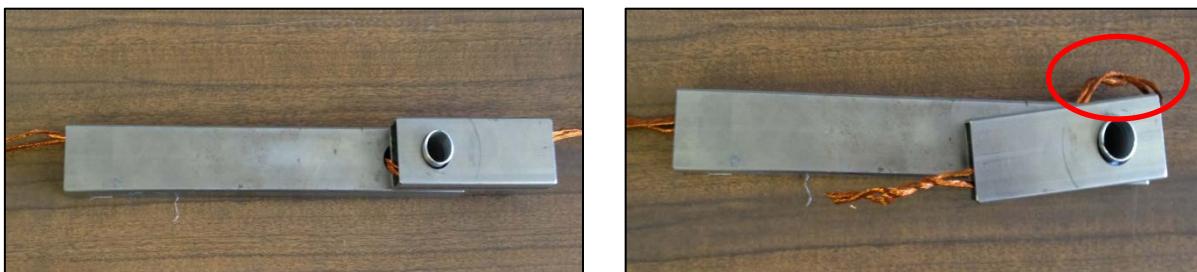


Figura 4.21. Paso del cable con el brazo portainductor en diferentes posiciones.

Por lo tanto, se decidió que la solución óptima para corregir los problemas generados por el paso del cable es hacerlo pasar por su eje de giro, ya que el estiramiento al que se ve sometido el cable de esta manera es mínimo, con el único posible problema de la rotura a fatiga por estar sometido a torsión. El inconveniente de que el cable pase por el eje de giro es que el motor ya no puede atacar directamente al brazo portainductor y hay que introducir elementos que transmitan el movimiento del eje del motor al brazo portainductor (engranajes, correas..), ya que la opción de construir un eje hueco con un diámetro muy grande y hacer pasar el cable por el interior es inviable debido al tamaño tan pequeño de los motores.

Se plantearon 2 alternativas para hacer pasar el cable por el eje de giro:

- Incluir un rotor conector rotatorio de la marca Mercotac (figura 4.22), un sistema que permite el giro sin enrollamientos y no requiere mantenimiento, ya que no utiliza escobillas, sino que durante su rotación un fluido mantiene la conexión eléctrica entre los contactos sin que se produzca ningún desgaste.
- Hacerlo pasar directamente, realizando un experimento previo (figura 4.23) que garantizase que el cable soportaba los esfuerzos de torsión a los que sería sometido.

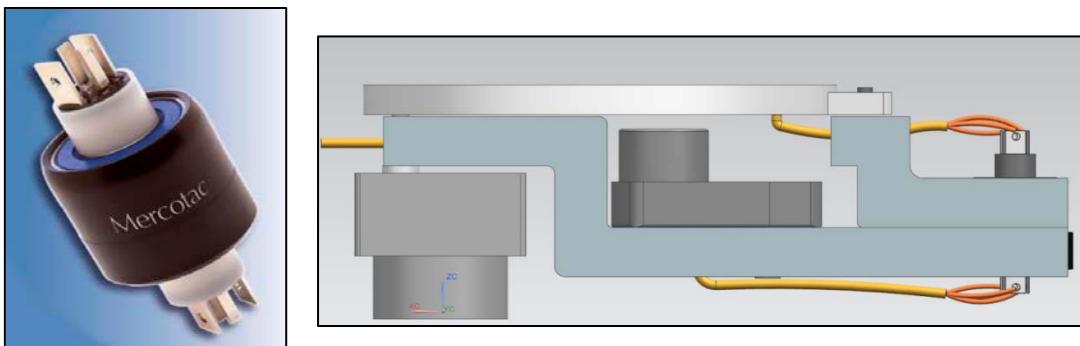


Figura 4.22. Conector Mercotac y su posición en sistema de brazos robóticos.

Se preparó un experimento para comprobar la resistencia del cable a fatiga, dejándolo durante 500 horas (3 semanas, 24 horas al día) haciendo que el brazo portainductor realizase ciclos completos cerrándose sobre el brazo principal. Una vez finalizado el tiempo de la prueba a la que fue sometido el cable, se observó que el cable no sufrió ningún daño ya que los hilos de cobre que forman el cable estaban en perfecto estado.

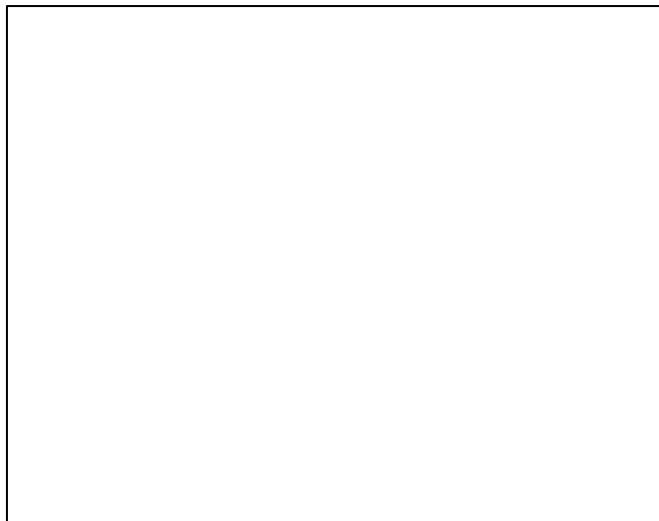


Figura 4.23. Imagen del experimento a fatiga del cable, pasando por el eje de giro.

Se decidió por lo tanto continuar con la opción de hacer pasar el cable directamente por el eje de giro, ya que al no incluir el conector rotatorio Mercotac se reducía el número de elementos necesarios para el movimiento y se evitaban posibles fallos generados por el mismo, ya que es un sistema delicado mecánicamente, además se eliminaba una restricción de geometría como era el tamaño mínimo del sistema de conectores rotatorio.

4.4.2 Selección de la geometría óptima para cada brazo

Una vez decidido que el cable debía pasar por el eje de giro, se estudiaron diferentes alternativas de sistemas de brazos robóticos en 2 fases, en la primera fase se diseñaron varios modelos que representaban un concepto sobre el que trabajar, y una segunda fase en la que se perfeccionaron y desarrollaron más detalladamente los modelos elegidos en la primera fase y de dónde salió el prototipo final a desarrollar. Este punto se completa en el Anexo C.3 con planos de las alternativas planteadas en las fases I y II, además de varios resultados de los análisis realizados por el Método de los Elementos Finitos.

Fase I

En esta primera fase se presentaron 4 alternativas de diseño sobre las que trabajar, no se trataba de modelos finales, si no de cuatro conceptos de sistemas de brazos robóticos con diferentes características entre ellos, de los cuales se seleccionaron las mejores opciones y se fueron perfeccionando hasta encontrar el sistema de brazos robóticos óptimo para el prototipo.

Las opciones que se manejaron en esta fase para el material y la forma de la sección de los brazos robóticos, fueron las 2 elegidas en el capítulo 4.2: sección rectangular maciza de aluminio y sección rectangular de perfil delgado de acero.

La forma del brazo principal se diseñó con forma de Z (figura 4.24), con mayor o menor altura dependiendo de la alternativa, ya que con esta forma de brazo se consigue reducir la altura del sistema de brazos robóticos. Se diseñó con una anchura de 40 milímetros, que es el doble que la utilizada en los cálculos previos de material, lo que perjudica al sistema mecánico por su mayor peso e inercia, pero permite alojar elementos de mayor tamaño en su interior.

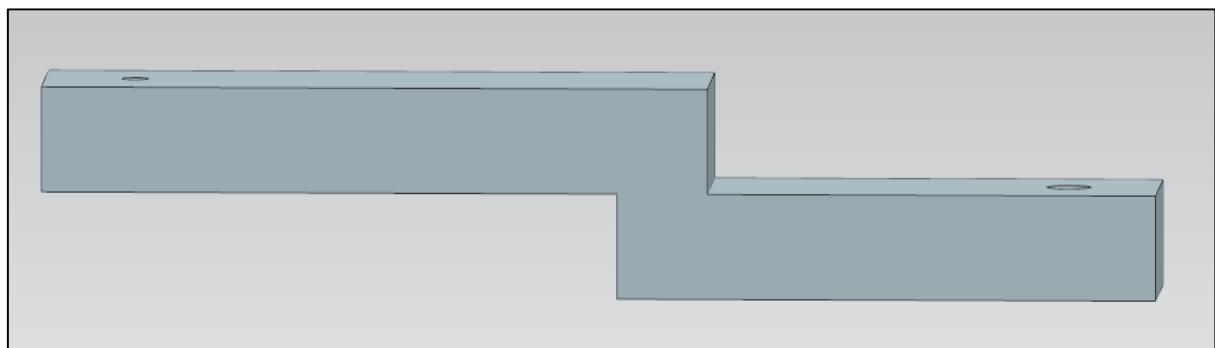


Figura 4.24. Geometría del brazo principal (forma de Z) en modelos de fase I.

Debido a la decisión que se tomó de hacer pasar el cable directamente por el eje de giro, el motor móvil no puede atacar directamente al brazo portainductor, por lo que se plantearon diferentes opciones en cada alternativa de diseño para transmitir el movimiento desde el motor móvil hasta el brazo portainductor.

Las características principales de los 4 sistemas de brazos robóticos presentados en la fase I son las siguientes:

- **Sistema S1:**

- Transmisión de movimiento al brazo portainductor a través de 2 engranajes, que se encuentran en la parte inferior del brazo principal.
- Motor móvil en la parte inferior del brazo principal.

- **Sistema S2:**

- Transmisión de movimiento al brazo portainductor a través de 3 engranajes, uno de ellos de mayor tamaño respecto a los otros 2, con una abertura en el brazo principal para que sobresalga el engranaje de mayor tamaño.
- Motor móvil en la parte superior del brazo principal, con diferentes opciones para la forma del brazo portainductor (figura 4.25) y así evitar su choque con el motor móvil.

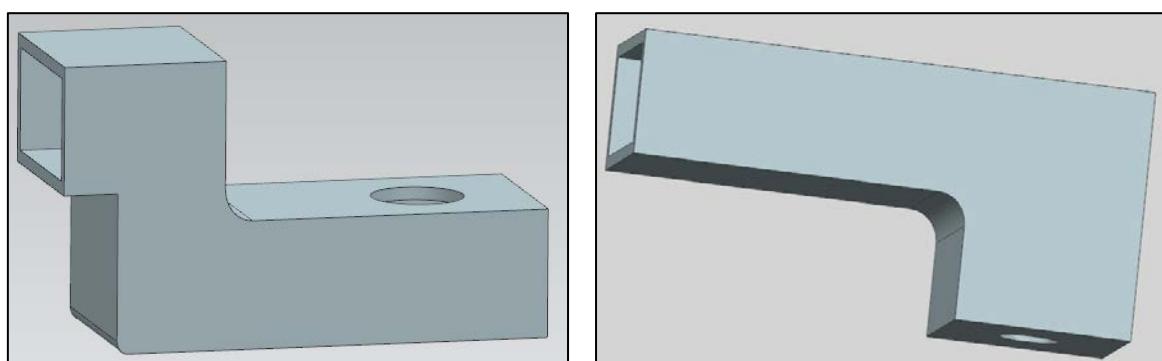


Figura 4.25. Diferentes formas de brazo portainductor.

• **Sistema S3:**

- Transmisión de movimiento al brazo portainductor a través de 5 engranajes, todos en la parte interior del brazo principal.
- Motor móvil en la parte superior del brazo portainductor, con la geometría del brazo portainductor igual que sistemas S2 y S4.

• **Sistema S4:**

- Transmisión de movimiento al brazo portainductor a través una correa dentada, colocada en el interior del brazo principal.
- Motor móvil en la parte superior del brazo portainductor, con la geometría del brazo portainductor igual que sistemas S2 y S3.

En la tabla 4-7 se presentan las ventajas e inconvenientes de cada sistema de brazos robóticos, la altura total y de la parte móvil del sistema, y los resultados obtenidos por el Método de los Elementos Finitos con la sección de acero cuadrada y de perfil delgado.

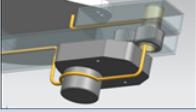
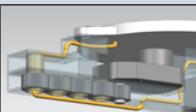
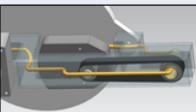
	<u>VENTAJAS</u>	<u>INCONVENIENTES</u>	<u>CARACTERISTICAS</u>
<u>Sistema S1</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cables por eje de giro. • Uso de sólo 2 engranajes. • Menor flecha (debido a forma del brazo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor altura total. • Unión motor-brazo principal más compleja. • Mayor flector. 	<u>Desplazamientos:</u> 0.260 mm <u>Von Mises:</u> 17.86 MPa <u>Alturas:</u> Total: 100 mm Parte móvil: 95 mm
<u>Sistema S2</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cables por eje de giro. • Motor provoca menor flector y mas sencillo el anclaje al brazo principal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Engranaje central sobresale laterales. • Desgaste de engranajes 	<u>Desplazamientos:</u> 0.389 mm <u>Von Mises:</u> 18.75 MPa <u>Alturas:</u> Total: 95 mm Parte móvil: 77 mm
<u>Sistema S3</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cables por eje de giro. • Motor provoca menor flector y mas sencillo el anclaje al brazo principal. • Mayor protección elementos al estar dentro del brazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad del sistema de movimiento. • Desgaste de engranajes. 	<u>Desplazamientos:</u> 0.338 mm <u>Von Mises:</u> 15.61 MPa <u>Alturas:</u> Total: 95 mm Parte móvil: 77 mm
<u>Sistema S4</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cables por eje de giro. • Motor provoca menor flector y mas sencillo el anclaje al brazo principal. • Mayor protección elementos al estar dentro del brazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste y/o perdida tensión de correa. 	<u>Desplazamientos:</u> 0.338 mm <u>Von Mises:</u> 15.61 MPa <u>Alturas:</u> Total: 95 mm Parte móvil: 77 mm

Tabla 4-7. Ventajas e inconvenientes de sistemas presentados en fase I.

Las 4 alternativas de la fase I se presentaron en una reunión a los responsables del grupo BSH, y tras una exposición detallada de todos ellos, se tomó la decisión conjunta de descartar los sistemas S2 y S3. El sistema S2 no fue elegido por los inconvenientes que presenta el tener un gran engranaje que sobresale del brazo principal: complejidad de mecanismo, posibles choques con otros elementos, mayor peso del conjunto y menor protección de los componentes del interior al tener el brazo una abertura. El sistema S4, a pesar de ser la correa el sistema de transmisión de movimiento más sencillo, se descartó por los problemas que podría generar la correa debido a su desgaste o pérdida de tensión durante toda la vida útil de la cocina de inducción, lo que repercutiría en un mayor mantenimiento del sistema. Por lo tanto, los siguientes pasos a seguir para la fase II fueron encaminados a intentar perfeccionar los sistemas S1 y S3.

Fase II

En esta fase II se diseñaron 3 modelos basados en los sistemas S1 y S3 de la fase I, de los cuales uno de ellos fue finalmente elegido como el mejor modelo de brazos robóticos que cumple con las especificaciones del grupo BSH.

El problema del sistema S1 consistía en una mayor altura de su parte móvil, y el del sistema S3, era la gran cantidad de elementos necesarios para conseguir transmitir el movimiento del motor móvil al brazo portainductor. Estos problemas fueron los que se intentaron mejorar y solucionar en la fase II.

Los 3 sistemas de brazos robóticos presentados en la fase II fueron:

- **Sistema A:**
 - Mismo sistema que el modelo S1 presentado en la fase I, ya que se consideró que no existía posibilidad de mejora manteniendo estas características.
- **Sistema B:**
 - Se amplió la anchura del brazo a 50 milímetros, lo que permitió reducir el número de engranajes a 3, pero perjudicó al sistema al añadir mayor peso e inercia.
 - No se pudo reducir el número de engranajes sin aumentar la anchura de brazo y de engranaje, ya que el brazo portainductor chocaría con el motor móvil, debido a que es necesario que la suma de las longitudes de brazo portainductor e inductor sea igual que la longitud del brazo principal (figura 4.26).

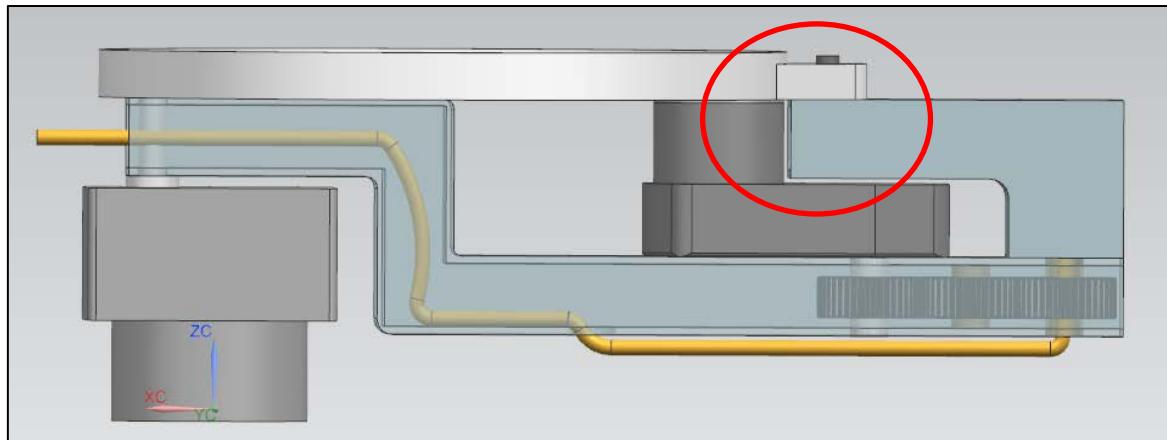


Figura 4.26. Espacio entre motor móvil y brazo portainductor en sistema B.

- **Sistema C:**

- Este sistema es una evolución del sistema A, pero haciendo una modificación al motor Crouzet 80 913 0 elegido para el sistema. La única forma de reducir altura a la parte móvil del sistema manteniendo sus características, era introducir el motor de alguna manera en el interior del brazo, algo imposible con la geometría que tenía de serie el motor. Se pensó la posibilidad de invertir la posición de salida del eje (figura 4.27), introduciendo la parte inferior del motor paso a paso dentro del brazo y así disminuir su altura.
- Al igual que el sistema A, la transmisión de movimiento al brazo portainductor se realiza a través de 2 engranajes, que se encuentran en la parte interior del brazo principal.

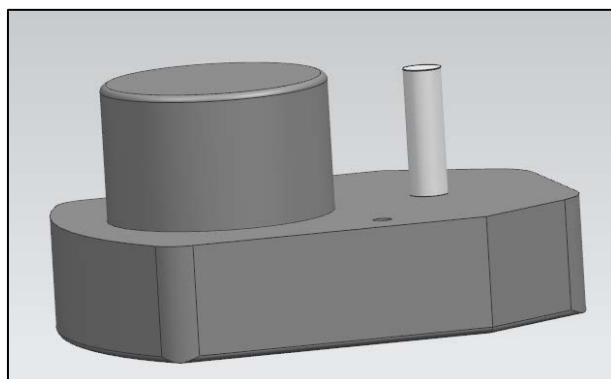


Figura 4.27. Motor móvil con eje de salida inverso.

Se mantuvo una reunión en la Torre Iberdrola de Bilbao, sede del grupo Crouzet en esa ciudad, con el ingeniero responsable de micromotores de la marca, explicándole las características que se requerían para el motor de la opción C.

Una vez que la marca Crouzet confirmó que era posible la fabricación de este motor, con la modificación del eje de salida, se presentaron los modelos de la fase II a los responsables de BSH, y tras la realización de una tabla de valor (tabla 4-8), donde se puntuaron las características de cada uno los 3 sistemas de brazos robóticos (siendo 1 lo mínimo, y 3 lo máximo), se eligió la opción C como el mejor sistema de brazos robóticos capaz de cumplir con el objeto de este proyecto. Tal y como se adelantó en el capítulo 4.2, se decidió que los brazos fuesen fabricados finalmente en aluminio con una sección maciza, decisión que se tomó principalmente para evitar los problemas que tiene el acero con los campos de inducción magnética y que no presenta el aluminio.

	<u>Altura Total</u>	<u>Altura Móvil</u>	<u>Número Elementos</u>	<u>Volumen Ocupado</u>	<u>Montaje</u>	<u>Posición Motores</u>	<u>Flecha</u>	<u>Total</u>
Sistema A 	3	1	3	2	3	2	3	17
Sistema B 	3	3	2	2	1	3	2	16
Sistema C 	3	3	3	3	2	2	3	19

Tabla 4-8. Tabla de valor para elección diseño final (Fase II).

El prototipo final estará compuesto por 3 sistemas de brazos robóticos, tal y como se calculó en el capítulo 4.1, con diferentes longitudes de brazos cada uno, pero con la misma geometría y sistema de transmisión de movimiento que la opción C elegida.

4.5 Cálculo resistente del brazo robótico final

Una vez elegido el sistema de brazos robóticos definitivo que se implementará en el prototipo, se analizó el sistema por el Método de los Elementos Finitos con los brazos en 3 diferentes posiciones: cerrados, totalmente abiertos y con el brazo portainductor formando 90º con el brazo principal.

En este apartado se presentan sólo los resultados para el sistema de brazos robóticos número 2, ya que al ser el de mayor tamaño de brazos, es el más restrictivo. El cálculo realizado para los sistemas de brazos robóticos números 1 y 3 se encuentra en el Anexo C.4.

Los modelos de brazos robóticos analizados en este capítulo tienen ya las mismas medidas finales que los que se presentan en los planos del anexo G, ya con toda su geometría adaptada a los componentes comerciales que fueron seleccionados finalmente. El programa utilizado, igual que en los análisis realizados anteriormente es Nx-Unigraphics, con el motor de cálculo Nastran.

El material utilizado para los cálculos es la aleación de Aluminio 7075, muy utilizada en sectores como el aeronáutico debido a su gran resistencia mecánica. Se explican con más detalle las propiedades de esta aleación en el Anexo C.5.

El tipo de solución elegido fue *SOL 101 Linear Statics – Global Constraints*, que es la recomendada para casos de cargas estáticas sobre elementos de máquinas (figura 4.28).

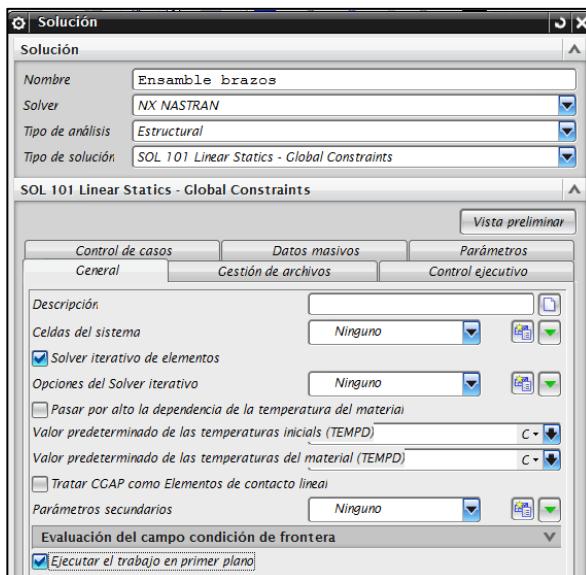


Figura 4.28. Tipo de solución y de análisis utilizados para el análisis por Elementos Finitos.

El mallado de cada componente se hizo con elementos CTETRA 3D, con el tamaño del elemento automático para cada uno. Como se trataba de un ensamblaje entre diferentes sólidos, se seleccionó la opción grosor mínimo mediante dos elementos para mejorar la exactitud del cálculo (figura 4.29).

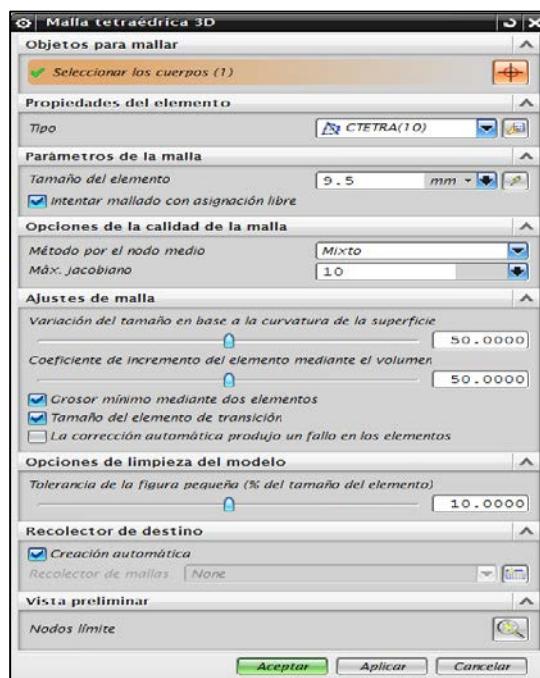


Figura 4.29. Tipo de Elemento Finito utilizado para el análisis.

La unión entre los elementos se simuló con la opción adherencia de superficie con superficie, que mantiene el contacto entre dos sólidos por 2 caras que se tocan. Para mejorar esta simulación, se hizo una división en la cara superior del brazo principal y otra en la parte inferior de la placa portainductor para crear las zonas de contacto, de manera que la superficie de adherencia es menor que si fuese toda la cara entera, haciendo más exacto el cálculo (figuras 4.30 y 4.31).

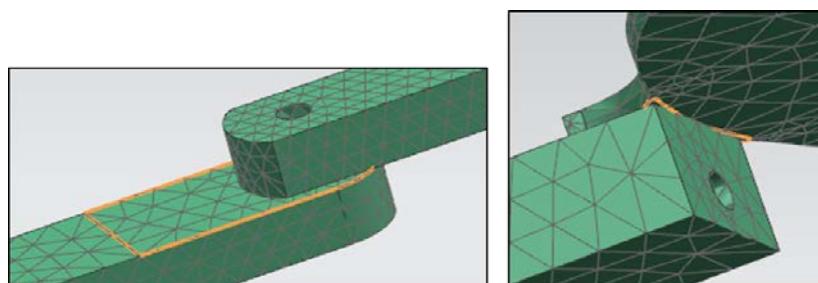


Figura 4.30. Zonas creadas en cara de brazo y placa portainductor para mejorar la simulación de contacto.

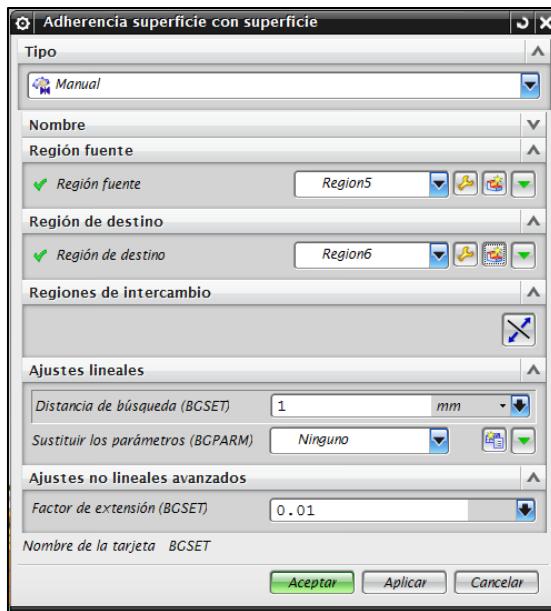


Figura 4.31. Menú para seleccionar las zonas de superficie en contacto.

Las zonas de adherencia entre superficies se señalan en el programa con flechas en la dirección normal a las caras, tal y como se representa en la figura 4.32.

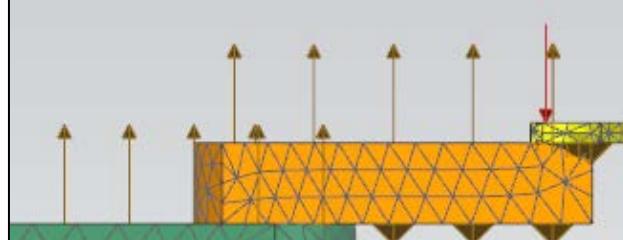


Figura 4.32. Flechas que representan las superficies en contacto.

Se restringieron todos los grados de libertad del brazo principal a través de su eje de giro (figura 4.33), para simular el contacto que existe entre el brazo y el eje del motor fijo.

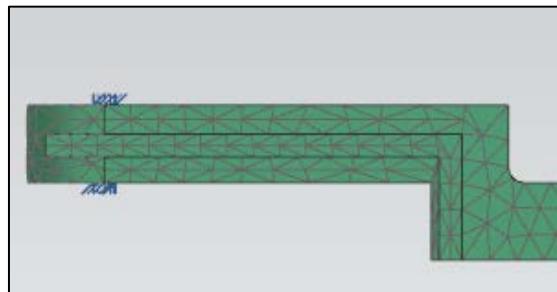


Figura 4.33. Restricción eje de giro del brazo principal.

Las cargas introducidas fueron:

- Peso inductor de diámetro 18: 4.074 N.
- Peso motor móvil de 3 N·m: 3.70 N.
- Peso de cada componente según la densidad del aluminio, que introduce automáticamente el programa.

Los resultados obtenidos para el sistema de brazos robóticos número 2 se muestran a continuación:

Brazo totalmente estirado:

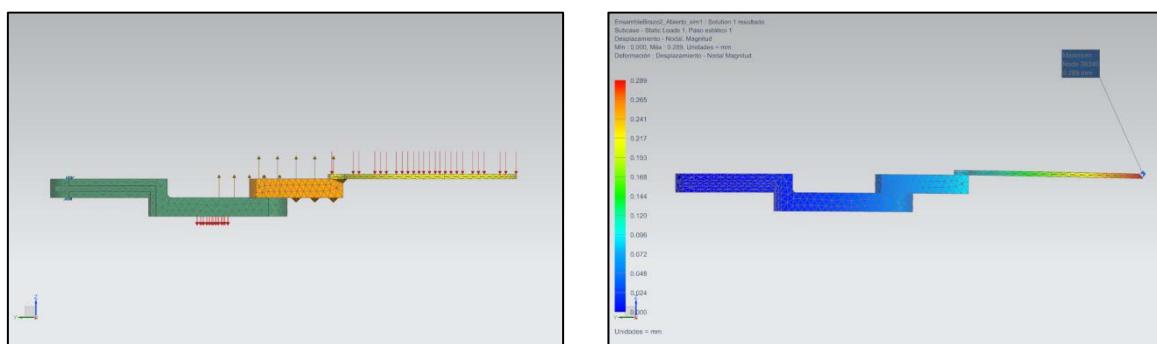


Figura 4.34. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y desplazamientos.

Brazo cerrado:

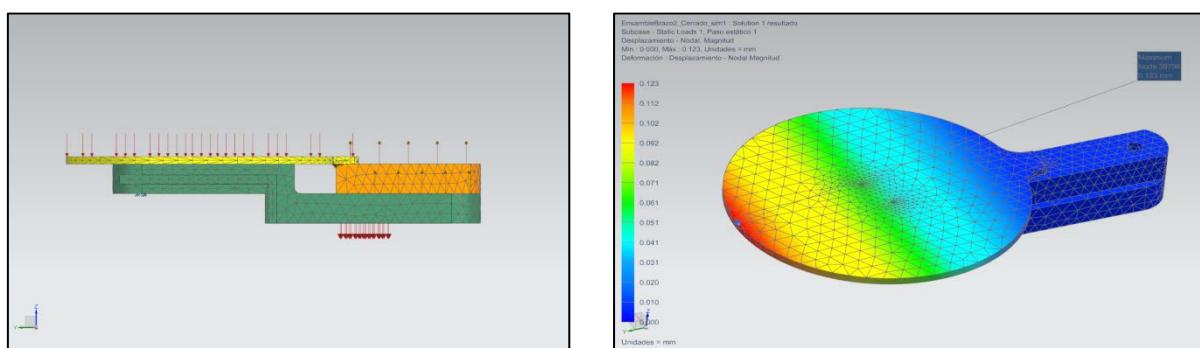


Figura 4.35. Modelo brazo cerrado mallado con cargas, y desplazamientos.

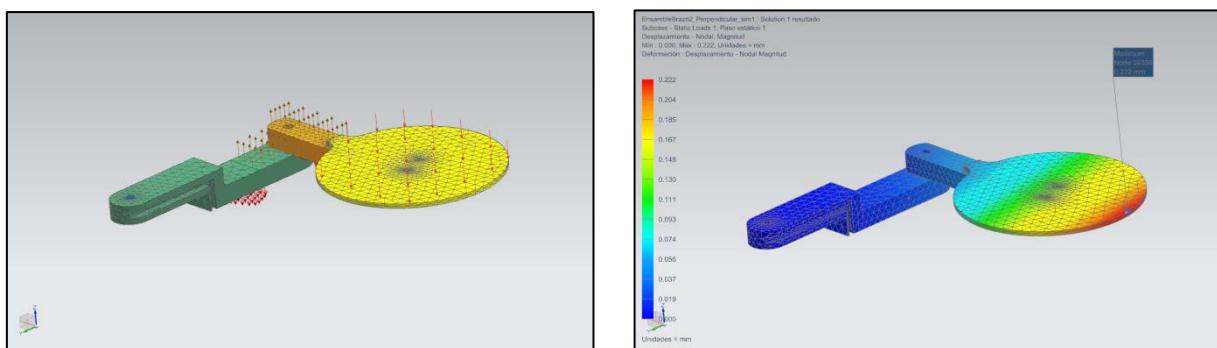
Brazo 90º:

Figura 4.36. Modelo brazo a 90º mallado con cargas, y desplazamientos.

Como se puede comprobar en la tabla 4-9, los desplazamientos máximos están por debajo de la flecha máxima permitida de 1 milímetro, siendo este sistema de brazos robóticos analizado (número 2), el más restrictivo al tener las mayores longitudes de brazos.

Modelo analizado	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (Mpa)
Brazo totalmente estirado	0.289	7.64
Brazo cerrado	0.128	7.917
Brazo a 90º	0.222	7.324

Tabla 4-9. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 2.

Con estos resultados obtenidos, se comprueba que el sistema de brazos robóticos es capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometido, manteniendo su flecha por debajo de 1 milímetro.

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO

Las operaciones de fabricación de los componentes de los sistemas de brazos robóticos y su posterior montaje e implementación en el bastidor, se han llevado a cabo en el Taller de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza. En este capítulo, se presentan sólo los elementos que forman el sistema de brazos robóticos número 2. En el Anexo D se presentan más detalles sobre los componentes, además de varias vistas sobre los sistemas robóticos 1 y 3. En el anexo G, se encuentran los planos de todos los elementos que forman los 3 sistemas de brazos robóticos, y que se facilitaron al Taller de Mecánica de precisión para su fabricación.

5.1 Componentes principales del sistema de brazos robóticos

Los componentes principales del cada sistema de brazos robóticos son:

- Brazo principal:

Es el brazo más largo de cada sistema de brazos robóticos, va unido al motor fijo a través del eje del motor, y al brazo portainductor a través de un eje-casquillo.

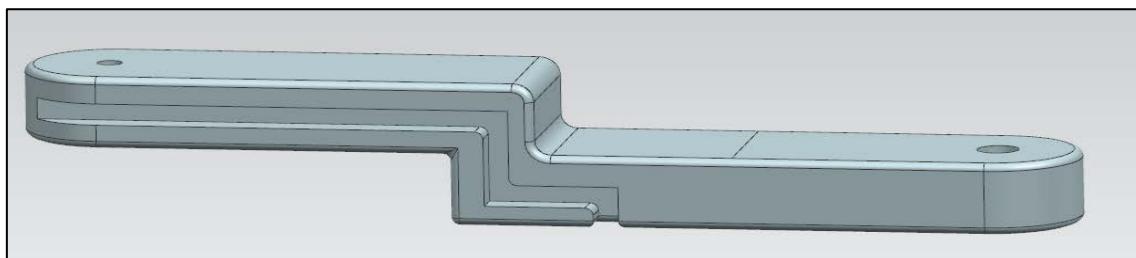


Figura 5.1. Brazo principal del sistema de brazos robótico número 2.

- Brazo portainductor:

Es el brazo sobre el que va apoyado el inductor, a través de la placa portainductor. Se le realiza un agujero que atraviesa su interior para facilitar el paso del cable.

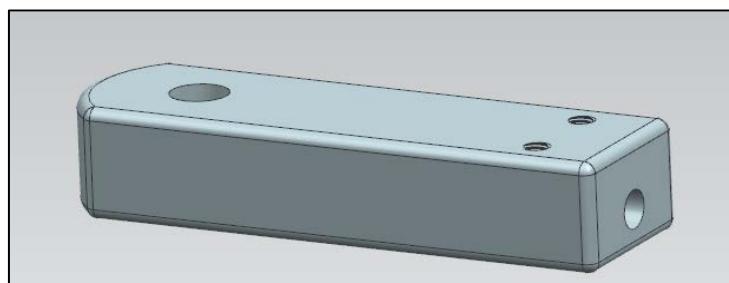


Figura 5.2. Brazo portainductor del sistema de brazos robótico número 2.

- Placa portainductor:

Es la placa que se coloca debajo de cada inductor, tiene la función de aislar las ferritas que se encuentran en la superficie inferior del inductor. Está fabricada de aluminio, con un espesor de 5 milímetros y está unida al brazo portainductor.

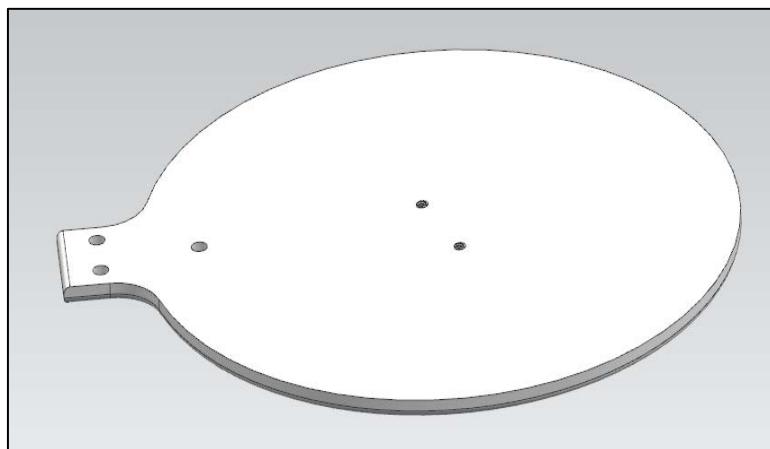


Figura 5.3. Placa portainductor.

- Inductor grupo BSH:

El inductor es el componente encargado de transmitir el campo de inducción magnética al recipiente que se desea calentar, gracias a la corriente que circula por sus hilos de cobre. Tiene un diámetro máximo de 18 centímetros y es el mismo para los 3 sistema de brazos robóticos, siendo el encargado de su construcción el grupo BSH. Va unido a la placa portainductor a través de 2 tornillos de Titanio, ya que es un material resistente y que no interfiere con el campo de inducción magnética.

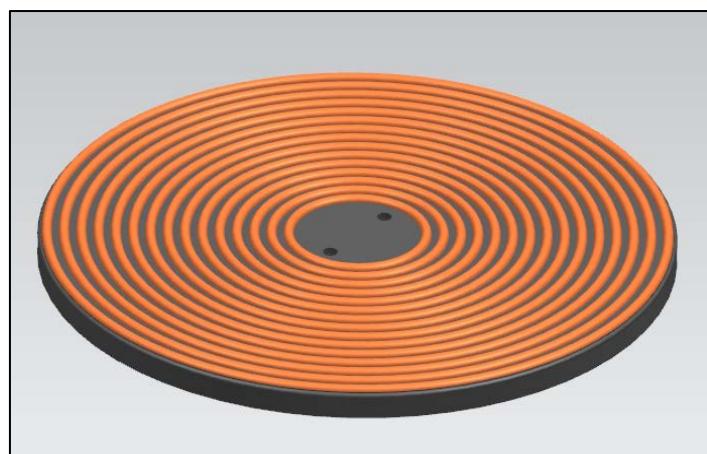


Figura 5.4. Inductor grupo BSH.

- Motores:

Los motores serán los modelos de la marca Crouzet seleccionados en el capítulo 4.3.4. Un motor fijo de $5\text{ N}\cdot\text{m}$, que va unido al bastidor por su base; y un motor móvil solidario al brazo principal, con un par de $3\text{ N}\cdot\text{m}$.

5.2 Sistema de transmisión de movimiento y cableado

Transmisión de movimiento

El sistema de transmisión de movimiento del motor móvil al brazo portainductor, se va a realizar mediante dos engranajes. Como no tienen la misión de transmitir potencia, ya que simplemente transmiten movimiento, serán los dos del mismo tamaño. Debido a que sólo se dispone de una anchura de 40 milímetros de brazo, se eligen de un diámetro de 17 milímetros, que es un tamaño que permite mantener 1.15 centímetros de espesor a cada lado del brazo que los proteja, y así no debilitar en exceso la resistencia del brazo.

Se seleccionan los engranajes de la marca BEA (anexo F), como este modelo en concreto de engranajes vienen ciegos de fábrica, se piden con 2 diámetros interiores diferentes (figura 5.5):

- De 6 milímetros en el engranaje que irá en el eje del motor móvil.
- De 10 milímetros en el engranaje que irá en el eje que une los 2 brazos.

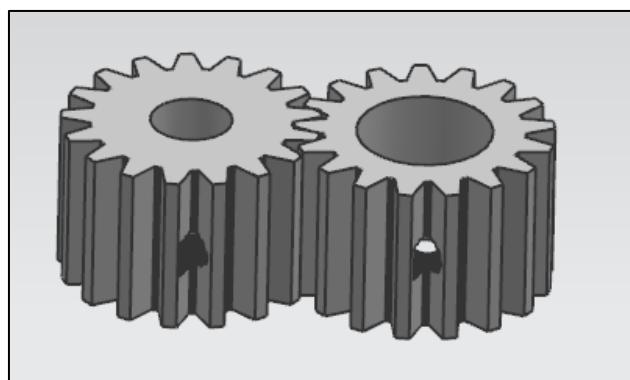


Figura 5.5. Engranajes marca BEA.

Cableado

El paso del cable es una de las partes más críticas del prototipo, ya que un fallo o enrollamiento del cable, impediría el correcto funcionamiento del sistema.

Para hacerlo pasar por su eje de giro y a la vez por el interior de los brazos, se realiza un agujero en el brazo portainductor hasta el interior del eje que une los 2 brazos, y se diseña una hendidura por el lateral del brazo principal para guiarlo por su interior, que evita tener que hacer un agujero interior bastante complejo por la propia forma del brazo (figura 5.6).

Para proteger el cable del exterior, mantenerlo aislado y además facilitar su manipulación, se diseña una placa de teflón con la misma forma que posee la hendidura del brazo principal (figura 5.7).

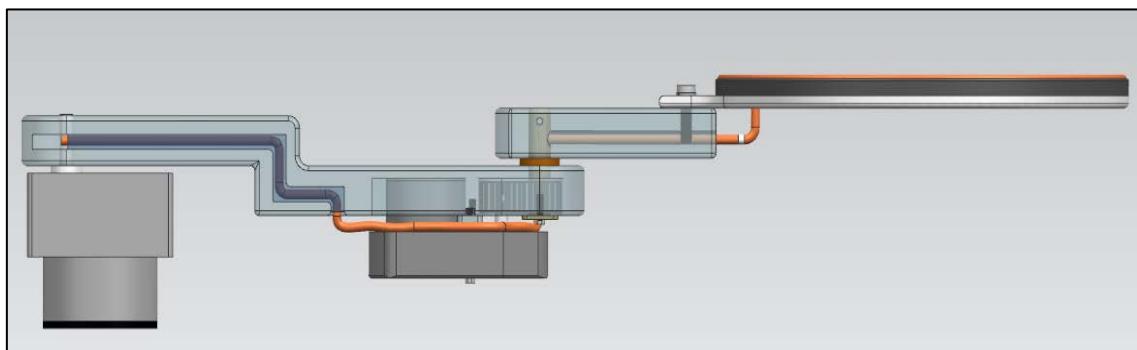


Figura 5.6. Paso del cable a través del sistema de brazos robóticos.



Figura 5.7. Placa portainductor.

5.3 Uniones entre elementos del sistema mecánico

Al ser un sistema mecánico con unas dimensiones tan reducidas, el principal problema ha sido la geometría de la que se disponía para introducir elementos de unión. Por lo tanto, el principal método de diseño ha sido maximizar las dimensiones de los elementos de unión, según permitía la geometría, y comprobar posteriormente que eran capaces de soportar los esfuerzos. Los catálogos comerciales se incluyen en el Anexo F.

Unión placa portainductor a brazo portainductor

Esta unión es la más compleja de todo el sistema, ya que tiene que soportar los mayores esfuerzos.

Cargas soportadas:

- Peso inductor: 4.07 N.
- Peso placa portainductor de aluminio: 3.687 N.

Descartando la unión soldada, se hizo un primer cálculo con 2 tornillos a 13 mm de distancia del borde del brazo portainductor (figura 5.8), para analizar si eran capaces de soportar los esfuerzos, y en caso contrario, repetir el cálculo aumentando el número de tornillos.

Los tornillos pueden fallar en su parte central o “núcleo” debido a las cargas que pueden ocurrir en éste, además, es posible que los filetes del tornillo o de la tuerca se barran, debido al esfuerzo cortante que se genera en los filetes cuando se somete el tornillo a tracción. El método de cálculo utilizado se detalla en el Anexo E.

- Esfuerzo a tracción del tornillo:

La fuerza de tracción que soporta cada tornillo es de 28,26 N

Se eligen tonillos M5 - clase 8.8 Acero, con una resistencia a la tracción de 660 Mpa.

$$\sigma = \frac{28.26N}{14.18mm^2} = 2Mpa$$

Como 660>>2, la elección del tornillo es válida.

- Esfuerzo cortante

$$S = \frac{F}{A_{ba}} \quad n_f \leq \frac{L_T}{p} = \frac{28}{0.8} = 35$$

- Para perno:

$$A_{ba} = \pi \times 4.02 \times (0.8 \times 0.8) \times 10 = 80,82$$

$$S = \frac{28.26}{80.82} = 0.3496 \text{ MPa}$$

- Para tuerca:

$$A_{ba} = \pi \times 5 \times (0.8 \times 0.8) \times 10 = 110$$

$$S = \frac{28.26}{110} = 0.25 \text{ MPa}$$

Como los cálculos realizados han demostrado que el tipo de tornillo elegido inicialmente es válido, se escoge como solución comercial:

- 2 Tornillos DIN 912 M5x20mm.
- 2 Arandelas “Grower” DIN 127/B M5.

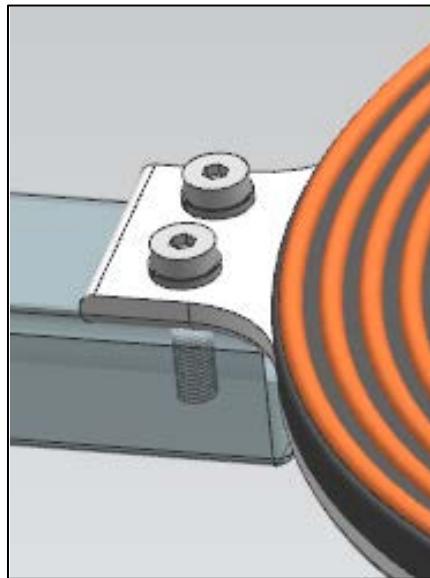


Figura 5.8. Detalle unión placa portainductor a brazo portainductor.

Unión del eje del motor fijo a brazo principal

Se realizará por medio de un tornillo prisionero. Teniendo en cuenta el diámetro de 6 milímetros del eje, y la anchura de 40 milímetros de brazo, se escoge el Tornillo DIN 913 M3x27mm.

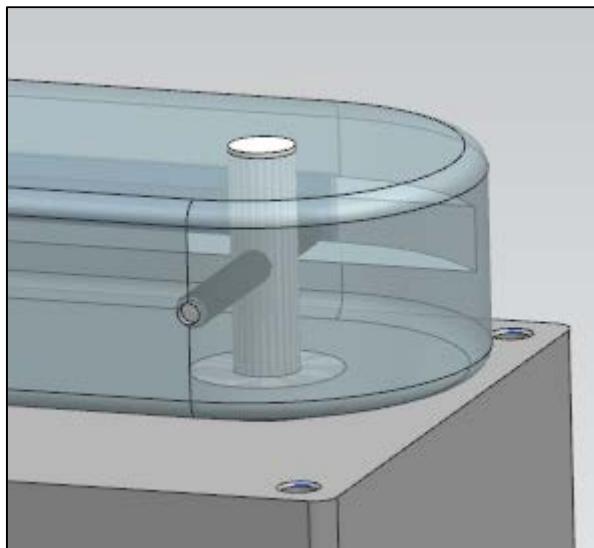


Figura 5.9. Unión de motor fijo a brazo principal.

Unión motor móvil a brazo principal

Se realizará por medio de una placa de aluminio, que irá atornillada al motor móvil por los laterales, aprovechando los agujeros que trae de fábrica el motor, y al brazo por el centro (figura 5.10).

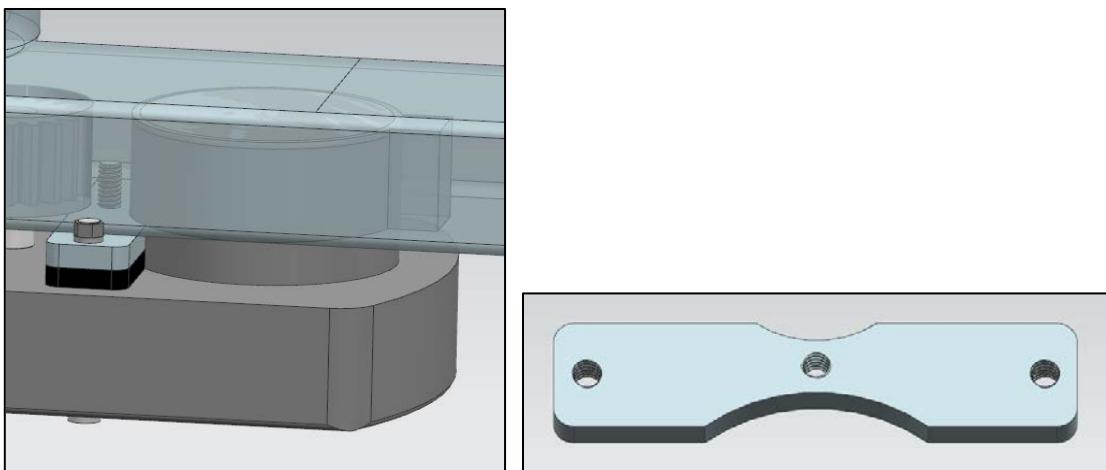


Figura 5.10. Unión de motor móvil a brazo principal y placa de aluminio.

Se añadirá también una pequeña placa antivibraciones de 3 milímetros de espesor para reducir las posibles vibraciones que transmita el motor al sistema.

Se escoge como solución comercial:

- 2 Tornillos DIN 912 M3x28mm.
- 2 Roscas DIN 934 M3.
- 2 Arandelas “Grower” DIN 127/B M3.
- 1 Tornillo DIN 912 M3x11mm.

Unión engranajes

La unión de los engranajes se llevará a cabo mediante 2 tornillos prisioneros, teniendo en cuenta que el eje-casquillo que une los 2 brazos no puede ser atravesado totalmente, ya que en ese caso el tornillo impediría el paso del cable.

Se escoge como solución comercial:

- Tornillo DIN 913 M3x15mm para el engranaje que va unido al eje motor.
- Tornillo DIN 913 M3x8mm para el engranaje que va unido al eje-casquillo.

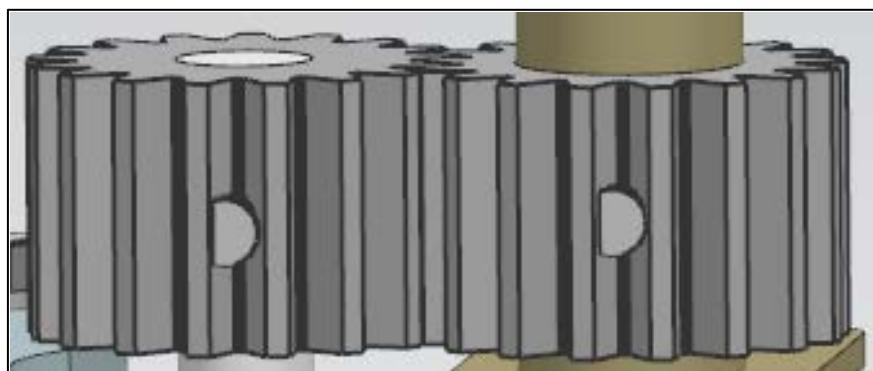


Figura 5.11. Unión de engranajes a eje motor móvil y eje-casquillo.

Unión entre brazos

En esta unión intervienen diversos factores, por un lado, tiene que existir un eje que une los 2 brazos y que a la vez sea solidario a un engranaje y al brazo portainductor, y por otro, se tiene que permitir el paso del cable a través de él. A este eje se le ha denominado: eje-casquillo.

Lo primero que se hizo, fue añadirle al diseño un anillo de separación entre el brazo principal y el brazo portainductor de 3 milímetros de espesor, que cree una mínima distancia entre los dos brazos para que no se puedan chocar cuando el brazo portainductor se cierre sobre el brazo principal. El material del anillo será latón, por el escaso rozamiento que presenta. Si en futuras pruebas de funcionalidad se viese que este material no soporta perfectamente el rozamiento, se fabricaría con materiales más complejos como el Turcite.

Para que sea solidario el eje-casquillo al brazo portainductor, se hace una unión mediante un tornillo prisionero del mismo modelo que el utilizado en la unión brazo principal y motor fijo. Para no entorpecer el paso del cable, la unión se lleva a cabo por encima del agujero que tiene el eje para el paso del cable que viene por el interior del brazo portainductor.

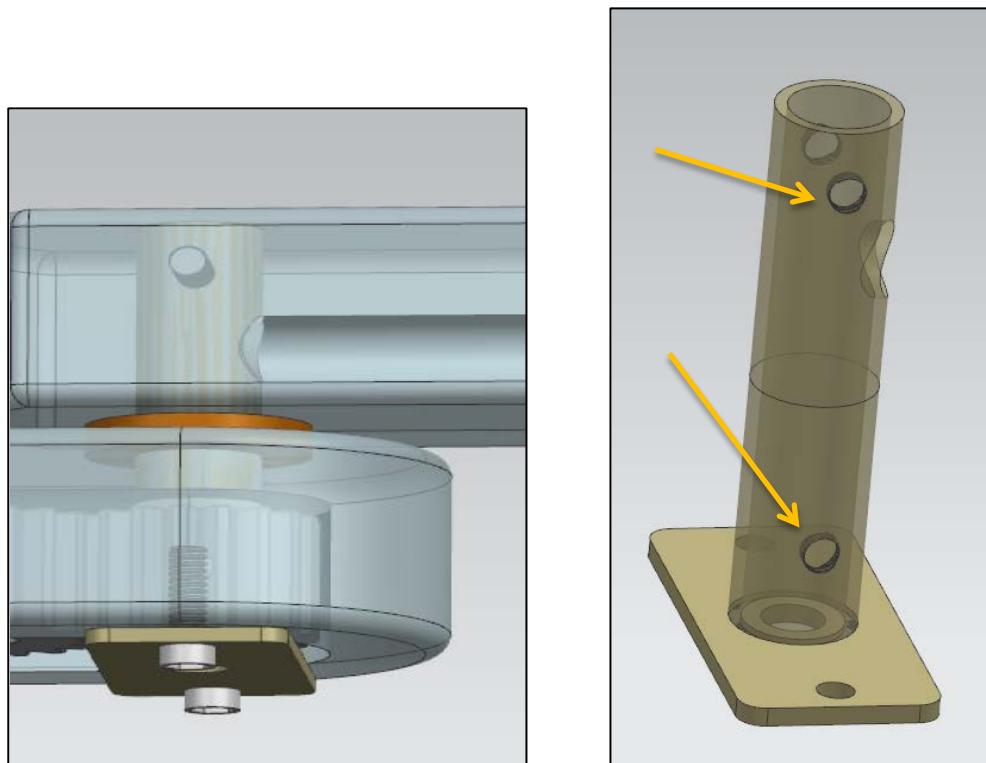


Figura 5.12. Unión entre brazos a través de eje-casquillo y detalle posición de prisioneros en eje-casquillo.

Con el fin de asegurar todavía más esta unión, se diseña una pequeña placa de latón, con una anillo interior de teflón de 0.5 milímetros de profundidad sobre el que se apoyará la parte inferior del eje-casquillo (figura 5.12). Esta placa dispone de un agujero pasante en su centro para el paso del cable de cobre del sistema.

La unión de la placa al brazo principal se realizará con 2 Tornillos DIN 912 M3x10mm.

5.4 Controlador de los motores y placa electrónica

Los controladores de los motores que se implementarán en el prototipo deben cumplir:

- Facilidad de conexión a PC.
- Entradas auxiliares.
- Baja complejidad e programación.
- Rango de potencias alto para utilizar con diferentes motores.
- Facilidad de instalación y reducido tamaño.
- Solución comercial.

Para el correcto control de los motores, se contemplaron 2 posibilidades (figura 5.13):

- Placa de Arduino: una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.
- Driver All Motion: un controlador de motores paso a paso capaz de controlar hasta 4 motores, por lo que serían necesarios 2 drivers AllMotion.

Se adquirieron los 2 tipos controladores y se realizaron pruebas básicas de movimiento de los motores, llegando a la conclusión con los responsables del grupo BSH de que el controlador óptimo es el driver AllMotion, ya que al ser el la placa de Arduino software libre, podrían surgir complicaciones en un futuro desarrollo del prototipo.

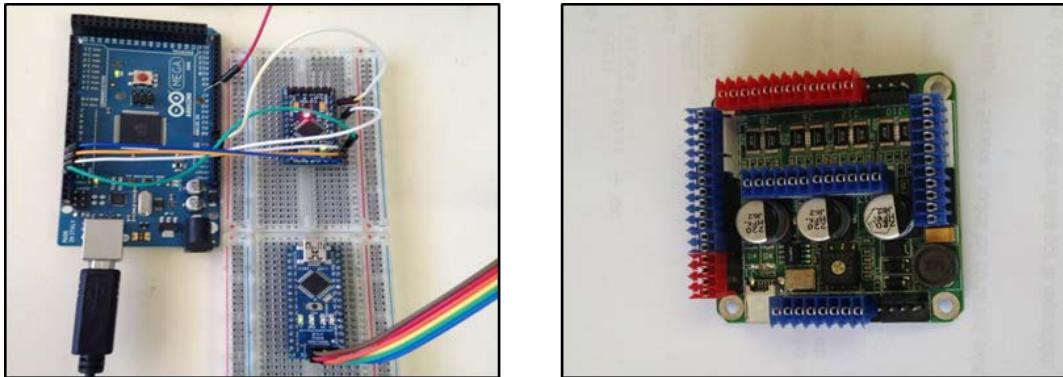


Figura 5.13. Placa Arduino y driver AllMotion empleados en pruebas de movimiento de motores.

Como toda cocina de inducción, el prototipo de inductores móviles que se ha diseñado necesitará de una placa electrónica para su correcto funcionamiento, en la que además de los elementos electrónicos (condensadores, transistores..) se ubicará el ventilador encargado de mantener la temperatura correcta (figura 5.14).

Para este proyecto, y teniendo en cuenta que al ser una tecnología reciente se van a realizar numerosas pruebas en los elementos electrónicos, los responsables del grupo BSH pidieron que se colocase separada del sistema mecánico, y con una fácil accesibilidad a la placa para poder realizar los cambios y las pruebas necesarias. Por lo que se decidió colocar en la parte inferior del bastidor, como se verá en el capítulo 5.6.



Figura 5.14. Modelo de placa electrónica similar al que se utilizará en el prototipo.

5.5 Montaje y lista de piezas del diseño final

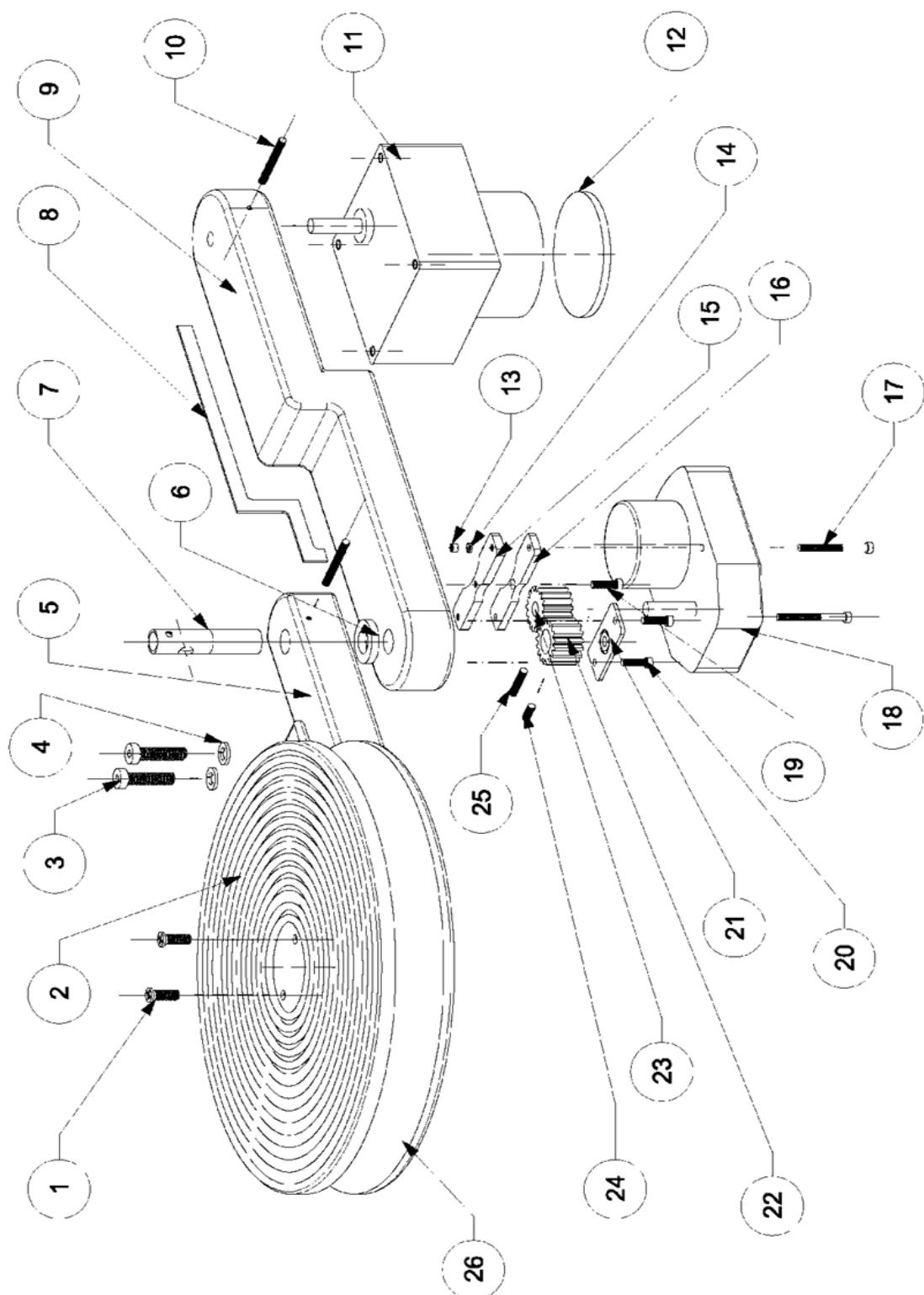


Figura 5.15. Plano de conjunto explosionado de sistema de brazos número 2.

Marca	Denominación	Nº Piezas	Material
1	Tornillo DIN 7985 M3x12mm	2	Titanio
2	Inductor BSH	1	
3	Tornillo DIN 912 M5x20mm	2	Acero
4	Arandela "Grower" DIN 127/B M5	2	Acero
5	Brazo Portainductor	1	Aluminio 7075
6	Anillo Separación	1	Latón
7	Eje-Casquillo	1	Acero
8	Placa Cable	1	Teflón
9	Brazo Principal	1	Aluminio 7075
10	Tornillo DIN 913 M3x27mm	2	Acero
11	Motor PaP "Crouzet" 5 Nm	1	
12	SilentBlock Motor Fijo Ø 51.3 mm	1	Elastómero
13	Rosca DIN 934 M3	2	Acero
14	Arandela "Grower" DIN 127/B M3	2	Acero
15	Placa Sujeción Motor Móvil	1	Aluminio 7075
16	SilentBlock Motor Móvil	1	Elastómero
17	Tornillo DIN 912 M3x28mm	2	Acero
18	Motor PaP "Crouzet" 3 Nm	1	
19	Tornillo DIN 912 M3x11mm	1	Acero
20	Tornillo DIN 912 M3x10mm	2	Acero
21	Placa Apoyo Casquillo	1	Latón + Teflón
22	Engranaje Z17 Øinterno: 6mm	1	Acero
23	Engranaje Z17 Øinterno: 10mm	1	Acero
24	Tornillo DIN 913 M3x8mm	1	Acero
25	Tornillo DIN 913 M3x15mm	1	Acero
26	Placa Portainductor	1	Aluminio 7075

Tabla 5-1. Lista de piezas de cada sistema de brazos robóticos.

A continuación se presentan dos vistas del sistema de brazos robóticos número 2, la figura 5.16 es un corte transversal de todo el sistema donde se aprecia el interior de los componentes, y la figura 5.17 es un explosionado completo de todos los elementos que componen el sistema mecánico, y que se incluyen en la tabla 5-1.

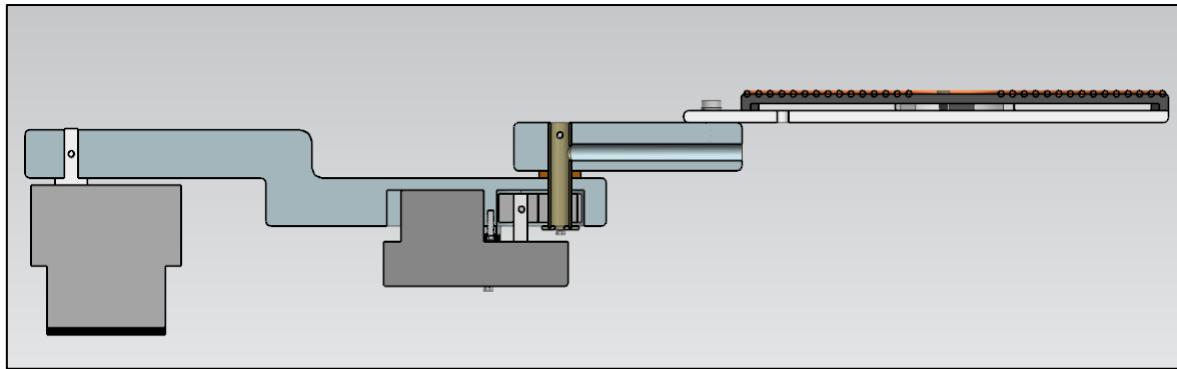


Figura 5.16. Sección transversal de sistema de brazos robóticos número 2.

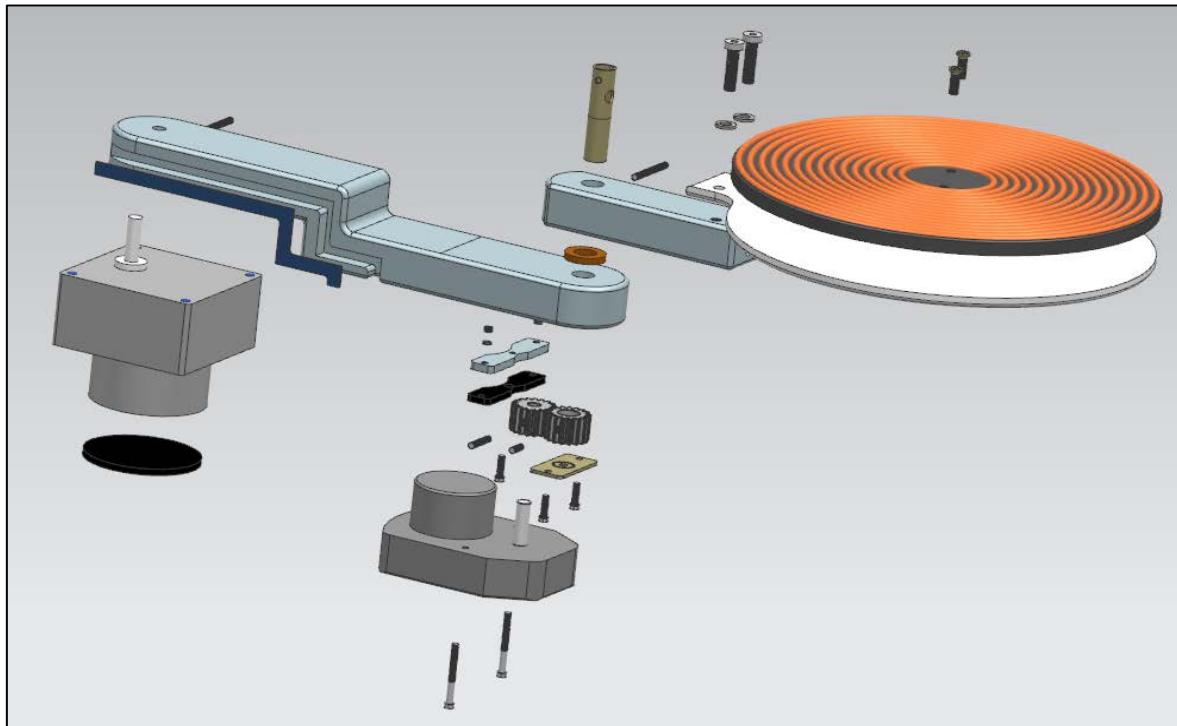


Figura 5.17. Explosión del sistema de brazos robóticos número 2.

5.6 Implementación del sistema de brazos robóticos en conjunto cocina

El prototipo diseñado de inductores móviles se implementará en un conjunto cocina, que estará formado, además de por los 3 sistemas de brazos robóticos, por un bastidor donde se fijarán los brazos; un cristal que cubra el sistema y sobre el que se apoyarán los recipientes a calentar; y una placa electrónica.

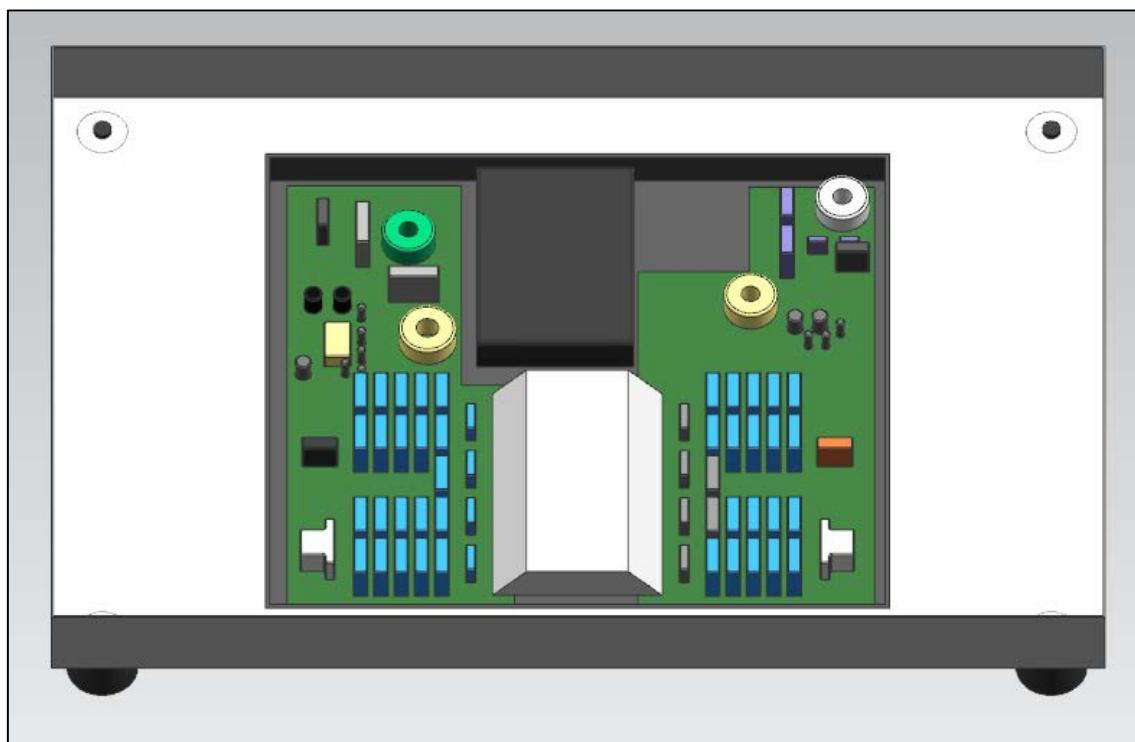


Figura 5.18. Placa electrónica debajo de bastidor.

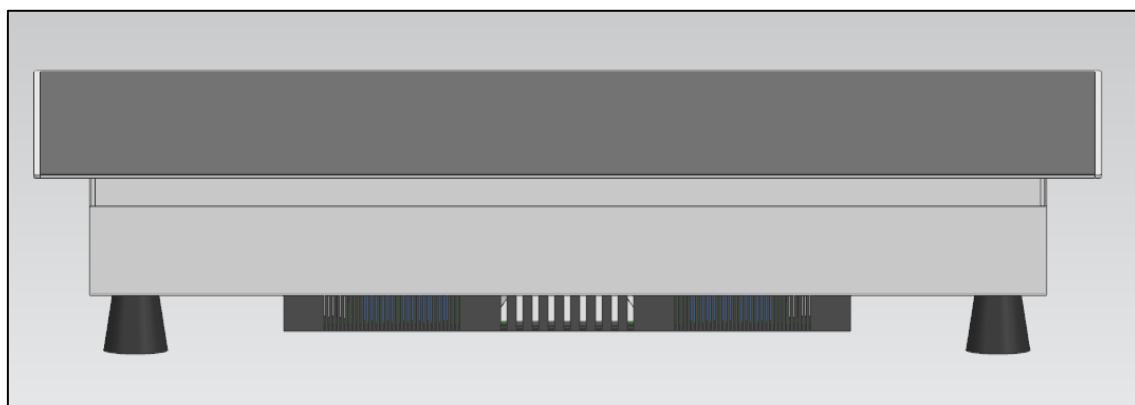


Figura 5.19. Conjunto cocina con bastidor, cristal y placa electrónica.

La unión de los brazos robóticos al bastidor se realizará a través del motor fijo, con 4 tornillos que emplearán los agujeros que trae el motor de serie.

Se escoge como solución comercial (para los 3 motores):

- 12 Tornillos DIN 963 M3x67mm.
- 12 Roscas DIN 934 M3.
- 12 Arandelas “Grower” DIN 127/B M3.

En la figura 5.20 se observan los tornillos que unen el motor al bastidor, seleccionados de cabeza avellanada para que no sobresalgan sobre la cara superior del motor, y así evitar cualquier posible interferencia con el brazo principal durante su movimiento. Se detallan también las roscas y arandelas elegidas, ubicadas en la parte inferior del bastidor.

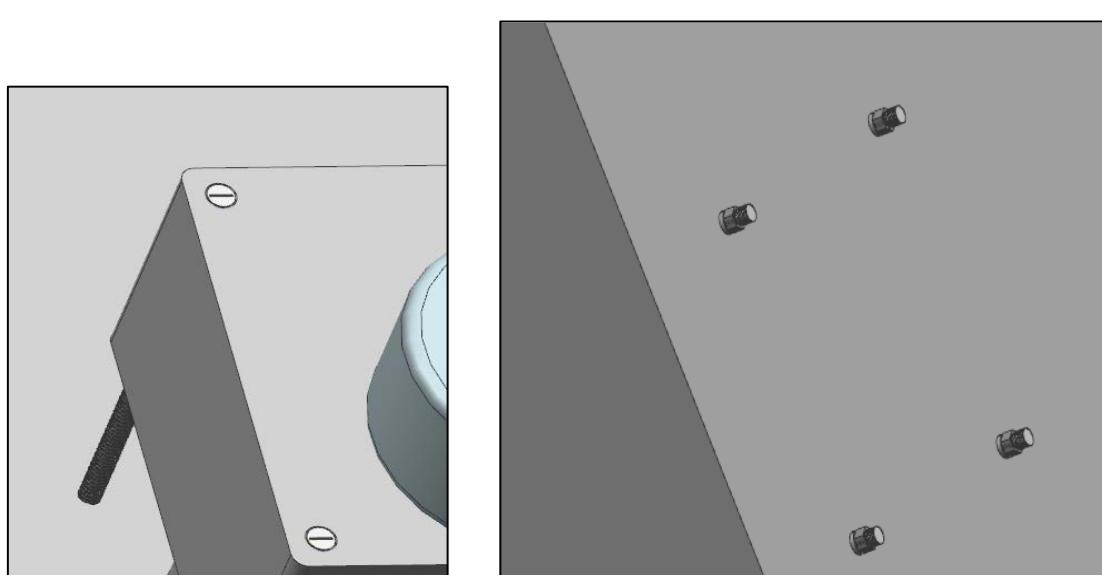


Figura 5.20. Unión motor fijo a bastidor.

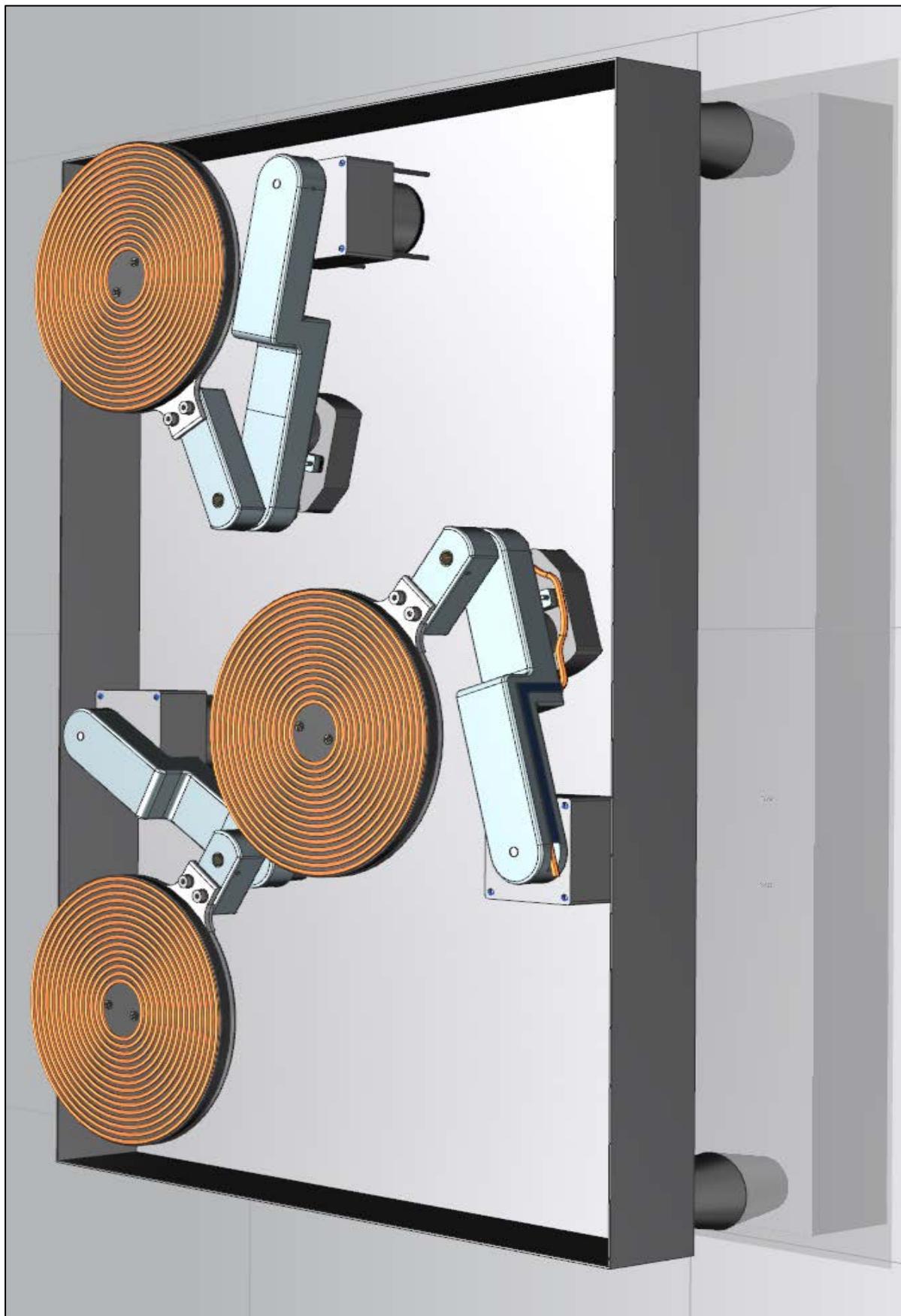


Figura 5.21. Implementación física de los brazos robóticos en el bastidor.

6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO: OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Conclusiones

Durante el tiempo de duración del proyecto, se ha logrado el objetivo marcado de diseñar y construir un prototipo mecánico de tres inductores móviles dispuestos en una cocina de inducción, que permita el calentamiento de hasta seis recipientes colocados aleatoriamente en cualquier posición de la placa.

A partir de los estudios y análisis realizados pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- Según los condicionantes y especificaciones impuestos por la empresa BSH, y tras examinar todos los sistemas mecánicos de movimiento existentes, se llega al resultado de que el sistema más apropiado es el formado por 3 sistemas de brazos robóticos con 2 rotaciones cada uno (R+R).
- Tras la introducción de las restricciones necesarias en un programa de Matlab, se concluye que las longitudes óptimas de los brazos para cada sistema de brazos robóticos son diferentes entre sí. Dando lugar a 3 sistemas de brazos robóticos, que comparten todos los componentes, excepto las longitudes del brazo principal y el brazo portainductor.
- Los motores que más se ajustan a este proyecto, debido a su posicionamiento con elevado grado de exactitud y a su buena regulación de velocidad, son del tipo paso a paso (PaP). Los valores del par necesarios para cada motor, se han calculado a partir del modelo matemático de simulación del movimiento, y su posterior implementación en Matlab.
- El mejor material para la fabricación de los brazos robóticos es la aleación de Aluminio 7075, gracias a sus propiedades mecánicas y a su buen comportamiento en presencia de campos magnéticos, ya que no es un material ferromagnético.
- La geometría diseñada para cada brazo (de material Aluminio 7075), soporta holgadamente los esfuerzos aplicados, manteniendo una flecha inferior a 1 milímetro.

Al ser un proyecto real de I+D+i para una empresa, me ha permitido aplicar al mundo profesional muchos de los conocimientos técnicos adquiridos en la carrera. Además del valor ingenieril de lo aquí desarrollado, el proyecto en sí me ha supuesto una valiosa experiencia, ya que he tenido que hacer frente a problemáticas reales de diversa naturaleza, como el contacto con proveedores y personal de fabricación; y me ha formado tanto en el plano técnico y profesional como en el personal.

Líneas futuras de trabajo

Una vez finalizado el proceso de construcción y montaje del prototipo, las líneas futuras de trabajo tendrán que ir encaminadas a su optimización, con la obligación de cumplir los condicionantes que en esta etapa de prototipo, se han tenido en cuenta pero no han sido de obligado cumplimiento. Los siguientes pasos a contemplarse serán:

- Prueba funcional inicial del prototipo.
- Comprobación de su resistencia con bandas extensiométricas que verifiquen los resultados obtenidos durante el proyecto por el Método de los Elementos Finitos, y preparar pruebas que simulando una vida útil de 10 años (10.000 horas de funcionamiento \approx 3h/día), verifiquen que la flecha del sistema de brazos robóticos se mantiene por debajo de 1 milímetro y que no se requiere mantenimiento para su correcto funcionamiento.
- Añadir sensores al prototipo y diseñar el sistema de control del sistema para:
 - Evitar interferencias y choques durante el calentamiento.
 - Posicionar los inductores y dotar de movimiento para un calentamiento dinámico.
- Estudio de la transmisión de vibraciones y de la generación de ruido.
- Análisis de posibles mejoras en los componentes del sistema y en los motores, para optimizar la altura del sistema, así como su coste económico. Los materiales que se escojan para los componentes serán en lo posible reciclables tanto por imposición legal como por la creciente sensibilidad ciudadana.
- Estudiar otras opciones para el paso del cable, como el conector rotatorio Mercotac o algún dispositivo similar.
- Análisis de cómo afectará la introducción de un display al diseño del prototipo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tania Olivares Benítez, "Manual Práctico NX7 CAD", Ed. Servicios Informáticos DAT, S.L.
2. César Pérez, "Matemática informatizada con Matlab", Ed. ra-ma (1996).
3. Bernhard E. Bürdek, "Teoría y práctica del diseño industrial", Ed. Gustavo Gili.
4. "Diseño industrial", Ed. LEDA (1976).
5. "El gran libro de 3DS Max 2010", Ed. Marcombo (2010).
6. Pierre Andre et François Lhote, "Les Robots", Ed Hermes (1983).
7. B. Gorla et M. Renaud, "Modeles des robots manipulateurs" (1984).
8. Pierre Lopez et Jean-Numa Foulc, "Introduction a la robotique", Ed. Tests (1984).
9. F. Sanz, C. Franco, C. Sagües, D. Paesa and S. Llorente, "Flexible Cooking Zone with 2D Mobile Inductors".
10. C. Franco, C. Sagües, D. Paesa, R. Alonso and J. Acero, "Inductive Sensor for Temperature Measurement in Induction Heating Applications".
11. Katsuhiko Ogata, "Dinámica de sistemas", Ed. Prentice hall.
12. F. Montaño La Cruz y D. Marcelo Venditti, "3ds Max 2010", Ed. Anaya.
13. A. Fernández, J. Castany y F. Serraller, "Principios de diseño en el proyecto de máquinas", Prensas Universitarias de Zaragoza.
14. A. Fernández, J. Castany y F. Serraller, "Análisis de la funcionalidad de los elementos de máquinas", Prensas Universitarias de Zaragoza.
15. J. Castany y C. Javierre, "Criterios de diseño de máquinas y sus elementos", Prensas Universitarias de Zaragoza.
16. J. M. Altemir Grasa, "Dibujo industrial", Universidad de Zaragoza.
17. Juan Lladó y Beatriz Sánchez, "Apuntes curso mecánica clásica", Universidad de Zaragoza.
18. Beer, Johnston and Cornwell, "Mecánica vectorial para ingenieros estática", Ed. McGrawHill.
19. Beer, Johnston and Cornwell, "Mecánica vectorial para ingenieros dinámica", Ed. McGrawHill.
20. José Antonio Vásquez Angulo, "Análisis y diseño de piezas de máquinas: método de los elementos finitos", Ed. Marcombo (2008).
21. Luis Serrano Iribarnegaray, "Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas", Universidad Politécnica de Valencia (1989).
22. Jesús Fraile Mora, "Máquinas eléctricas", Ed. McGrawHill (2008).
23. James Rumbaugh, "Modelado y diseño orientado a objetos". Ed. Prentice Hall (1999).

24. G. Brassard and T. Bratley, “*Fundamentos de algoritmia*”, Ed. Prentice Hall (1999).
25. Patente “CEPEM”: *ES 2 065 712* (Fecha concesión 16/02/1995).
26. Patente japonesa: *JP2003297539* (Fecha concesión 17/10/2003).
27. Patente japonesa: *JP2006230516* (Fecha concesión 07/09/2006).
28. Patente empresa BSH: *ES 2 319 031 B1* (Fecha concesión 21/01/2010).
29. Patente solicitada empresa BSH: *P201131290* (Fecha recepción: 28/07/2011).
30. Patente solicitada empresa BSH: *P201131292* (Fecha recepción: 28/07/2011).
31. Patente solicitada empresa BSH: *P201131293* (Fecha recepción: 28/07/2011).
32. Catálogo Crouzet “*Micromotores*”.
33. Catálogo AUXITEC “Tornillería y fijaciones”.
34. Catálogo BEA “Engranajes”.
35. <http://www.mercotac.com/>

8. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Índice de figuras

Figura 1.1. Distintas soluciones comerciales presentes en inducción para aportar superficies flexibles (de más rígida -arriba- a más flexible -abajo-)	2
Figura 1.2. Zonas flexibles en cocinas de inducción.....	3
Figura 1.3. Inducción flexible.	4
Figura 1.4. Calentamiento estático y dinámico de un recipiente.	5
Figura 1.5. Distintos tipos de trayectorias en calentamiento dinámico.	5
Figura 3.1. Esquemas cinemáticos de mecanismos con 2 G.L.	13
Figura 3.2. Estructura general del brazo robótico.....	14
Figura 4.1. Área de trabajo de un brazo robótico y visión de conjunto del sistema.	15
Figura 4.2. Dimensiones características de bastidor e inductor.	15
Figura 4.3. Parámetros del brazo robótico.....	16
Figura 4.4. Relación entre longitudes de brazos.	17
Figura 4.5. Distancia mínima entre anclajes y restricciones asociadas.....	17
Figura 4.6. Distancia mínima a los bordes y restricciones asociadas.....	18
Figura 4.7. Trayectoria del centro del inductor.....	18
Figura 4.8. Soluciones geométricas para un punto del área de alcance.....	18
Figura 4.9. Soluciones posibles con restricciones geométricas.	19
Figura 4.10. Cálculo del parámetro S y sistema de ecuaciones para despejarlo.	19
Figura 4.11. Posiciones de anclaje (mm) sobre bastidor de los brazos robóticos.	21
Figura 4.12 Flecha a torsor sección perfil delgado (Acero) y sección llena (Aluminio).....	23
Figura 4.13. Flecha a flector sección perfil delgado (Acero) y sección llena (Aluminio).....	24
Figura 4.14. Parámetros geométricos y coordenadas independientes para estudio del movimiento de R+R.....	26
Figura 4.15. Acciones verdaderas sobre S1.....	28
Figura 4.16. Acciones verdaderas sobre S2.....	28
Figura 4.17. Dos posiciones diferentes del brazo durante la simulación de movimiento.	30
Figura 4.18. Medidas del modelo elegido para motor fijo (L1 máx.=59.2mm).	33
Figura 4.19. Medidas del modelo elegido para motor móvil.....	34
Figura 4.20. Alternativas previas de brazos con eje motor atacando directamente brazo portainductor	35
Figura 4.21. Paso del cable con el brazo portainductor en diferentes posiciones.	36

Figura 4.22. Conector Mercotac y su posición en sistema de brazos robóticos.....	37
Figura 4.23. Imagen del experimento a fatiga del cable, pasando por el eje de giro.....	37
Figura 4.24. Geometría del brazo principal (forma de Z) en modelos de fase I.....	38
Figura 4.25. Diferentes formas de brazo portainductor.....	39
Figura 4.26. Espacio entre motor móvil y brazo portainductor en sistema B.....	42
Figura 4.27. Motor móvil con eje de salida inverso.....	42
Figura 4.28. Tipo de solución y de análisis utilizados para el análisis por Elementos Finitos.....	44
Figura 4.29. Tipo de Elemento Finito utilizado para el análisis.....	45
Figura 4.30. Zonas creadas en cara de brazo y placa portainductor para mejorar la simulación de contacto.....	45
Figura 4.31. Menú para seleccionar las zonas de superficie en contacto.....	46
Figura 4.32. Flechas que representan las superficies en contacto.....	46
Figura 4.33. Restricción eje de giro del brazo principal.....	46
Figura 4.34. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y desplazamientos.....	47
Figura 4.35. Modelo brazo cerrado mallado con cargas, y desplazamientos.....	47
Figura 4.36. Modelo brazo a 90º mallado con cargas, y desplazamientos.....	48
Figura 5.1. Brazo principal del sistema de brazos robótico número 2.....	49
Figura 5.2. Brazo portainductor del sistema de brazos robótico número 2.....	49
Figura 5.3. Placa portainductor.....	50
Figura 5.4. Inductor grupo BSH.....	50
Figura 5.5. Engranajes marca BEA.....	51
Figura 5.6. Paso del cable a través del sistema de brazos robóticos.....	52
Figura 5.7. Placa portainductor.....	52
Figura 5.8. Detalle unión placa portainductor a brazo portainductor.....	54
Figura 5.9. Unión de motor fijo a brazo principal.....	55
Figura 5.10. Unión de motor móvil a brazo principal y placa de aluminio.....	55
Figura 5.11. Unión de engranajes a eje motor móvil y eje-casquillo.....	56
Figura 5.12. Unión entre brazos a través de eje-casquillo y detalle posición de prisioneros en eje-casquillo.....	57
Figura 5.13. Placa Arduino y driver AllMotion empleados en pruebas de movimiento de motores.....	59
Figura 5.14. Modelo de placa electrónica similar al que se utilizará en el prototipo.....	59
Figura 5.15. Plano de conjunto explosionado de sistema de brazos número 2.....	60
Figura 5.16. Sección transversal de sistema de brazos robóticos número 2.....	62
Figura 5.17. Explosión del sistema de brazos robóticos número 2.....	62

Figura 5.18. Placa electrónica debajo de bastidor.....	63
Figura 5.19. Conjunto cocina con bastidor, cristal y placa electrónica.....	63
Figura 5.20. Unión motor fijo a bastidor.....	64
Figura 5.21. Implementación física de los brazos robóticos en el bastidor.....	65
Figura A.1. Representación [de la a) a la t)] de un modelo por cada grupo de cocinas de inducción del grupo BSH que comparten tecnología.....	83
Figura A.2. Patente JP2006230516: inductor se mueve hasta puchero y lo calienta.....	86
Figura A.3. Patente JP2006230516: sistema de movimiento.	86
Figura A.4. Patente JP2006230516: inductor móvil en 1D entre dos posiciones para conseguir una zona de calentamiento mayor.	86
Figura A.5. Patente JP2006230516: sistemas de movimiento 1D y posibles configuraciones... ..	87
Figura A.6. Patente ES2006230516: ampliación de zonas de cocción. Inductor móvil durante el calentamiento.	87
Figura A.7. Patente 2319031B1: múltiples inductores móviles. Colaboración para calentamiento en estático/movimiento del mismo puchero y calentamiento de varios pucheros con el mismo inductor.....	87
Figura A.8. Comunicado de invenciones. Inductores en 1D.....	88
Figura B.1. Alternativa 1 para brazos robóticos.....	95
Figura B.2. Alternativa 2 para brazos robóticos.....	96
Figura B.3. Alternativa 3 para brazos robóticos.....	96
Figura B.4. Alternativa 1 para movimiento de traslación.	98
Figura B.5. Alternativa 2 para movimiento de traslación.	99
Figura B.6. Alternativa 3 para movimiento de traslación.	99
Figura B.7. Alternativa 4 para movimiento de traslación.	100
Figura B.8. Alternativa 5 para movimiento de traslación.	100
Figura B.9. Alternativa seleccionada (Sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos).	104
Figura B.10. Parámetros geométricos y coordenadas independientes para estudio del movimiento de traslación.	105
Figura B.11. Acciones verdaderas sobre barra portainductor.	105
Figura B.12. Acciones verdaderas sobre inductor.....	106
Figura C.1. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección I (Acero).	109
Figura C.2. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección perfil delgado (Acero).	109
Figura C.3. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección I (Aluminio).	109
Figura C.4. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección perfil delgado (Aluminio)..	110
Figura C.5. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección maciza (Acero).	110

Figura C.6. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección maciza (Aluminio).	110
Figura C.7. Desplazamientos y tensión Von Mises flector, sección perfil delgado (Acero).	111
Figura C.8. Desplazamientos y tensión Von Mises flector, sección maciza (Aluminio).	111
Figura C.9. Momentos en los puntos A y O.....	119
Figura C.10. Fuerza 1 y Fuerza 2.....	119
Figura C.11. Fuerza 1' y Fuerza 2'.....	119
Figura C.12. Diferentes vistas de Sistema S1.	122
Figura C.13. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S1.....	122
Figura C.14. Diferentes vistas de Sistema S2.	123
Figura C.15. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S2.....	123
Figura C.16. Diferentes vistas de Sistema S3.	124
Figura C.17. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S3.....	124
Figura C.18. Diferentes vistas de Sistema S4.	125
Figura C.19. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S4.....	125
Figura C.20. Vistas de sistema S4 con conector rotatorio de Mercotac.	126
Figura C.21. Diferentes vistas de Sistema A.	127
Figura C.22. Diferentes vistas de Sistema B.	127
Figura C.23. Diferentes vistas de Sistema C.	128
Figura C.24. Problemática al intentar diseñar sistema B con sólo 2 engranajes.	128
Figura C.25. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 1).	129
Figura C.26. Modelo brazo a 90º mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema brazos número 1).....	129
Figura C.27. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 3).	130
Figura C.28. Modelo brazo cerrado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 3).	130
Figura D.1. Parte inferior brazo principal (sistema de brazos robóticos número 2).....	135
Figura D.2. Interior de brazo portainductor (sistema de brazos robóticos número 2).....	135
Figura D.3. Parte inferior (con ferritas) del inductor.	135
Figura D.4. Detalle del paso del cable sobre el motor.	136
Figura D.5. Detalle unión atornillada de motor móvil a la placa de sujeción.	136
Figura D.6. Placa apoyo casquillo con anillo interior de teflón.....	136
Figura D.7. Sistema final de brazos robóticos número 1.	137
Figura D.8. Sistema final de brazos robóticos número 3.	137

Índice de tablas

Tabla 1-1. Comparación prestaciones de soluciones a inducción flexible.....	4
Tabla 4-1. Valores para posición de anclaje y longitudes de los 3 sistemas de brazos robóticos calculados.....	21
Tabla 4-2. Valores de desplazamientos y tensión de Von Mises a torsor.....	23
Tabla 4-3. Valores de desplazamientos y tensión de Von Mises a flector.....	24
Tabla 4-4. Valores máximos para cada esfuerzo.....	31
Tabla 4-5. Comparativa entre diferentes modelos para selección de motor fijo.	33
Tabla 4-6. Comparativa entre diferentes modelos para selección de motor móvil.	34
Tabla 4-7. Ventajas e inconvenientes de sistemas presentados en fase I.	40
Tabla 4-8. Tabla de valor para elección diseño final (Fase II).....	43
Tabla 4-9. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 2.....	48
Tabla 5-1. Lista de piezas de cada sistema de brazos robóticos.	61
Tabla A-1. Modelos del grupo BSH con misma tecnología bajo diferente nombre de marca....	79
Tabla A-2. Diferentes modelos grupo BSH según tamaño bastidor.....	84
Tabla A-3. Ventajas prototipo UNIZAR frente cocinas actuales grupo BSH.	85
Tabla B-1. Diferentes sistemas de actuación para movimiento de traslación.....	97
Tabla B-2. Método de Pugh para rotaciones (brazos robóticos).	102
Tabla B-3. Método de Pugh para traslación (husillos).	103
Tabla B-4. Selección entre sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos, y sistema de 3 brazos robóticos.....	108
Tabla C-1. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 1.....	129
Tabla C-2. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 3.....	130
Tabla C-3. Propiedades de las series del aluminio.	131
Tabla C-4. Composición química de las principales aleaciones de la serie 7.	132
Tabla C-5. Carga a la rotura y límite elástico de diferentes aleaciones de aluminio.	133

ANEXOS

Anexo A. ESTUDIOS PREVIOS

A.1. Análisis de las cocinas de inducción actuales del grupo BSH

En un primer momento se analizaron todos los diferentes tipos de cocinas que existen en el grupo BSH, ya que este grupo engloba bajo diferentes nombres de marca (Balay, Siemens, Bosch, Neff y Gaggenau) muchos modelos que comparten la misma tecnología.

La explicación de los parámetros analizados es la siguiente:

- Superficie bastidor: es la superficie que posee el bastidor (sin contar posible display)
- Superficie útil: es la superficie libre que queda en el bastidor una vez colocado el display.
- Zona calentamiento: es la superficie en la que se puede colocar un recipiente para que sea calentado. En cocinas estáticas clásicas, la superficie de calentamiento coincide con la superficie de inductor, ya que sólo se puede calentar donde existe inductor. En el sistema de inductores móviles la zona de calentamiento, es toda la superficie útil, ya que los inductores se desplazan.
- Superficie inductores: es la superficie de inductor (cobre).

Análisis de cada modelo en particular:

- Zona calentamiento / superficie útil: la proporción entre la zona de calentamiento que posee un modelo de cocina y la superficie útil de la que dispone. Representa el porcentaje de aprovechamiento para calentar del espacio útil que se dispone. En NEFF T74F87N0 y Prototipo Unizar se aprovecha el 100%.
- Zona calentamiento / superficie inductores: representa la proporción entre la zona de calentamiento que posee un modelo de cocina y la superficie de inductores que posee. En cocinas estáticas clásicas, van a coincidir. En NEFF T74F87N0 y Prototipo Unizar la superficie de calentamiento es mayor que la superficie de inductores.

- Incremento zona calentamiento vs superficie inductores: representa el aumento que posee cada cocina entre zona de calentamiento y su superficie de inductor. Si el resultado es 0% significa que sólo se puede calentar en las zonas donde existe inductor, si el incremento es de un 35%, significa que con ese sistema, que posee una superficie determinada de inductor, se consigue calentar un 35% más de superficie.

Análisis de la variación de características cada modelo si se implementase el sistema de inductores móviles en ellos:

- Ahorro en superficie inductor: representa el % de cobre que se ahorra. Por ejemplo, si antes se utilizaban 100 cm² y ahora 25cm², el ahorro es del 75%.
- Incremento zona calentamiento: representa el aumento en % de la zona de calentamiento de cada modelo si se le implementase el sistema de inductores móviles, frente a la zona de calentamiento que tenía con sus inductores originales. Por ejemplo, si originalmente con sus inductores la zona de calentamiento era 100 cm² y ahora es 133cm², el incremento es del 33%.
- Incremento zona calentamiento vs superficie inductores Unizar: representa el aumento que posee cada cocina entre su zona de calentamiento y la superficie de inductor que tiene el sistema de inductores móviles de Unizar (3 inductores de diámetro 18 cm). Cuanto más grande sea el tamaño de bastidor, más grande será el incremento. Se ha supuesto que cada bastidor dispone el display que se implementaría en un futuro en el sistema de Unizar, para hacer más homogéneos los cálculos.

En la tabla A-1, se muestran los 82 tipos de cocinas que a fecha de Enero de 2013, dispone el grupo BSH. En cada columna están los modelos con los que cuenta cada marca de la compañía, y en cada fila (20) se ubican los modelos que aunque se venden bajo diferente marca y/o modelo, disponen de la misma tecnología.

Balay	Siemens	BOSCH	NEFF	Gaggenau
3EB928L 3EB997LQ	EH975ML21E	PIL975N14E		
3EB990F	EH975MD21E	PID975L24E PID975N24E		VI 491
3EB999LQ	EH975SZ11E	PIZ975N14E	T54T95N2 T55T95X2	
3EB987LQ 3EB950M	EH879ML11 EH885DL11E EH875ML21E	PIL875N24E		VI 481
3EB929LQ			T54T53N2	
3EB919LQ 3EB919MQ	EH675MR11E	PIR675N14E	T54T51N2 T52D51X2	
3EB918LQ 3EB916LR 3EB918MQ	EH685DD11E EH601MD21E EH675MD21 EEH651MD21E	PID675N24E PID651N24E PID679T14E	T44T23N2	
3EB917LQ 3EB915LR 3EB815LR 3EB815XR 3EB917MQ 3EB815MQ	EH679MK21E EH675MK21E EH651TK11E EH651RL11E	PIK601N24E PIK675N24E PIK675T14E PIK651T14E PIL651R14E PIL645R14E	T41D21X2 T41B11X2	VI 461
3EB814XR 3EB814ER	EH651RM16E	PIM651R16E		
3EB820LR				
	EH775MR11E			
	EH779MD21E EH775MD21E	PID775L24E PID775N24E		
	EH675MV11E	PIV675N14E		
	EH651TE11E	PIE651R14E	T41B30X2	
		PIN875N14E		
			T74F87N0	CX 480
			T54T75N2	
			T45D90X2	
			T54T55N2 T55T55X2	
			T54T83N2 T52D83X2	

Tabla A-1. Modelos del grupo BSH con misma tecnología bajo diferente nombre de marca.

Anexo A

A continuación se representa un modelo en particular de cada grupo de cocinas que comparten la misma tecnología, (un modelo por cada una de las 20 filas de la tabla A-1).



a) BALAY 3EB928L



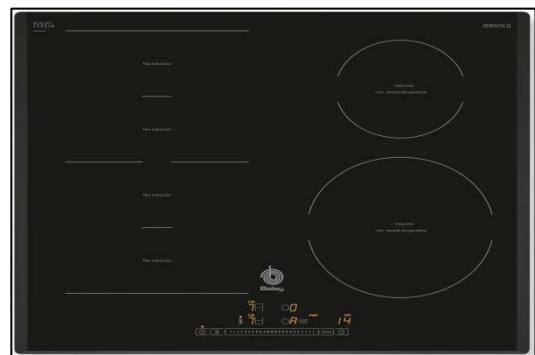
b) BALAY 3EB990F



c) BALAY 3EB999LQ



d) BALAY 3EB987LQ



e) BALAY 3EB929LQ



f) BALAY 3EB919LQ



g) BALAY 3EB918LQ



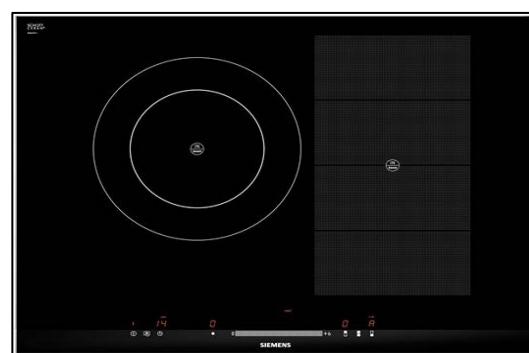
h) BALAY 3EB917LQ



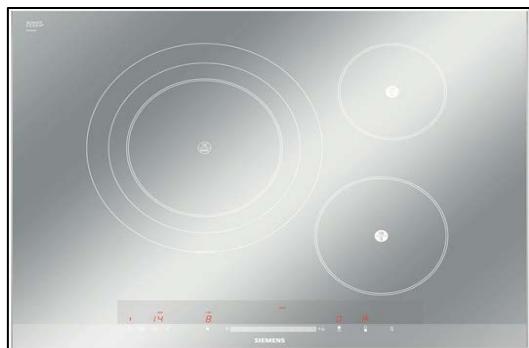
i) BALAY 3EB814XR



j) BALAY 3EB820LR



k) SIEMENS EH775MR11E



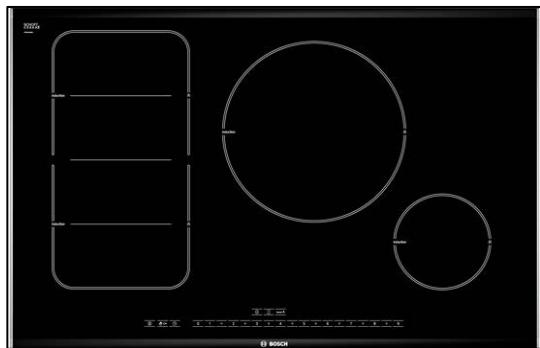
l) SIEMENS EH779MD21E



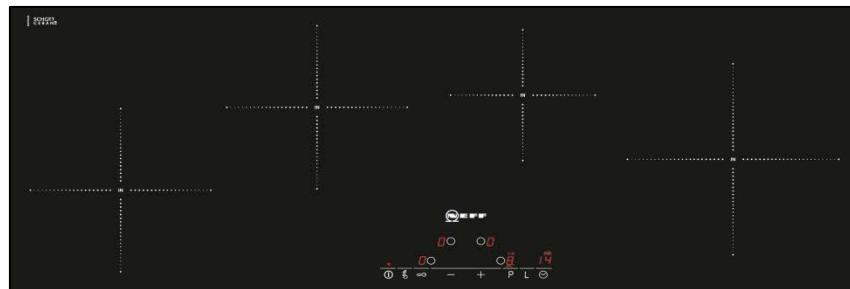
m) SIEMENS EH651TE11E



n) SIEMENS EH675MV11E



o) BOSCH PIN875N14E



p) NEFF T45D90X2



q) NEFF T74F87N0



r) NEFF T54T75N2



s) NEFF T54T55N2



t) NEFF T54T83N2

Figura A.1. Representación [de la a) a la t]) de un modelo por cada grupo de cocinas de inducción del grupo BSH que comparten tecnología.

MARCA	MODELO	SUPERFICIE BASTIDOR (Ancho x Fondo) [Cm ²]	Nº INDUCTORES	Nº ZONAS FLEXINDUCCION	ZONA CALENTAMIENTO /SUPERFICIE ÚTIL [%]	ZONA CALENTAMIENTO /SUPERFICIE INDUCTORES [%]	INCREMENTO ZONA CALENTAMIENTO vs SUPERFICIE INDUCTORES [%]
Balay	3EB990F	88 x 49	5	0	44	100	0
Balay	3EB999LQ	88 x 49	1	2	58	100	0
Balay	3EB928L	88 x 33	3	0	41	100	0
NEFF	T45D90XZ		4	0	37	100	0
Balay	3EB987LQ		4	0	37	100	0
BOSCH	PIN875N14E		2	1	45	100	0
NEFF	T74F87N0	75 x 49	0	1	100	135	35
NEFF	T54T83N2		2	1	50	100	0
UNIZAR	INDUCTORES MOVILES		3	0	100	427	327
Balay	3EB929LQ		2	1	57	100	0
Balay	3EB919LQ		1	1	54	100	0
Balay	3EB918LQ		3	0	47	100	0
Balay	3EB917LQ		3	0	44	100	0
Balay	3EB814XR		3	0	34	100	0
Balay	3EB820LR	56 x 49	4	0	33	100	0
Siemens	EH775MR1IE		1	1	54	100	0
Siemens	EH779MD2IE		3	0	47	100	0
Siemens	EH675MV1IE		0	2	61	100	0
Siemens	EH651TE1IE		4	0	40	100	0
NEFF	T54T75N2		0	2	74	100	0
NEFF	T54T55N2		0	2	74	100	0

Tabla A-2. Diferentes modelos grupo BSH según tamaño bastidor.

MARCA	MODELO	SUPERFICIE BASTIDOR (Ancho x Fondo) [Cm ²]	Nº INDUC	Nº ZONAS FLEX	AHORRO EN SUPERFICIE INDUCTOR [%]	INCREMENTO ZONA CALENTAMIENTO [%]	INCREMENTO ZONA CALENTAMIENTO vs SUPERFICIE INDUCTOR UNIZAR [CON DISPLAY UNIZAR]	
							INCREMENTO ZONA CALENTAMIENTO [%]	SUPERFICIE INDUCTOR UNIZAR [CON DISPLAY UNIZAR]
Balay	3EB990F	88x49	5	0	58	127	424	
Balay	3EB999LQ		1	2	68	74	74	
Balay	3EB928L	88x33	3	0	33	143	239	
NEFF	T45D90X2		4	0	26	168	168	
Balay	3EB987LQ		4	0	42	169	169	
BOSCH	PIN875N14E	75x49	2	1	52	122	340	
NEFF	T74F87N0		0	1	68	0	0	
NEFF	T54T83N2		2	1	56	102	102	
Balay	3EB929LQ		2	1	49	76	76	
Balay	3EB919LQ		1	1	46	84	84	
Balay	3EB918LQ		3	0	38	111	111	
Balay	3EB917LQ		3	0	33	129	129	
Balay	3EB814XR		3	0	14	195	195	
Balay	3EB820LR	56x49	4	0	11	203	203	
Siemens	EH775MR11E		1	1	46	84	84	
Siemens	EH779MD21E		3	0	38	111	111	
Siemens	EH675MV11E		0	2	52	63	63	
Siemens	EH651TE11E		4	0	26	153	153	
NEFF	T54T75N2		0	2	60	36	36	
NEFF	T54T55N2		0	2	60	36	36	
UNIZAR	INDUCTORES MOVILES	75x49	3	0				

Tabla A-3. Ventajas prototipo UNIZAR frente cocinas actuales grupo BSH.

A.2. Análisis de las patentes en inducción flexible

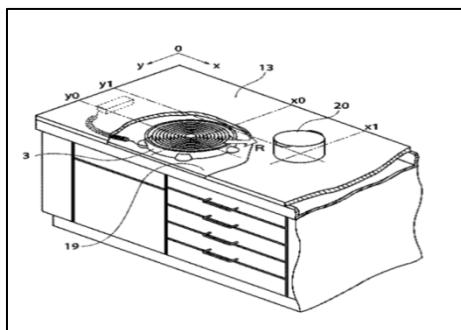


Figura A.2. Patente JP2006230516: inductor se mueve hasta puchero y lo calienta.

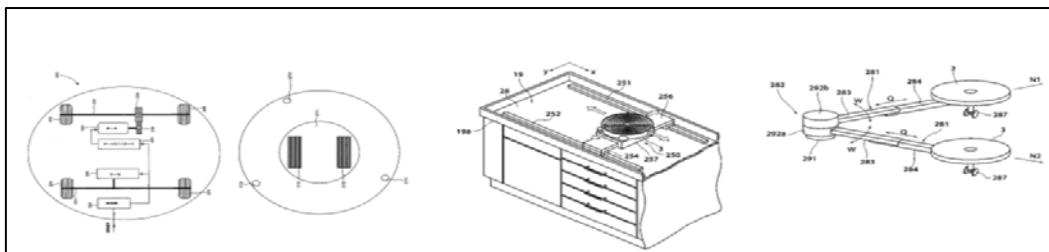


Figura A.3. Patente JP2006230516: sistema de movimiento.

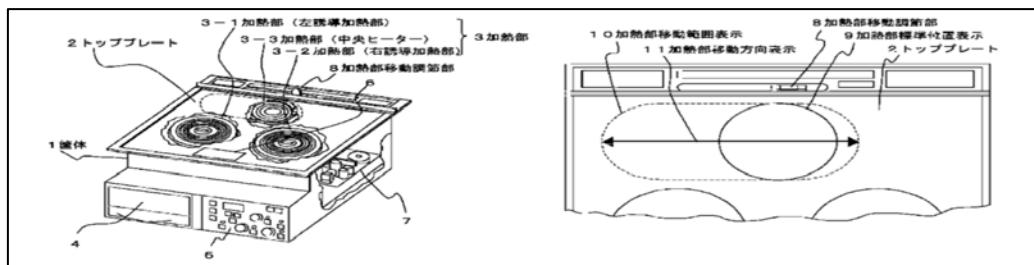


Figura A.4. Patente JP2006230516: inductor móvil en 1D entre dos posiciones para conseguir una zona de calentamiento mayor.

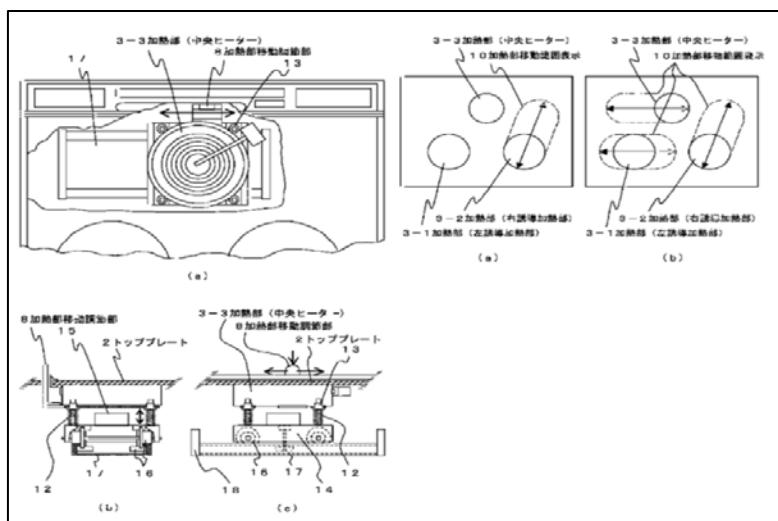


Figura A.5. Patente JP2006230516: sistemas de movimiento 1D y posibles configuraciones.

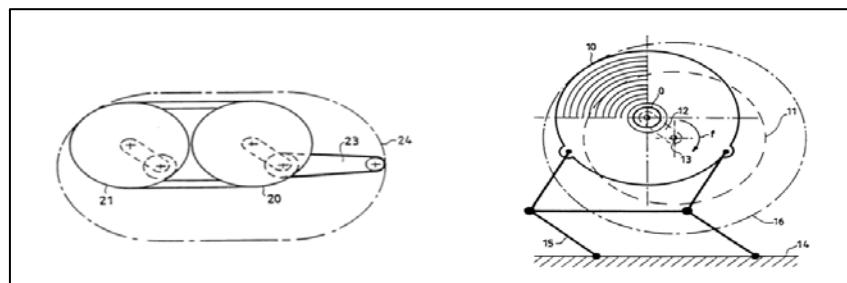


Figura A.6. Patente ES2006230516: ampliación de zonas de cocción. Inductor móvil durante el calentamiento.

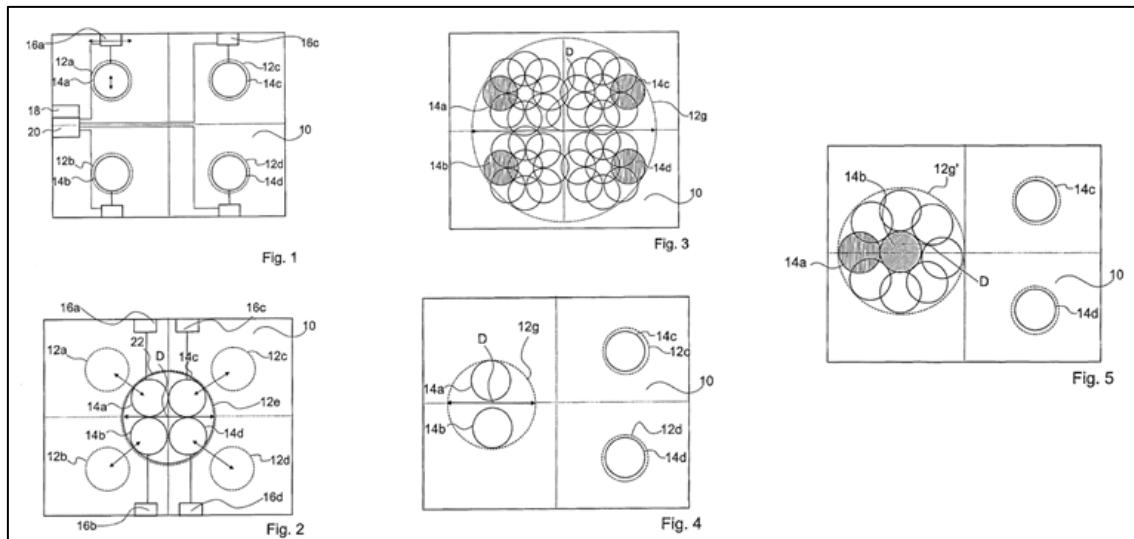


Figura A.7. Patente 2319031B1: múltiples inductores móviles. Colaboración para calentamiento en estático/movimiento del mismo puchero y calentamiento de varios pucheros con el mismo inductor.

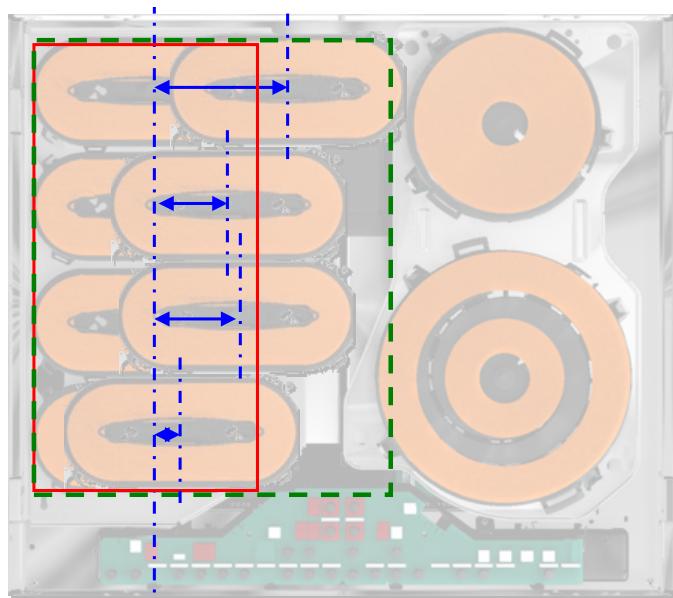


Figura A.8. Comunicado de invenciones. Inductores en 1D.

Anexo B. DIFERENTES SISTEMAS MOVIMIENTO PLANTEADOS

En este anexo se presentan todas las alternativas estudiadas durante el proyecto para la selección de la configuración estructural del sistema mecánico de movimiento. Se parte de unas ideas iniciales muy generales, que poco a poco se van desarrollando hasta llegar a la elección del mejor sistema mecánico de movimiento que sea capaz de cumplir con los objetivos marcados por BSH.

B.1. Bocetos iniciales

Consideraciones previas:

Restricciones iniciales determinadas por tamaño inductor:

1. Distancia recipientes-borde bastidor para que no exista choque.
2. Distancia entre recipientes para que no exista choque entre inductores.

Estas distancias se han de cumplir obligatoriamente si se quiere que el calentamiento se pueda llevar a cabo, en caso contrario, los inductores chocarían por el propio tamaño de estos.

Sentido de los ejes de coordenadas utilizado:

Sobre plano: $y \downarrow$ $x \rightarrow$

Perpendicular a plano: z

B.1.1 Mismo sistema mecánico para cada inductor

1) Barras desplazan sobre guías e inductores traslada sobre ellas

Resumen funcionamiento:

3 barras que se trasladan a lo ancho de la placa (eje y) por medio de raíles, y un inductor en cada barra que se traslada a lo largo de ella (eje x). Con estos dos movimientos de translación se consigue llegar a todos los puntos de la placa.

Ventajas:

- Se puede llegar a todos los puntos de la placa.
- Mecanismo no excesivamente complejo porque se ayuda de raíles.
- No genera excesivos problemas con los cables.

Inconvenientes:

- Que las barras que soportan los inductores sean muy gruesas, porque entonces existen zonas inaccesibles según configuraciones.
- En caso de estar dos recipientes alineados sobre el eje x de la placa, y uno de ellos necesitar órbita (cafetera + paellera) entonces se genera una zona inaccesible para el resto de los inductores, por lo que se tendría que ocupar un único inductor, con los problemas que ello genera.

2) Brazos telescópicos con rotación en su base

Resumen funcionamiento:

3 brazos telescópicos con un inductor al final de los mismos, y un movimiento de rotación en su base. Para una mejor distribución de los inductores, se colocarían 2 en las esquinas inferiores y uno centrado en la parte inferior de la placa..

Ventajas:

- Se puede llegar a todos los puntos de la placa.
- No genera excesivos problemas con los cables al ser un brazo recto.
- Aprovecha las esquinas y la parte inferior (zonas “muertas”) para la colocación de los motores.

Inconvenientes:

- Serían necesario 6 tramos (1 fijo + 5 móviles) de 9 cm cada uno para llegar al 100% de los puntos de la placa, por lo que haría falta que fuesen neumáticos (6 tramos con un motor eléctrico muy complejo)
- Los brazos telescópicos neumáticos son muy lentos en la recogida, por lo que el movimiento de órbita se vería muy afectado.

3) "Foco" en el centro con brazos telescopicos

Resumen funcionamiento:

3 brazos telescopicos con un inductor al final de los mismos, y un movimiento de rotación en su base. Los tres brazos parten de un punto central que a su vez también se puede rotar sobre sí mismo (el símil sería un tronco con 3 ramas).

Ventajas:

- Se puede llegar a la gran mayoría de los puntos de la placa.
- No existen interferencias entre ellos porque salen del mismo punto.
- Posibilidad de agrupar los motores muy juntos y ahorrar espacio.

Inconvenientes:

- Serían necesarios 5 tramos (1 fijo + 4 móviles) de 8 cm cada uno para llegar hasta las esquinas de la placa, por lo que haría falta que fuesen neumáticos (5 tramos con un motor eléctrico muy complejo)
- Los brazos telescopicos neumáticos son muy lentos en la recogida, por lo que el movimiento de órbita se vería muy afectado.
- Excesivos grados de libertad para conseguir llegar a determinadas configuraciones con varios recipientes, existen sistemas más eficientes con 2 grados de libertad.
- Se llegaría a todos los puntos de la placa excepto a la parte central, que estaría muy mal calentada, ya que en ella se encuentra el foco de donde salen los brazos telescopicos, por lo que habría que añadir otro inductor que saliese de otra zona (parte inferior) para cubrir el centro de la placa, y con 4 inductores se incrementarían los problemas de espacio.

4) Brazos robóticos

Resumen funcionamiento:

3 brazos articulados con un inductor al final de los mismos, y un movimiento de rotación en su base. Para una mejor distribución de los inductores, se colocarían cerca de los bordes de la placa. Hay que calcular el tamaño de cada brazo que garantice una flexibilidad del 100%.

Ventajas:

- Se puede llegar a todos los puntos de la placa.
- Aprovecha laterales (zonas “muertas”) para la colocación de los motores.

Inconvenientes:

- Si los dos motores están estáticos, el sistema de transmisión será muy complejo, y si uno de los motores está en movimiento, existirá mayor peso a mover (mayor inercia)
- Gran cantidad de partes móviles en el interior de la placa, lo que provoca problemas en caso de grandes recipientes (necesidad hacer órbita) o de un número de recipientes mayor que el número de inductores (habría que “abrir paso” a un inductor en movimiento apartándose y volviendo a su posición inicial)

Resumen mismo sistema mecánico para cada inductor:

Sistemas utilizan brazos telescopicos:

- Tienen que tener una longitud de tramo mínima de 9 cm (radio de inductor) para que se pueda calentar la parte más próxima a su inicio cuando el brazo está recogido, ya que esta parte no puede ser calentada por otro brazo porque chocarían.
- Tienen que tener una longitud total extendida mínima de 51 cm, lo que conlleva un brazo de 6 tramos (1 fija + 5 móviles), para lo que es necesario utilizar varios mecanismos si se quiere conseguir con un motor eléctrico, o en su defecto varios motores, lo que complica sobremanera el sistema.
- Con un motor eléctrico se puede hacer un brazo de 2 tramos (1 fijo y 1 móvil), por lo que no se pueden cumplir las dos restricciones (longitud tramo mínima y longitud extendida mínima)

- Si se quiere utilizar esta solución, mecánicamente solo es posible con brazos telescópico neumáticos/ hidráulicos, pero también tendrían problemas en el momento de recogerse (muy lentos) y con la temperatura interna.

Sistemas utilizan barras guiadas:

- Son los sistemas más sencillos constructivamente, ya que están compuestos por dos traslaciones.
- Está guiado por raíles, lo que tiene la ventaja de una mayor facilidad de movimiento (menos bruscos, con menor posibilidad de rotura)
- Un solo inductor llegaría a todos los puntos, pero son necesarios más inductores (con sus barras guiadas) para poder dar servicio a toda la placa en caso de muchos recipientes, lo que generaría interferencias entre ellas en determinadas configuraciones (varios recipientes en eje x)

Sistemas utilizan brazos robóticos:

- Se llega a todos los puntos de la placa con tres brazos.
- Es el sistema que otorga una mayor flexibilidad de movimiento, pero a su vez es el algoritmo de calentamiento más complejo al estar constituidas por varias partes móviles que pueden interferir entre sí.
- Al llevar un motor móvil o un motor estático con una transmisión muy compleja, es el que más problemas podría acarrear por posible rotura.

B.1.2 Diferente sistema mecánico para cada inductor

Barra guiada + brazos robóticos (R+R)

Resumen funcionamiento:

Barra que se trasladan a lo ancho de la placa (eje y) por medio de raíles, y un inductor en la barra que se traslada a lo largo de ella (eje x), más 2 brazos articulados en bordes de placa.

Ventajas:

- Se puede llegar a todos los puntos de la placa.
- Mecanismo no excesivamente complejo porque se ayuda de raíles en las barras, y dispone de dos brazos como máximo, que se pueden distribuir bien para evitar interferencias.

Inconvenientes:

- Los raíles de las barras más efectivos tienen que ser independientes (poner 2), ya que la guía de una barra no sirve para la otra. Se podría conseguir que las barras fuesen por los mismos raíles con movimiento independiente, pero el mecanismo sería mucho más complejo.
- El brazo articulado tiene que estar elevado respecto a las barras, que ya tiene que poder pasar por encima de estas en caso de que existan varios recipientes.

B.1.3 Conclusiones bocetos iniciales

- Se descartan los brazos telescopicos porque tiene grandes complicaciones frente las ventajas que ofrecen, y no se podrían cumplir todas las configuraciones posibles.
- Se descarta un sistema de sólo traslaciones porque aunque sería lo óptimo para un solo recipiente, no permite el calentamiento de varios recipientes en determinadas configuraciones.
- Lo ideal sería una combinación entre la sencillez de constructiva de las barras guiadas y la flexibilidad de los brazos robóticos.
- Por lo tanto, los sistemas que se tienen mejores características y se van a estudiar más en profundidad son:
 - Sistema de barra guiada y 2 brazos robóticos.
 - Sistemas de 3 brazos robóticos.

B.2. Sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos

B.2.1 Alternativas sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos

Existen varias alternativas posibles para este sistema mecánico de barra guiada + brazos robóticos, cuya elección dependería del sistema óptimo de calentamiento (un inductor se encargue de 2 recipientes o un inductor vaya a un recipiente) y de las propiedades mecánicas y de espacio. Para el movimiento de traslación se descartan las correas por el tema de la temperatura y se eligen los husillos

Configuraciones brazos robóticos

Para los diseños de las diferentes configuraciones de brazos robóticos que aparecen a continuación, se ha representado el mismo sistema de traslación en todos ellos para facilitar su comparación.

- Alternativa 1:

Un motor en cada unión, entre brazos (móvil) y entre bastidor-brazo inicial (fijo), este último motor en posición vertical, atacando directamente el primer brazo.

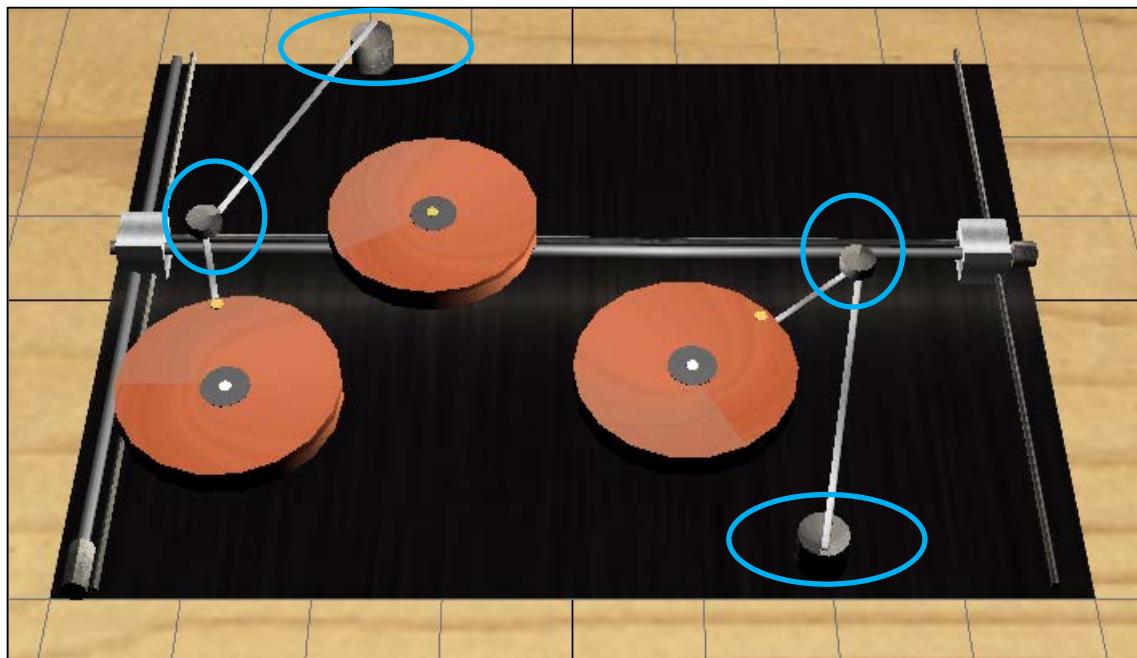


Figura B.1. Alternativa 1 para brazos robóticos.

- Alternativa 2:

Motor en brazo con doble eje. Los dos motores fijos en el bastidor, y a través de un sistema de engranajes y correas/cadenas, se transite el movimiento al segundo brazo.

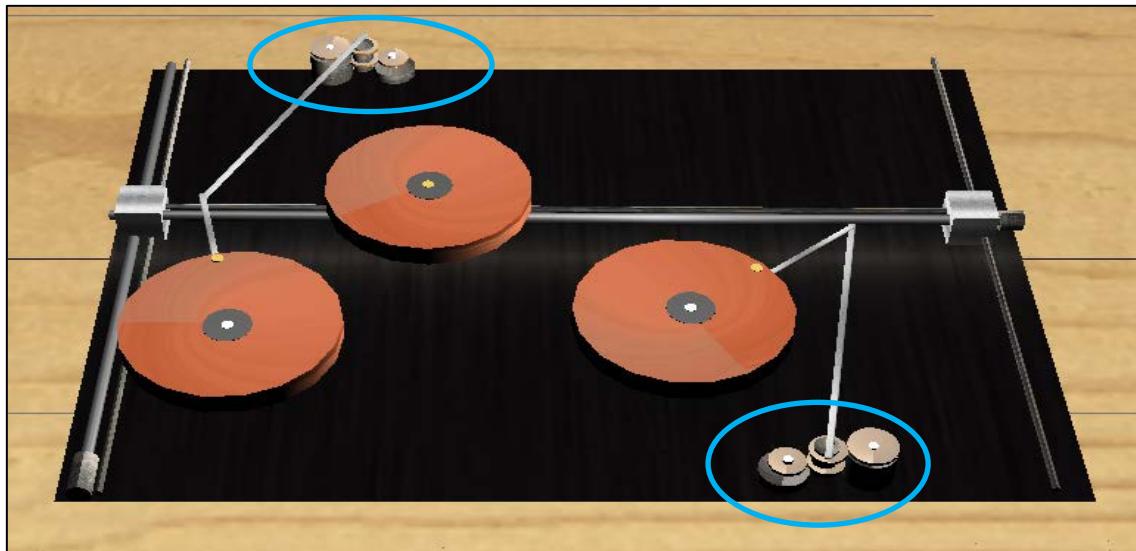


Figura B.2. Alternativa 2 para brazos robóticos.

- Alternativa 3:

Un motor en cada unión, entre brazos (móvil) y entre bastidor-brazo inicial (fijo), este último motor en posición horizontal (hará falta piñón-corona)

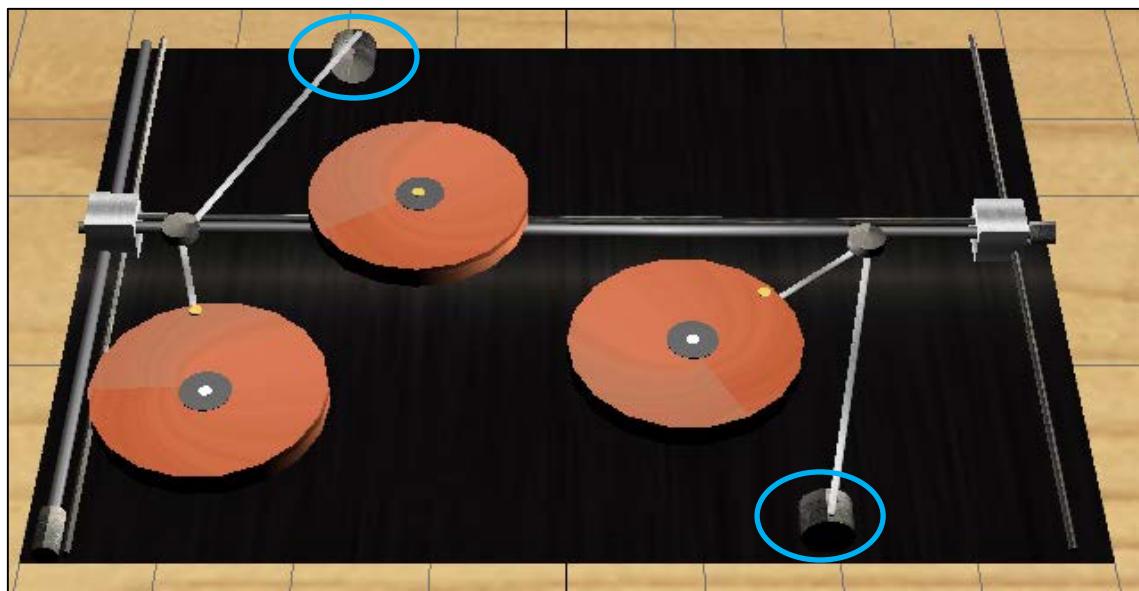


Figura B.3. Alternativa 3 para brazos robóticos.

Configuraciones traslaciones

Lo primero que hay que elegir para el sistema de translación es el mecanismo encargado de producir un movimiento lineal, ya que hay que mover un inductor y su soporte en la dirección y, y a la vez el inductor se tiene que trasladar sobre su soporte en la dirección x.

Anteriormente se descartaron todos los sistemas hidráulicos y neumáticos porque generaban grandes problemas por su tamaño y por la temperatura que se iba a crear en el interior de la placa. Por lo tanto quedan los siguientes sistemas de actuación, que se van a analizar con sus ventajas e inconvenientes:

	Ventajas	Inconvenientes
Cremalleras	Resistencia temperatura	Necesita mantenimiento Ruidosa
Cadenas	Variedad de materiales	Ruidosa Necesita lubricación
Correas	Silencioso Mecanismo sencillo Compatibilidad materiales y poleas	Temperatura Cambio propiedades con el tiempo
Husillos	Materiales resistentes T° Silencioso a bajas velocidades Pocos componentes	Possible desgaste Crítico a tolerancias de montaje
Motores lineales	Actúa directamente	Precio elevado Problemas a altas temperaturas Control complejo

Tabla B-1. Diferentes sistemas de actuación para movimiento de translación.

Según la tabla anterior, se descartan los mecanismos de cadena y de cremallera por la necesidad que tienen de mantenimiento (lubricación), los motores lineales por su alto precio y dificultad para el control, y las correas por sus problemas con la temperatura. Por lo tanto, el sistema de actuación elegido es el husillo.

Para los diseños de las diferentes configuraciones de los sistemas de traslación que aparecen a continuación, se ha representado el mismo sistema de brazos robóticos en todos ellos para facilitar su comparación. Para el movimiento del inductor sobre la barra portainductor, siempre se considerará un husillo.

- Alternativa 1:

Husillo en un lateral y guía en el otro lateral.

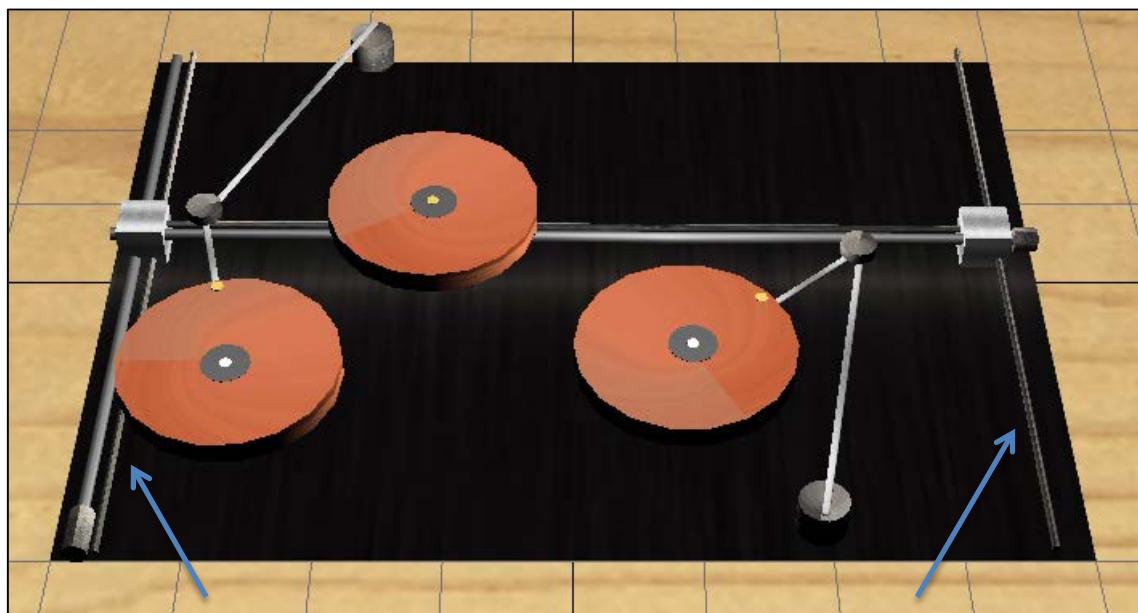


Figura B.4. Alternativa 1 para movimiento de traslación.

- Alternativa 2:

Husillo en un lateral y raíl con ruedas de teflón en el otro lateral.

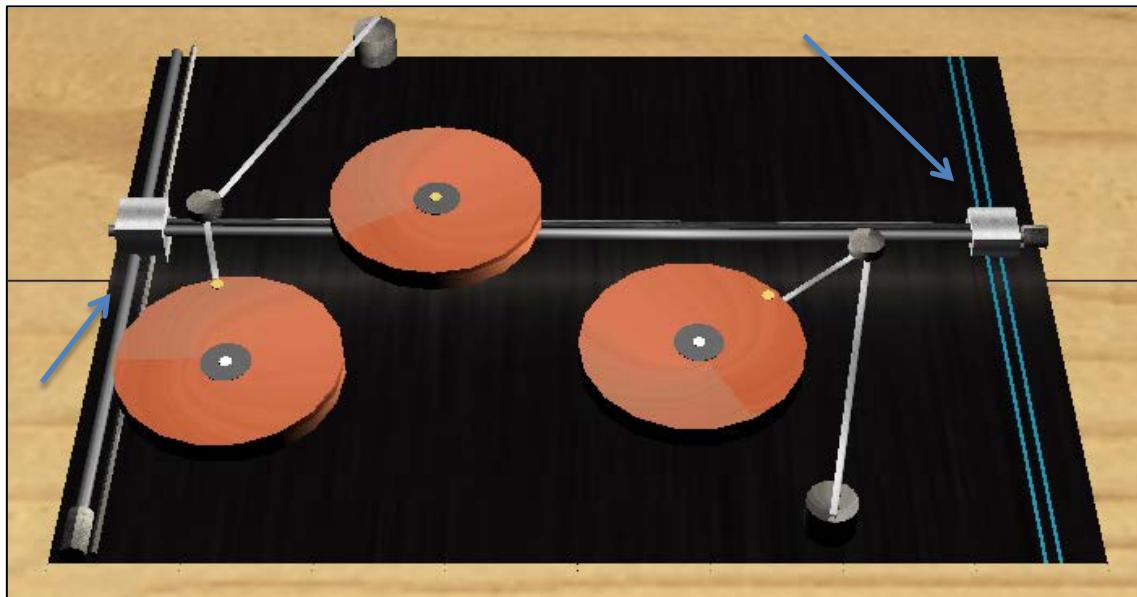


Figura B.5. Alternativa 2 para movimiento de traslación.

- Alternativa 3:

Husillo en el centro y guías a los laterales.

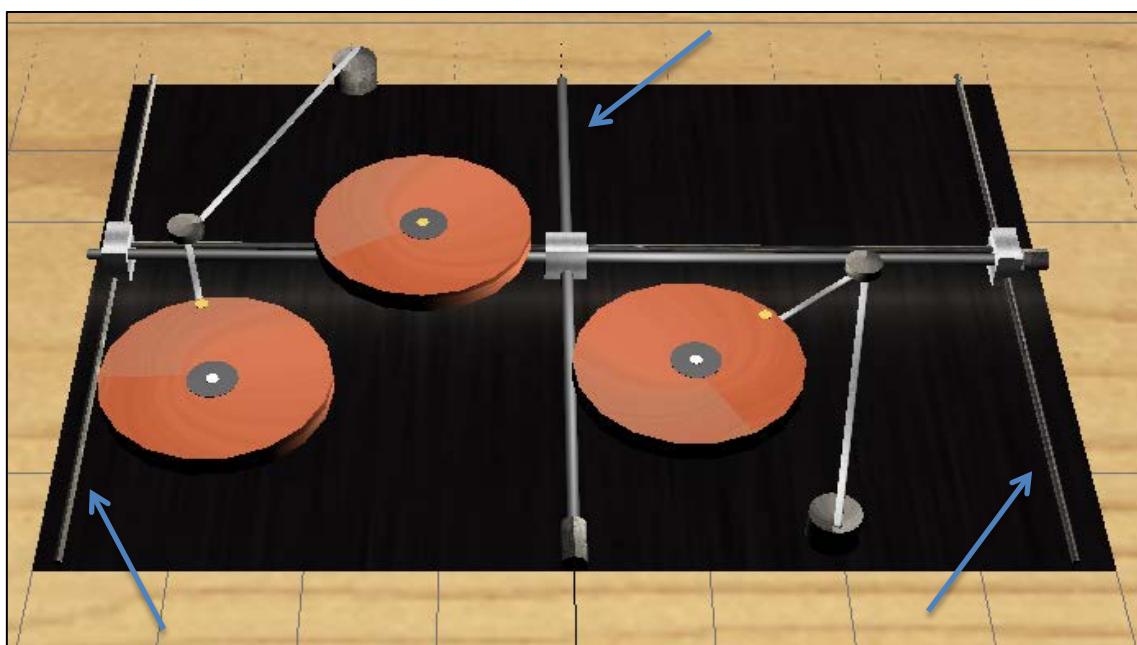


Figura B.6. Alternativa 3 para movimiento de traslación.

- Alternativa 4:

Un husillo en cada lateral (con un motor en cada husillo).

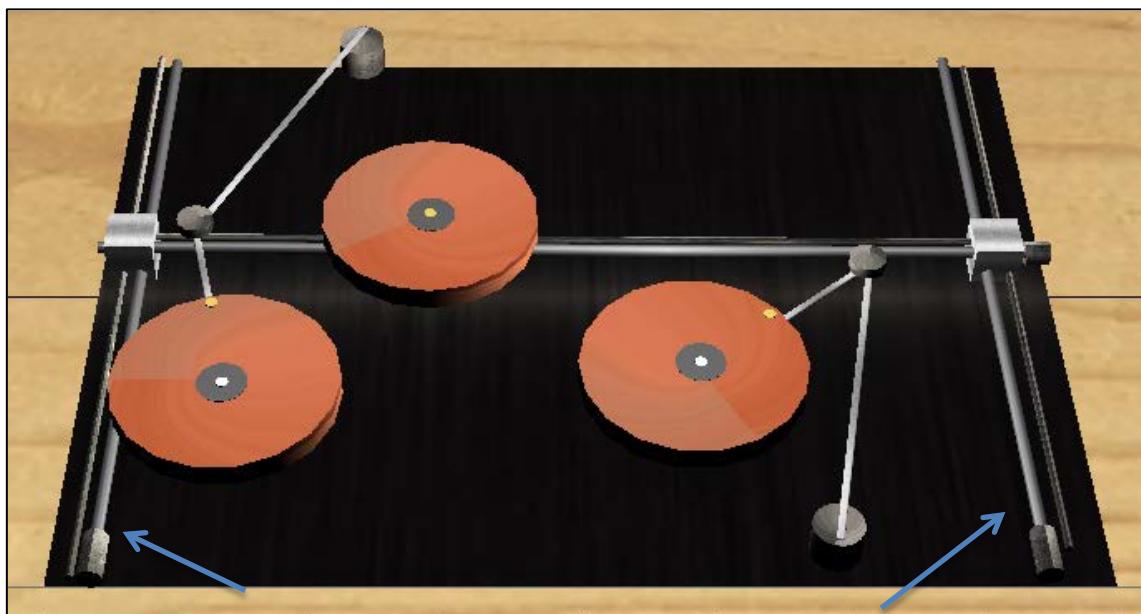


Figura B.7. Alternativa 4 para movimiento de traslación.

- Alternativa 5:

Un husillo en cada lateral (sólo un husillo con motor) y correa para transmitir movimiento.

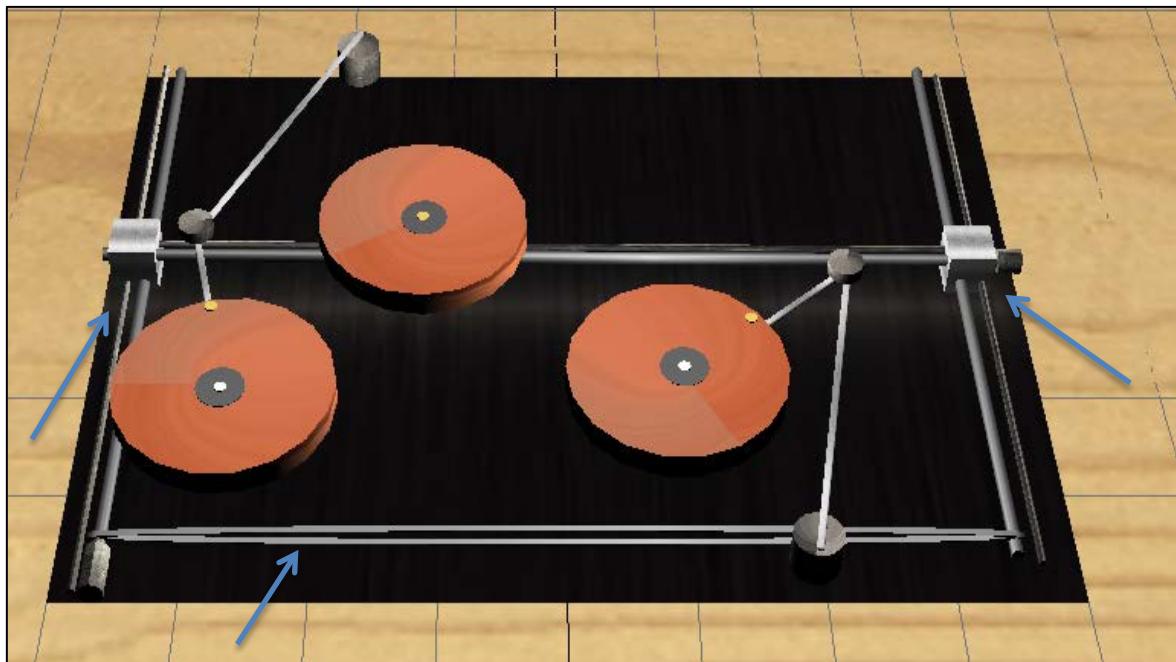


Figura B.8. Alternativa 5 para movimiento de traslación.

Elección configuración más óptima

El método de selección que se consideró apropiado para elegir las alternativas de diseño, fue el “Método Pugh”. La aplicación del “Método Pugh” se describe en cuatro pasos aplicados sobre los criterios que considere el diseñador. Los pasos para aplicar este método son los siguientes:

- 1) Se asigna un valor puntual a cada Criterio de Diseño, considerando la importancia que tenga sobre los demás parámetros. La escala seleccionada está comprendida entre dos valores, y representa el grado de importancia.
- 2) Las alternativas de diseño se evalúan con respecto a cada uno de los criterios, asignándose mayor cantidad de valores positivos (+), hasta un máximo de tres (3), a aquellos que presenten características favorables, los valores negativos (-), hasta un máximo de tres (3), se asignan a aquellos diseños poco aceptables y cero (0) a aquellos que se consideren como neutros.
- 3) Luego de evaluar cada alternativa, se realiza la sumatoria de los valores positivos, negativos y neutros que fueron asignados a cada alternativa, previamente multiplicados por el factor de importancia del criterio.
- 4) Una vez realizada la sumatoria, se selecciona la alternativa que presente el mayor resultado positivo.

CRITERIO DE DISEÑO	VALOR	ALTERNATIVA Nº 1	ALTERNATIVA Nº 2	ALTERNATIVA Nº 3
Volumen	5	--	++	--
Precio	3	++	+	++
Facilidad movimiento	4	+	-	+
Resistencia T ^a	4	+	+	+
Facilidad Montaje	2	+	-	0
Flexibilidad	5	+++	+++	+++
Mantenimiento	3	++	+	++
Duración	3	++	+	++
Nº piezas necesarias	3	+	---	-
+		46	38	41
-		10	15	13
Resultados		36	23	28

Tabla B-2. Método de Pugh para rotaciones (brazos robóticos).

CRITERIO DE DISEÑO	VALOR	ALTERNATIVA Nº 1	ALTERNATIVA Nº 2	ALTERNATIVA Nº 3	ALTERNATIVA Nº 4	ALTERNATIVA Nº 5
Volumen	5	+	+	-	+	+
Precio	3	++	++	+	-	-
Facilidad movimiento	4	-	-	-	+++	++
Resistencia T ^a	4	+	+	+	+	-
Facilidad Montaje	2	+	+	+	+	0
Flexibilidad	5	+++	+++	+++	+++	++
Mantenimiento	3	+	+	+	+	+
Duración	3	+	+	+	+	+
Nº piezas necesarias	3	+	-	+	-	0
+ -	41 - 4	38 7	33 9	44 9	34 7	27
Resultados	37	31	24	35	34	

Tabla B-3. Método de Pugh para traslación (husillos).

Alternativa seleccionada como sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos:

- Para rotación: alternativa Nº1, un motor en cada unión, entre brazos (móvil) y entre bastidor-brazo inicial (fijo), este último motor en posición vertical, atacando directamente el primer brazo.
- Para translación: alternativa Nº1, husillo en un lateral y guía en el otro.

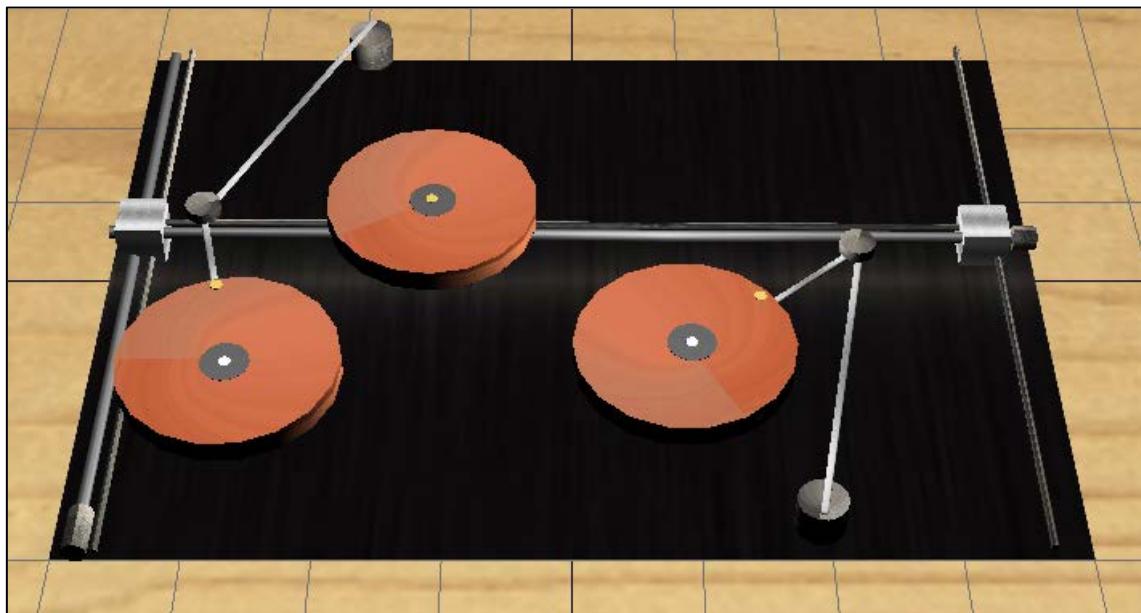


Figura B.9. Alternativa seleccionada (Sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos).

B.2.2 Modelado matemático sistema traslación

Geometría y acciones del sistema de traslaciones

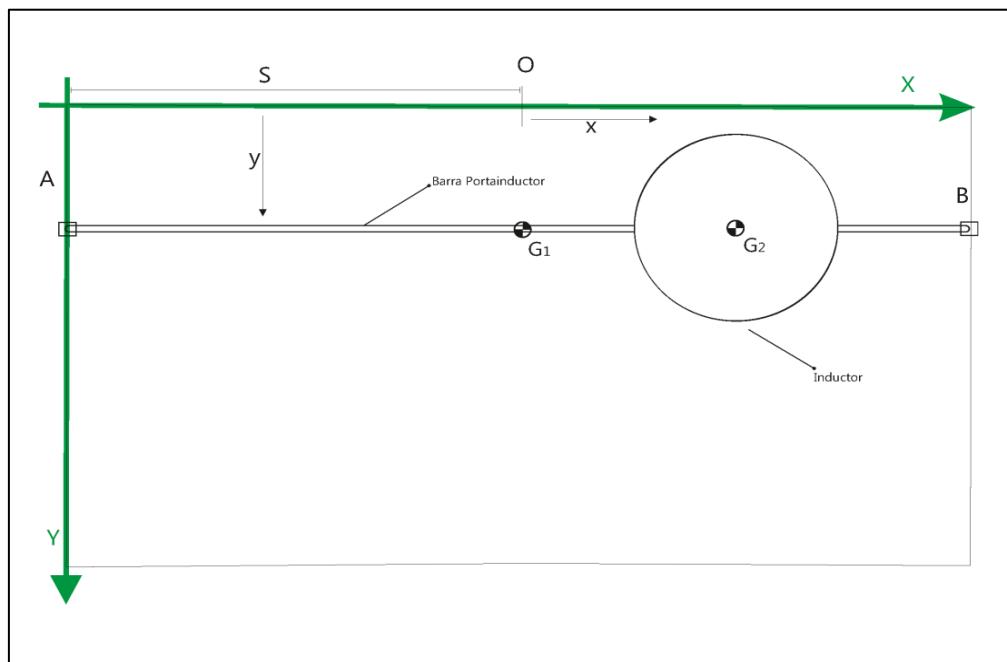


Figura B.10. Parámetros geométricos y coordenadas independientes para estudio del movimiento de traslación.

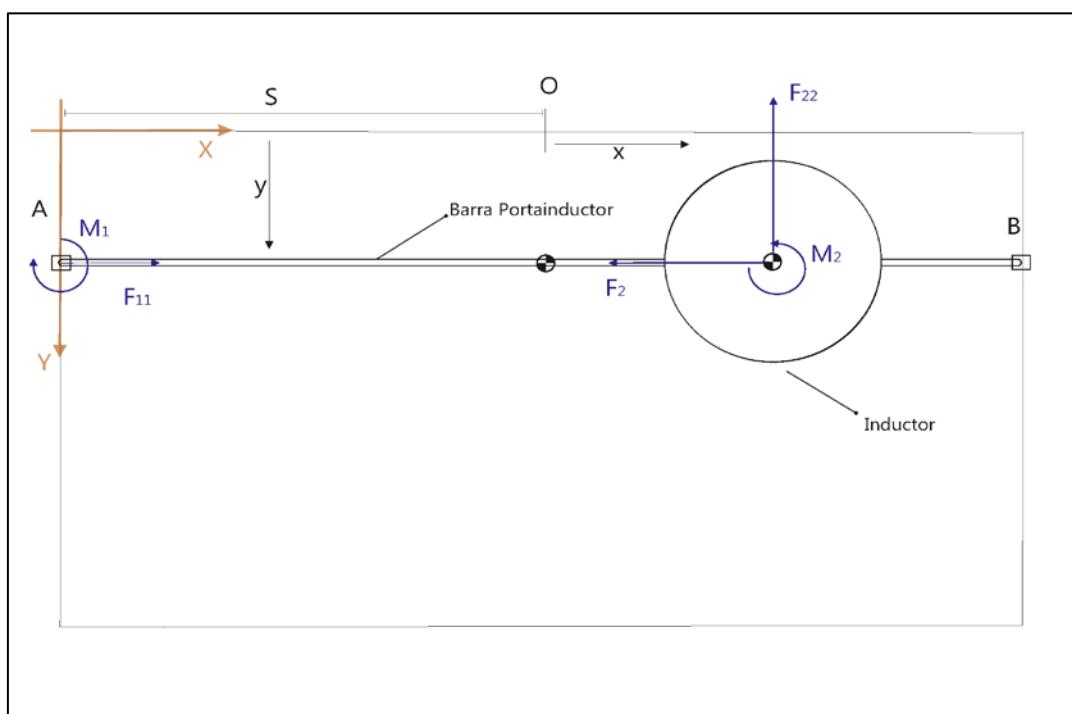


Figura B.11. Acciones verdaderas sobre barra portainductor.

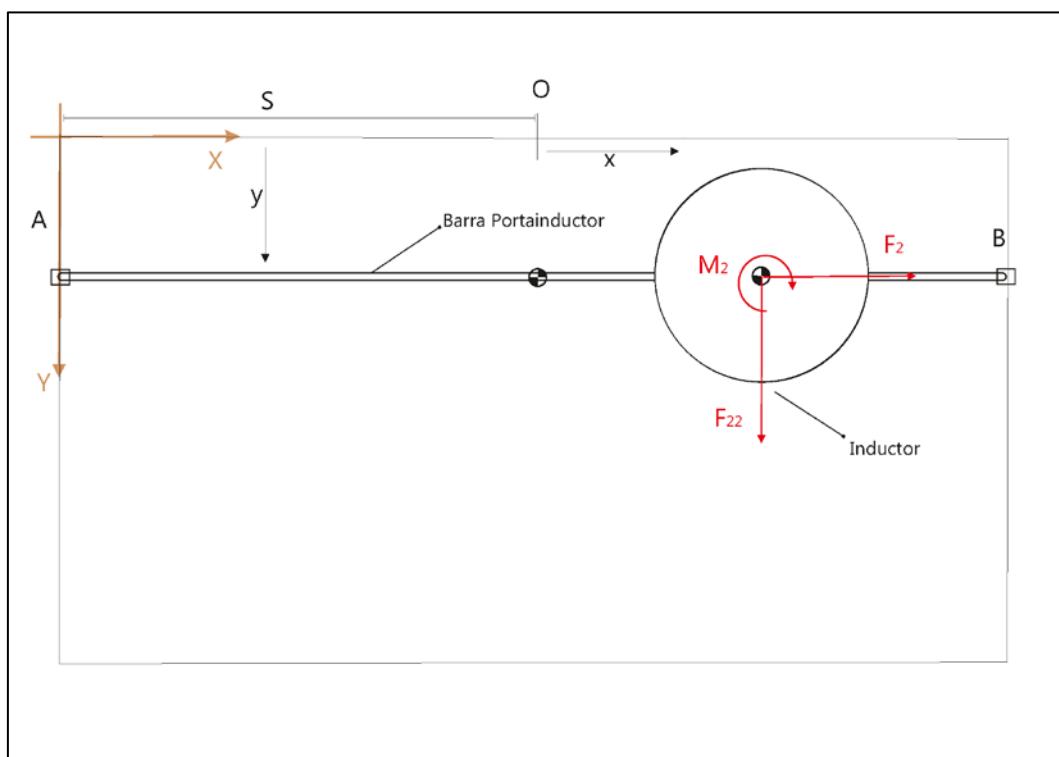


Figura B.12. Acciones verdaderas sobre inductor.

Ecuaciones

- Velocidades generalizadas puntos posición (A, G_2):

$$\begin{aligned} \bullet \quad \{\bar{V}_{abs}(A)\} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{y} \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \bullet \quad \{\bar{V}_{abs}(G_2)\} &= \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

- Aceleración absoluta puntos posición (A , G_2):

$$\blacksquare \quad \{\bar{\gamma}_{abs}(A)\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \ddot{y} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\blacksquare \quad \{\bar{\gamma}_{abs}(G_2)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

- Aplicando los Teoremas Vectoriales a cada sólido:

- $\sum_{Si} F_{ext}(P_i) = m_i \{\bar{\gamma}_{abs}(G_i)\}$, con $\sum_{Si} F_{ext}(P_i)$: fuerzas verdaderas actuantes sobre el sólido i.
- $\sum \overline{M}_{ext}(A) - \overline{AG}_1 \wedge m \bar{\gamma}_{abs}(A) = 0$ para el husillo.
- $\sum \overline{M}_{ext}(G_2) = 0$ para el inductor.

El resultado final es un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden de 7 ecuaciones con 7 incógnitas:

$$F_{11} - F_2 = 0$$

$$F_1 - F_{22} = m_h \ddot{y}$$

$$F_2 = m_i \ddot{x}, \text{ ecuación de movimiento para } x$$

$$F_{22} = m_i \ddot{y}$$

$$F_{11} = m_i \ddot{x}$$

$$F_1 = (m_h + m_i) \ddot{y}, \text{ ecuación de movimiento para } y$$

$$M_1 = s(m_h + m_i) \ddot{y} + xm_i \ddot{y}$$

B.3. Elección de sistema mecánico de movimiento para prototipo

Aplicando el “Método de Pugh”, se asignó primero un valor entre el 1 y el 5 a cada criterio de diseño, para posteriormente evaluar cada alternativa según cada uno de los criterios (Tabla B-4). El resultado obtenido indica que el mejor sistema mecánico de movimiento que se ajusta a los criterios definidos por BSH, es el formado por 3 brazos robóticos (R+R).

CRITERIO DE DISEÑO	VALOR	SISTEMA BARRA + BRAZOS ARTICULADOS	SISTEMA BRAZOS ARTICULADOS
Volumen	5	---	-
Precio	3	+	++
Facilidad movimiento	4	+	++
Resistencia T ^a	4	+	+
Facilidad Montaje	2	-	+
Flexibilidad	5	+++	+++
Mantenimiento	3	++	++
Duración	3	++	++
Nº piezas necesarias	3	-	+
+		38	50
-		20	5
Resultados	18		45

Tabla B-4. Selección entre sistema de barra guiada con 2 brazos robóticos, y sistema de 3 brazos robóticos.

Anexo C. SISTEMA ELEGIDO PARA PROTOTIPO (R+R)

C.1. Elección previa de material

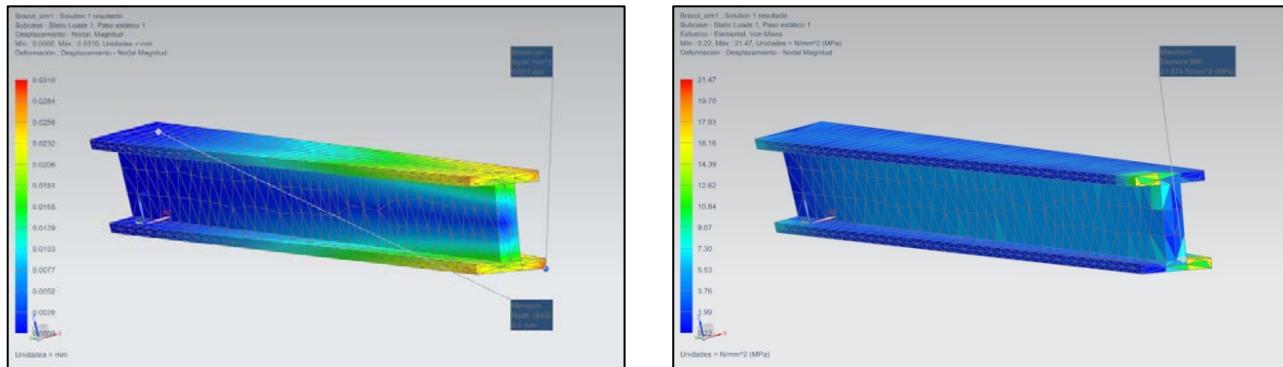


Figura C.1. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección I (Acero).

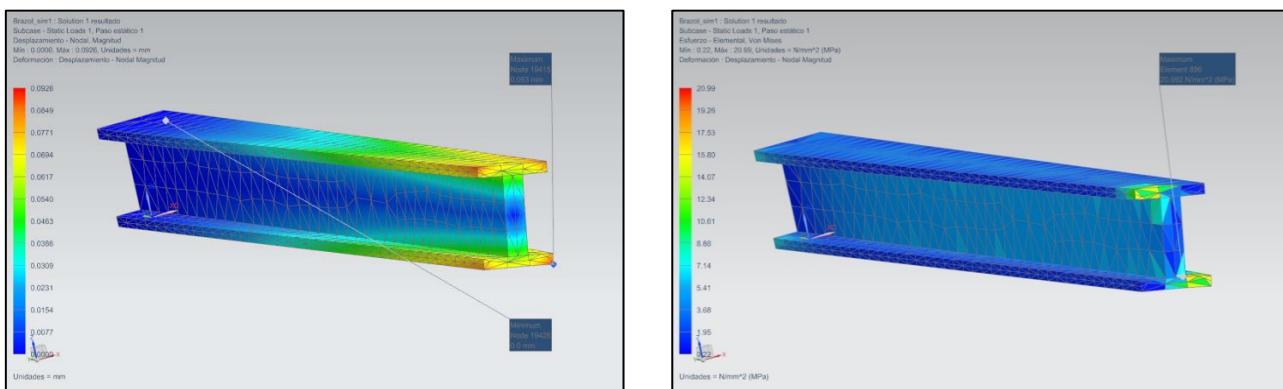


Figura C.3. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección I (Aluminio).

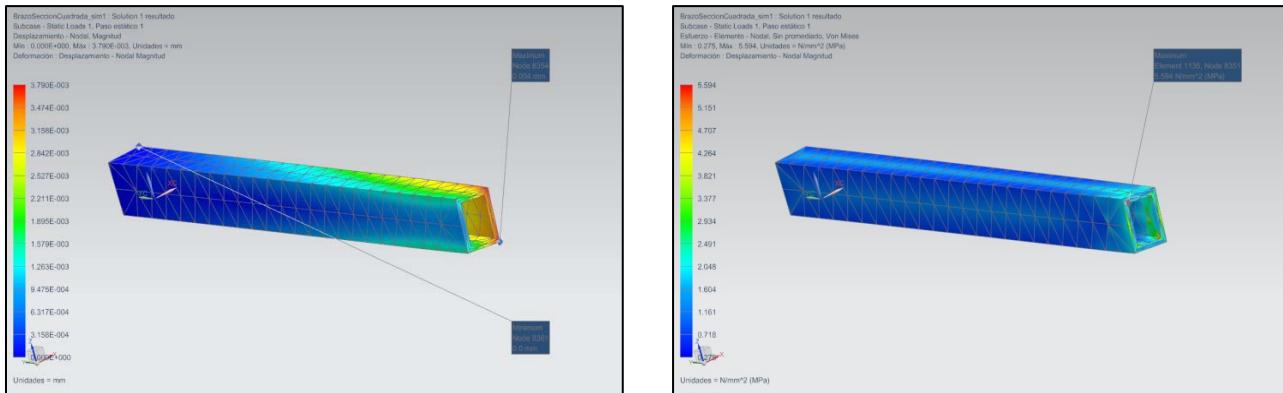


Figura C.2. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección perfil delgado (Acero).

Anexo C

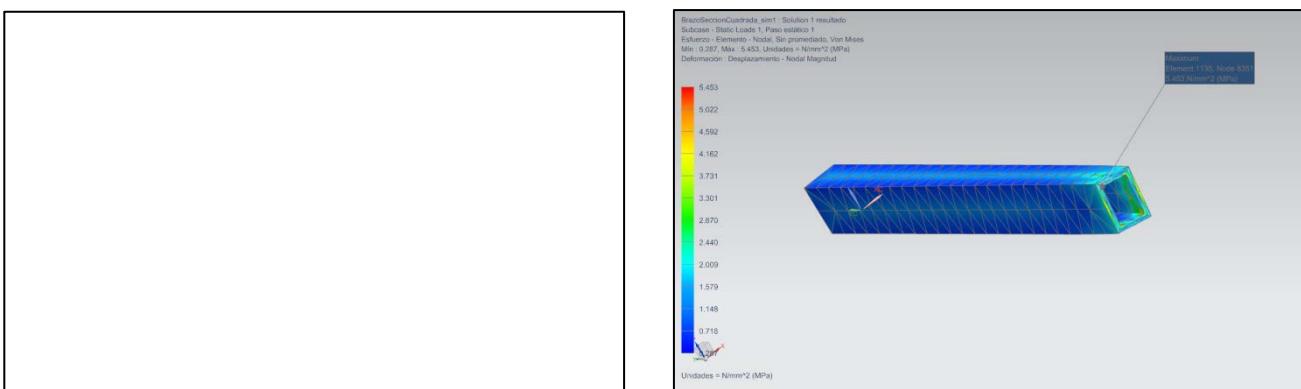


Figura C.4. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección perfil delgado (Aluminio).

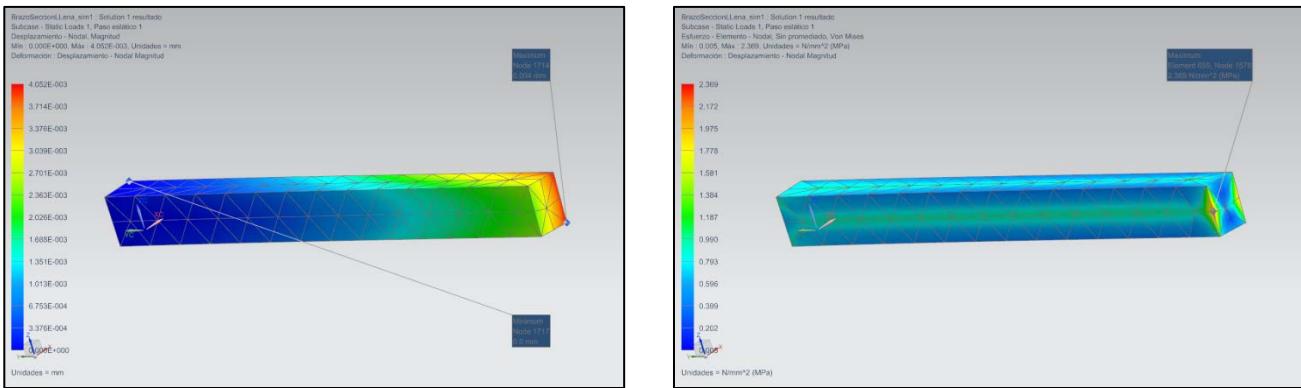


Figura C.5. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección maciza (Acero).

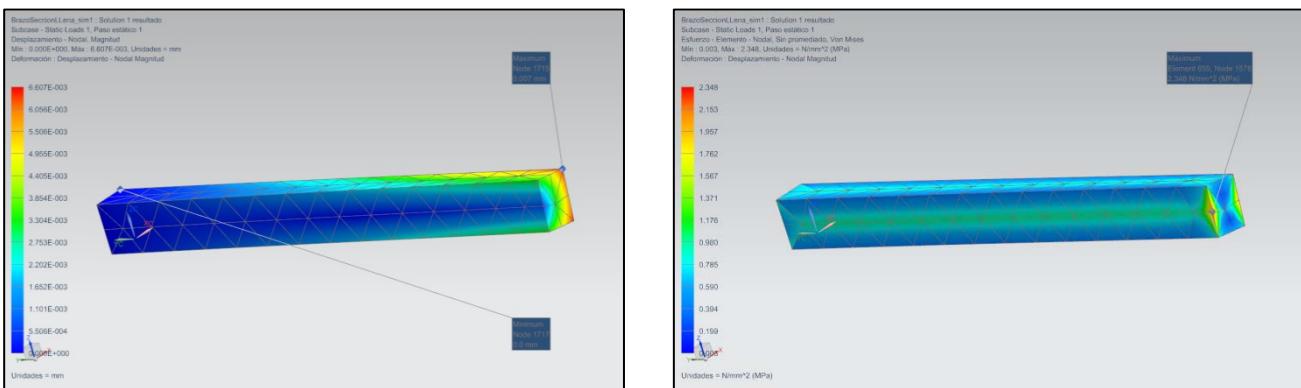


Figura C.6. Desplazamientos y tensión Von Mises torsor, sección maciza (Aluminio).

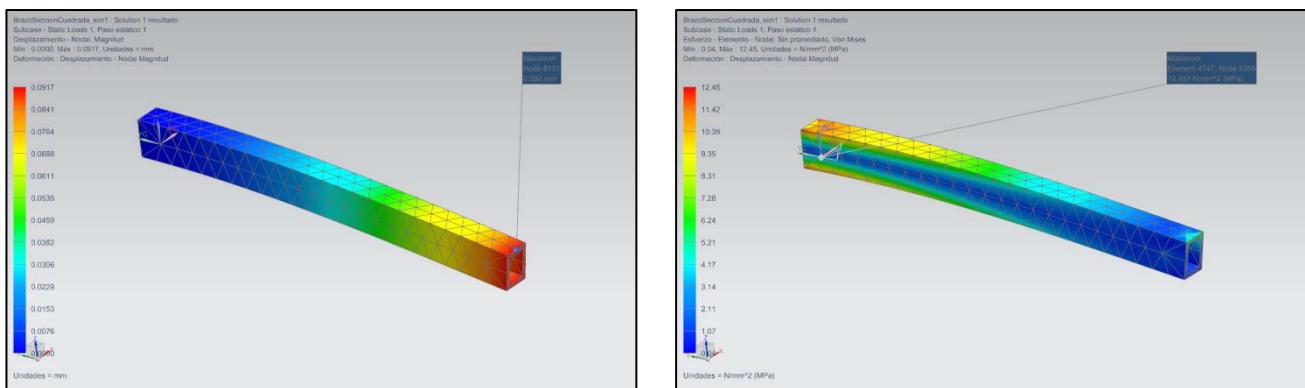


Figura C.7. Desplazamientos y tensión Von Mises flector, sección perfil delgado (Acero).

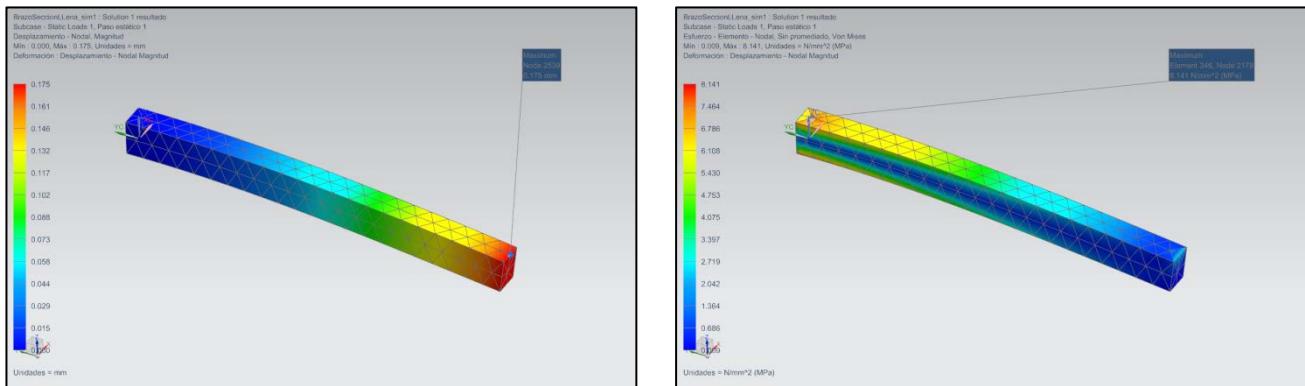


Figura C.8. Desplazamientos y tensión Von Mises flector, sección maciza (Aluminio).

C.2. Cálculo de motores

C.2.1 Código de Matlab para cálculo de motores

```
%% Función que define el círculo que alcanza 11 + 12

function [A,B]=circulo (a,b,D)
n = 100; k=0:n; fi=2*pi*k/n;
A=a+D/2*cos(fi); B=b+D/2*sin(fi);

*****
function [fitresult, gof] = createFit(t, a1)

%% CREATEFIT(T,A1) Create a fit.
%
% Data for 'untitled fit 1' fit:
%   X Input : t
%   Y Output: a1
% Output:
%   fitresult : a fit object representing the fit.
%   gof : structure with goodness-of fit info.
%
% See also FIT, CFIT, SFIT.
% Auto-generated by MATLAB on 12-Jul-2012 12:10:48

%% Fit: 'untitled fit 1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( t, a1 );

% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'poly9' );
opts = fitoptions( ft );
opts.Lower = [-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf];
opts.Upper = [Inf Inf Inf Inf Inf Inf Inf Inf Inf];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
```

```

%%Función que crea un vector con crecimiento geométrico desde el
inicio hasta la mitad de la distancia objetivo y con decrecimiento
desde la mitad hasta el final de la distancia objetivo.

function A=traye2ri(x1,y1,x2,y2)

DT=sqrt((x1-x2)^2+(y1-y2)^2)
%D1=0.05*DT;
%D2=DT-D1;

x(1)=x1;
y(1)=y1;
alfal=atan(norm(y1-y2)/norm(x1-x2))

n=101;
r=1.045;
a1=DT*(r-1)/(r^n-1);

it=[1:101];
pti=a1*r.^ (it-1);
ptii=pti(101:-1:1); % Se invierten valores vector

for i=2:101
    if i<52
        pt=pti(2*i-1);
    else
        pt=ptii(2*(i-51));
    end
    % pt=a1*r^(i-1);

    if x1>x2
        ptcl=-pt*cos(alfal);
    else
        ptcl=pt*cos(alfal);
    end
    a=(y1-y2)/(x1-x2);
    b=y1-a*x1;
    x(i)=x(i-1)+ptcl;
    y(i)=a*x(i)+b;
    if(sqrt(((x(i)-x1)^2+(y(i)-y1)^2))>=DT
        x(i)=x2;
        y(i)=y2;
    end
end

A=[x;y]'; % Traspuesta A
x1
y1
x2
y2

end
*****

```

```
%%Función para calcular las fuerzas y momentos en los brazos, se  
ensayarán diversas trayectorias circulares que se deberán de realizar  
en un tiempo determinado

clear all
close all

l1= 0.21; % Longitud brazo1 (constante)
r1=0.005; % Anchura brazo 1 (constante)
l2= 0.16; % Longitud brazo2, suponiendo que llega a centro inductor  
(cte)
r2=0.005; % Anchura brazo 2 (constante)
rho=2700; % Densidad aluminio

A1=0.005^2;

A2=0.005^2;

m1=rho*l1*A1; % Masa brazo1 (constante)
m2b=rho*(l2-0.09)*A2; % Masa brazo 2 (constante)
m2i=0.407+0.32265; %Masa inductor más masa placa aluminio
m2=m2b+m2i; % Masa sólido 2 (constante)
a1= (l1/2); % Distancia desde inicio brazo1 hasta su cdm (constante)
a2=((l2-0.09)/2*m2b+l2*m2i)/m2; % Distancia desde inicio sólido 2  
hasta cdm (constante)
mm2=0.25; % Masa carcasa del motor 2 (motor móvil)
rm2=0.2; % Radio motor 2

Igm2=0.005;
Ig1=2.3377e-04;
I0=0.0170;
Ig2b=3.112e-04;
Ig2i=0,03;
Ig2=0.0041;

xa=0.30; % Anclaje en x
ya=0.04; % Anclaje en y

[X1 Y1]=circulo(xa,ya,2*(l1+l2)); % Traza círculo
DT=xa+l1+l2; % Distancia máxima que alcanza el círculo en eje x
PT=DT/9;
X=0;
L=1;
figure( 'Name' , 'Simulación movimiento' );
hplot=plot(X1,Y1,'-')
axis ([0 0.80 0 0.60]) % Se supone placa de 0.80x0.60
axis equal % Ajusta proporciones ejes
axis manual
T=6; % Tiempo total en segundos de la simulación
t=[0:0.01:1]; % De 0 a 1 con incrementos de 0.01 (101 puntos)
t=t*T;
it=T/100; % Incremento de tiempo

while X<=DT
Y=ya+sqrt((l1+l2)^2-(xa-X)^2);
A=traye2ri(xa,0.09,X,Y);

for i=1:101 % Resuelvo ecuaciones de posición
```

```

a=A(i,1)-xa;
b=A(i,2)-ya;
alfa=asin((l2^2-a^2-b^2-l1^2)/(-2*l1*sqrt(a^2+b^2)))-atan2(a,b);

alfal(i)=alfa;

gamma(i)=atan2(b,a);
alfa2(i)=2*gamma(i)-alfal(i);

beta1(i)=acos((a-l1*cos(alfal(i)))/(l2));
beta2(i)=acos((a-l1*cos(alfa2(i)))/(l2));

% Comprobación están bien elegidos ángulos, se hace valor
absoluto
if norm(l1*sin(alfal(i))+l2*sin(beta1(i))-b)>0.001

    beta1(i)=2*pi()-beta1(i);

end

if norm(l1*sin(alfa2(i))+l2*sin(beta2(i))-b)>0.001

    beta2(i)=2*pi()-beta2(i);

end

hold on
h1=plot([xa xa+l1*cos(alfal(i))
xa+l1*cos(alfal(i))+l2*cos(beta1(i))],[ya ya+l1*sin(alfal(i))
ya+l1*sin(alfal(i))+l2*sin(beta1(i))]);
h2=plot([xa xa+l1*cos(alfa2(i))
xa+l1*cos(alfa2(i))+l2*cos(beta2(i))],[ya ya+l1*sin(alfa2(i))
ya+l1*sin(alfa2(i))+l2*sin(beta2(i))]);

pause(0.03) % Para ver mejor movimiento brazos
delete(h1,h2)

end

% Para referenciar misma nomenclatura que ecuación de movimiento!

for i=1:101

    alfal(i)=pi()/2-alfal(i);
    beta1(i)=pi()/2-beta1(i)-alfal(i);

end

[fitalf, gofalf] = createFit(t, alfa1); % Cambio inf. discreta a
contínua
[alfalp,alfalpp] = differentiate(fitalf,t);
[fitbet, gofalf] = createFit(t, beta1);
[betalp,betalpp] = differentiate(fitbet,t);

```

```

for i=1:101

% Fuerza enlace en A según 1' ejercida por S1 sobre S2
f1_prima(i) = m2*((alfalpp(i)+beta1pp(i))*a2) +
(alfalpp(i)*l1*cos(beta1(i))) + (((alfalpp(i))^2)*l1*sin(beta1(i))];

% Fuerza enlace en A según 2' ejercida por S1 sobre S2
f2_prima(i) = m2*(-1*(alfalp(i)+beta1p(i))^2*a2) +
(alfalpp(i)*l1*sin(beta1(i))) - (((alfalp(i))^2)*l1*cos(beta1(i))];

% Fuerza enlace en O según 1 ejercida por motor 1 sobre S1
f1(i)= (m1*alfalpp(i)*a1) +
m2*((alfalpp(i)+beta1pp(i))*a2*cos(beta1(i))) -
(((alfalp(i)+beta1p(i))^2)*a2*sin(beta1(i))) + ((alfalpp(i))*l1);

% Fuerza enlace en O según 2 ejercida por motor 1 sobre S1
f2(i)= (-m1*(alfalp(i)^2)*a1) -
m2*((alfalpp(i)+beta1pp(i))*a2*sin(beta1(i))) -
(((alfalp(i)+beta1p(i))^2)*a2*cos(beta1(i))) + ((alfalp(i)^2)*l1);

% Par necesario del motor 2
par2(i)= m2*a2*((alfalpp(i)*l1*cos(beta1(i))) +
((alfalp(i))^2)*l1*sin(beta1(i))] +
(Ig2+m2*a2^2)*(alfalpp(i)+beta1pp(i));

% Par necesario del motor 1
par1(i)= (I0*alfalpp(i)) + par2(i) +
m2*l1*((alfalpp(i)+beta1pp(i))*a2*cos(beta1(i))) -
(((alfalp(i)+beta1p(i))^2)*a2*sin(beta1(i))) + (alfalpp(i)*l1)];

end

% Almaceno en matriz 3D (10x6x101) todas las soluciones

Rest(L,1,:)=alfa1;
Rest(L,2,:)=alfa1p;
Rest(L,3,:)=alfa1pp;
Rest(L,4,:)=beta1;
Rest(L,5,:)=beta1p;
Rest(L,6,:)=beta1pp;

FF(L,1,:)=f1_prima;
FF(L,2,:)=f2_prima;
FF(L,3,:)=f1;
FF(L,4,:)=f2;
FF(L,5,:)=par1;
FF(L,6,:)=par2;

L=L+1;

X=X+PT; % Actualizo X

end % Fin del While

```

```

% Fuerza máxima prima 1
for i=1:10
[mf1p(i) nf1p(i)]=max(abs(FF(i,1,:)))
end
[mf1p nf1p]=max(mf1p)
Lf1p=nf1p

% Fuerza máxima prima 2
for i=1:10
[mf2p(i) nf2p(i)]=max(abs(FF(i,2,:)))
end
[mf2p nf2p]=max(mf2p)
Lf2p=nf2p

% Fuerza máxima 1
for i=1:10
[mf1(i) nf1(i)]=max(abs(FF(i,3,:)))
end
[mf1 nf1]=max(mf1)
Lf1=nf1

% Fuerza máxima 2
for i=1:10
[mf2(i) nf2(i)]=max(abs(FF(i,4,:)))
end
[mf2 nf2]=max(mf2)
Lf2=nf2

% Par máximo 1
for i=1:10
[mp1(i) np1(i)]=max(abs(FF(i,5,:)))
end
[mp1 np1]=max(mp1)
Lp1=np1

% Par máximo 2
for i=1:10
[mp2(i) np2(i)]=max(abs(FF(i,6,:)))
end
[mp2 np2]=max(mp2)
Lp2=np2

aa1(1:101)=ResT(1,1,:);
aa1p(1:101)=ResT(1,2,:);
aa1pp(1:101)=ResT(1,3,:);
f1p(1:101)=FF(Lf1p,1,:);
f2p(1:101)=FF(Lf2p,2,:);
f1(1:101)=FF(Lf1,3,:);
f2(1:101)=FF(Lf2,4,:);
p1(1:101)=FF(Lp1,5,:);
p2(1:101)=FF(Lp2,6,:);

%Axis equal
%Axis manual
figure( 'Name', 'Alfa' );
ha=plot(t,aa1);
legend( ha, 'alfa vs. t', 'Alfa', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'alfa' );

```

```
% Label axes
figure( 'Name', 'Derivada de Alfa' );
hap=plot(t,aa1p);
legend( hap, 'Derivada de alfa vs. t', 'Derivada de Alfa', 'Location',
'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'Derivada de alfa' );

% Label axes
figure( 'Name', 'Derivada segunda de Alfa' );
happ=plot(t,aa1pp);
legend( happ, 'Derivada segunda de alfa vs. t', 'Derivada segunda de
Alfa', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'Der. segunda alfa' );

% Label axes
figure( 'Name', 'Momento en O' );
hpl=plot(t,p1);
legend( hpl, 'Momento en O', 'Momento O', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'Par 1' );

% Label axes
figure( 'Name', 'Momento en A' );
hp2=plot(t,p2);
legend( hp2, 'Momento en A', 'Momento A', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'Par 2' );

% Label axes
figure( 'Name', 'f1' );
hf1=plot(t,f1);
legend( hf1, 'Fuerza 1', 'Fuerza 1', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'f1' );

% Label axes
figure( 'Name', 'f2' );
hf2=plot(t,f2);
legend( hf2, 'Fuerza 2', 'Fuerza 2', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'f2' );

% Label axes
figure( 'Name', 'f1p' );
hf1p=plot(t,f1p);
legend( hf1p, 'Fuerza 1 prima', 'Fuerza 1 prima', 'Location',
'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'f1p' );

% Label axes
figure( 'Name', 'f2p' );
hf2p=plot(t,f2p);
legend( hf2p, 'Fuerza 2 prima', 'Fuerza 2 prima', 'Location',
'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'f2p' );
```

C.2.2 Gráficas obtenidas en Matlab

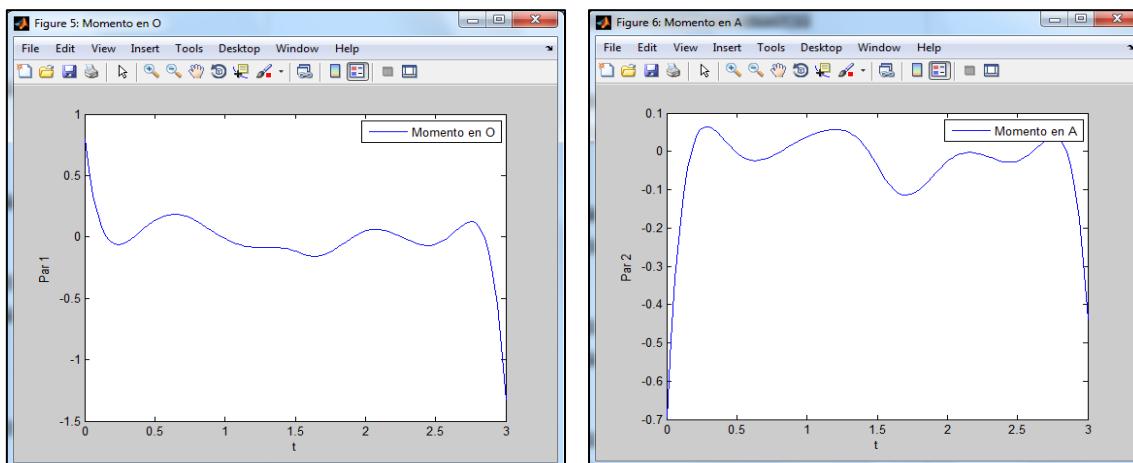


Figura C.9. Momentos en los puntos A y O.

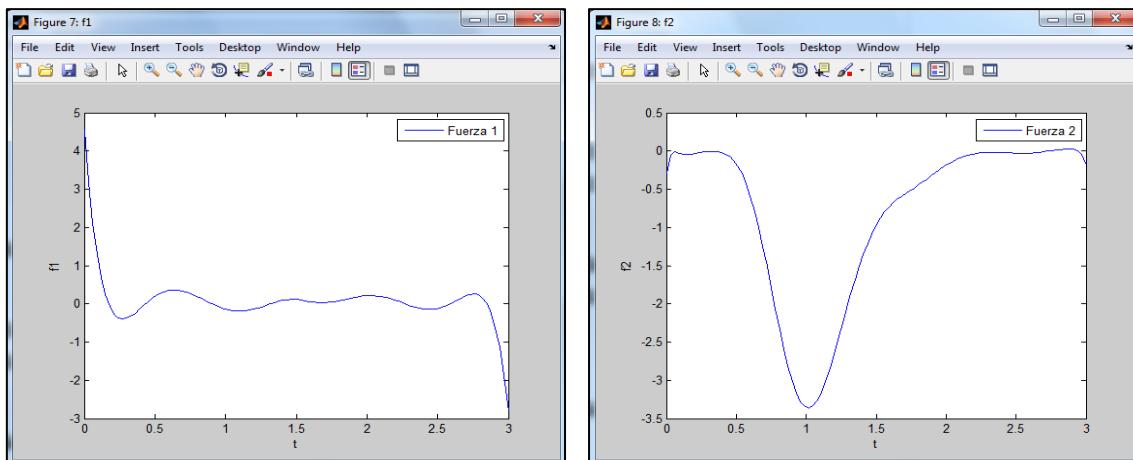


Figura C.10. Fuerza 1 y Fuerza 2.

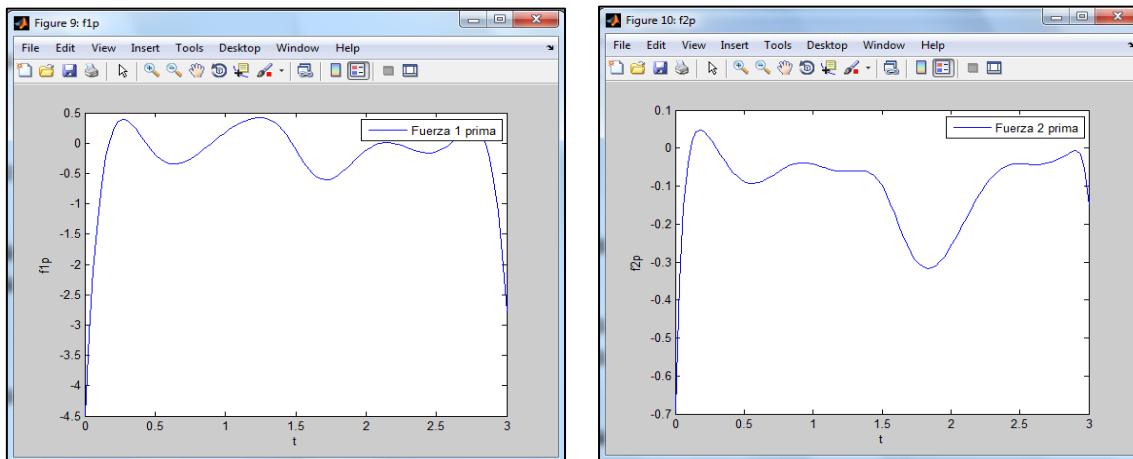


Figura C.11. Fuerza 1' y Fuerza 2'.

C.2.3 Hojas de características de motores

Direct drive stepper motors																																																																																																			
→ 7.5° 5 Watts																																																																																																			
<ul style="list-style-type: none"> ■ 48 steps/revolution (7.5°) ■ Absorbed power : 5 W ■ 2 or 4 phase versions available 																																																																																																			
Specifications																																																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>2 phases</th><th>2 phases</th><th>2 phases</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Type</td><td>82 910 0</td><td>82 910 0</td><td>82 910 0</td></tr> <tr> <td>Electronic controller used</td><td>Bipolar</td><td>Bipolar</td><td>Bipolar</td></tr> <tr> <td>Bearings</td><td>Sintered bronze</td><td>Sintered bronze</td><td>Sintered bronze</td></tr> <tr> <td>Part numbers</td><td>82 910 001</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="4">General characteristics</td></tr> <tr> <td>Resistance per phase (Ω)</td><td>9</td><td>9</td><td>9</td></tr> <tr> <td>Inductance per phase (mH)</td><td>12</td><td>12</td><td>12</td></tr> <tr> <td>Current per phase (A)</td><td>0.52</td><td>0.52</td><td>0.52</td></tr> <tr> <td>Holding torque (mN.m)</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td></tr> <tr> <td>Voltage at motor terminals (V)</td><td>4.7</td><td>4.7</td><td>4.7</td></tr> <tr> <td>Absorbed power (W)</td><td>5</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr> <td>Step angle (°)</td><td>7.5</td><td>7.5</td><td>7.5</td></tr> <tr> <td>Positioning accuracy (mm)</td><td>5</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr> <td>Inertia of rotor (gcm²)</td><td>4.9</td><td>4.9</td><td>4.9</td></tr> <tr> <td>Max. detent torque (mN.m)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Max. coil temperature (°C)</td><td>120</td><td>120</td><td>120</td></tr> <tr> <td>Storage temperature (°C)</td><td>-40 → +80</td><td>-40 → +80</td><td>-40 → +80</td></tr> <tr> <td>Thermal resistance of coil - ambient air (°C/W)</td><td>14</td><td>14</td><td>14</td></tr> <tr> <td>Insulation resistance (at 500 Vdc) (MΩ) following NFC 51200 standard</td><td>> 10³</td><td>> 10³</td><td>> 10³</td></tr> <tr> <td>Insulation voltage (50 Hz, 1 minute) (V) following NFC 51200 standard</td><td>> 600</td><td>> 600</td><td>> 600</td></tr> <tr> <td>Wires length (mm)</td><td>250</td><td>250</td><td>250</td></tr> <tr> <td>Weight (g)</td><td>90</td><td>90</td><td>90</td></tr> <tr> <td>Protection rating</td><td>IP 40</td><td>IP 40</td><td>IP 40</td></tr> </tbody> </table>					2 phases	2 phases	2 phases	Type	82 910 0	82 910 0	82 910 0	Electronic controller used	Bipolar	Bipolar	Bipolar	Bearings	Sintered bronze	Sintered bronze	Sintered bronze	Part numbers	82 910 001			General characteristics				Resistance per phase (Ω)	9	9	9	Inductance per phase (mH)	12	12	12	Current per phase (A)	0.52	0.52	0.52	Holding torque (mN.m)	25	25	25	Voltage at motor terminals (V)	4.7	4.7	4.7	Absorbed power (W)	5	5	5	Step angle (°)	7.5	7.5	7.5	Positioning accuracy (mm)	5	5	5	Inertia of rotor (gcm²)	4.9	4.9	4.9	Max. detent torque (mN.m)	3	3	3	Max. coil temperature (°C)	120	120	120	Storage temperature (°C)	-40 → +80	-40 → +80	-40 → +80	Thermal resistance of coil - ambient air (°C/W)	14	14	14	Insulation resistance (at 500 Vdc) (MΩ) following NFC 51200 standard	> 10³	> 10³	> 10³	Insulation voltage (50 Hz, 1 minute) (V) following NFC 51200 standard	> 600	> 600	> 600	Wires length (mm)	250	250	250	Weight (g)	90	90	90	Protection rating	IP 40	IP 40	IP 40
	2 phases	2 phases	2 phases																																																																																																
Type	82 910 0	82 910 0	82 910 0																																																																																																
Electronic controller used	Bipolar	Bipolar	Bipolar																																																																																																
Bearings	Sintered bronze	Sintered bronze	Sintered bronze																																																																																																
Part numbers	82 910 001																																																																																																		
General characteristics																																																																																																			
Resistance per phase (Ω)	9	9	9																																																																																																
Inductance per phase (mH)	12	12	12																																																																																																
Current per phase (A)	0.52	0.52	0.52																																																																																																
Holding torque (mN.m)	25	25	25																																																																																																
Voltage at motor terminals (V)	4.7	4.7	4.7																																																																																																
Absorbed power (W)	5	5	5																																																																																																
Step angle (°)	7.5	7.5	7.5																																																																																																
Positioning accuracy (mm)	5	5	5																																																																																																
Inertia of rotor (gcm²)	4.9	4.9	4.9																																																																																																
Max. detent torque (mN.m)	3	3	3																																																																																																
Max. coil temperature (°C)	120	120	120																																																																																																
Storage temperature (°C)	-40 → +80	-40 → +80	-40 → +80																																																																																																
Thermal resistance of coil - ambient air (°C/W)	14	14	14																																																																																																
Insulation resistance (at 500 Vdc) (MΩ) following NFC 51200 standard	> 10³	> 10³	> 10³																																																																																																
Insulation voltage (50 Hz, 1 minute) (V) following NFC 51200 standard	> 600	> 600	> 600																																																																																																
Wires length (mm)	250	250	250																																																																																																
Weight (g)	90	90	90																																																																																																
Protection rating	IP 40	IP 40	IP 40																																																																																																

Geared stepper motors																																																																																																																							
→ 3 Nm 2.5 and 3.5 Watts																																																																																																																							
<ul style="list-style-type: none"> ■ Mechanical strength 3 Nm ■ 2 and 4 phases 																																																																																																																							
Specifications																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>2.5 Watts</th><th>2.5 Watts</th><th>3.5 Watts</th><th>3.5 Watts</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Type</td><td>80 913 0</td><td>80 913 5</td><td>80 923 0</td><td>80 933 0</td></tr> <tr> <td colspan="5">Ratios</td></tr> <tr> <td>150</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>187.5</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>300</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>375</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>600</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>750</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>1200</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>2250</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>2400</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td>3600</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td><td>●</td></tr> <tr> <td colspan="5">General characteristics</td></tr> <tr> <td>Motor</td><td>82 910 0</td><td>82 910 5</td><td>82 920</td><td>82 930</td></tr> <tr> <td>Gearbox</td><td>81 023 0</td><td>81 023 0</td><td>81 023 0</td><td>81 023 0</td></tr> <tr> <td>Maximum permitted torque from gearmotor under continuous conditions (N.m)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Axial load static (daN)</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr> <td>Radial load static (daN)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Absorbed power (W)</td><td>2.5</td><td>2.5</td><td>3.5</td><td>3.6</td></tr> <tr> <td>Weight (g)</td><td>370</td><td>370</td><td>490</td><td>620</td></tr> <tr> <td>Wires length (mm)</td><td>250</td><td>250</td><td>250</td><td>250</td></tr> <tr> <td>Protection rating</td><td>IP00</td><td>IP00</td><td>IP00</td><td>IP00</td></tr> </tbody> </table>						2.5 Watts	2.5 Watts	3.5 Watts	3.5 Watts	Type	80 913 0	80 913 5	80 923 0	80 933 0	Ratios					150	●	●	●	●	187.5	●	●	●	●	300	●	●	●	●	375	●	●	●	●	600	●	●	●	●	750	●	●	●	●	1200	●	●	●	●	2250	●	●	●	●	2400	●	●	●	●	3600	●	●	●	●	General characteristics					Motor	82 910 0	82 910 5	82 920	82 930	Gearbox	81 023 0	81 023 0	81 023 0	81 023 0	Maximum permitted torque from gearmotor under continuous conditions (N.m)	3	3	3	3	Axial load static (daN)	2	2	2	2	Radial load static (daN)	3	3	3	3	Absorbed power (W)	2.5	2.5	3.5	3.6	Weight (g)	370	370	490	620	Wires length (mm)	250	250	250	250	Protection rating	IP00	IP00	IP00	IP00
	2.5 Watts	2.5 Watts	3.5 Watts	3.5 Watts																																																																																																																			
Type	80 913 0	80 913 5	80 923 0	80 933 0																																																																																																																			
Ratios																																																																																																																							
150	●	●	●	●																																																																																																																			
187.5	●	●	●	●																																																																																																																			
300	●	●	●	●																																																																																																																			
375	●	●	●	●																																																																																																																			
600	●	●	●	●																																																																																																																			
750	●	●	●	●																																																																																																																			
1200	●	●	●	●																																																																																																																			
2250	●	●	●	●																																																																																																																			
2400	●	●	●	●																																																																																																																			
3600	●	●	●	●																																																																																																																			
General characteristics																																																																																																																							
Motor	82 910 0	82 910 5	82 920	82 930																																																																																																																			
Gearbox	81 023 0	81 023 0	81 023 0	81 023 0																																																																																																																			
Maximum permitted torque from gearmotor under continuous conditions (N.m)	3	3	3	3																																																																																																																			
Axial load static (daN)	2	2	2	2																																																																																																																			
Radial load static (daN)	3	3	3	3																																																																																																																			
Absorbed power (W)	2.5	2.5	3.5	3.6																																																																																																																			
Weight (g)	370	370	490	620																																																																																																																			
Wires length (mm)	250	250	250	250																																																																																																																			
Protection rating	IP00	IP00	IP00	IP00																																																																																																																			

Direct drive stepper motors

→ 7.5° 7.5 Watts

- 48 steps/revolution (7.5°)
- Absorbed power : 7.5 W
- 2 or 4 phase versions available



Specifications

	2 phases	4 phases
Type	82 920 0	82 920 0
Number of phases	2	4
Electronic controller used	Bipolar	Unipolar
Resistance per phase (Ω)	Current per phase (A)	Voltage at motor terminals (V)
10.7	0.59	0.59
46	0.28	12.9
General characteristics		
Absorbed power (W)	7.5	7.5
Holding torque (mN.m)	70	57
Step angle (°)	7.5	7.5
Positioning accuracy (mm)	5	5
Inertia of rotor (gcm²)	18.8	18.8
Max. detent torque (mN.m)	6	6
Max. coil temperature (°C)	120	120
Storage temperature (°C)	-40 → +80	-40 → +80
Thermal resistance of coil - ambient air (°C/W)	9.3	9.3
Insulation resistance (at 500 Vcc) (MΩ) following NFC 51200 standard	> 10³	> 10³
Insulation voltage (50 Hz, 1 minute) (V) following NFC 51200 standard	> 600	> 600
Wires length (mm)	250	250
Weight (g)	210	210
Protection rating	IP40	IP 40

Geared stepper motors

→ 5 Nm 5 and 7.5 Watts

- Mechanical strength : 5 Nm
- 2 and 4 phases



Specifications

	5 Watts	7.5 Watts	7.5 Watts
Type	80 917 0	80 927 0	80 927 0
Number of phases	2 / 4	2	4
Ratios			
12.5	●		
25	●	●	
31.25		●	
41.66	●	●	
62.5	●	●	●
83.33	●	●	●
125	●	●	●
250	●	●	●
500	●	●	●
750	●	●	●
2500	●	●	●
General characteristics			
Motor	82 910 0	82 920 001	82 920 012
Gearbox	81 037	81 037	81 037
Maximum permitted torque from gearmotor under continuous conditions (N.m)	5	5	5
Number of phases	2/4	2	4
Axial load static (daN)	2	2	2
Radial load static (daN)	3	3	3
Absorbed power (W)	5	7.5	7.5
Coil temperature (°C)	120	120	120
Weight (g)	410	530	530
Wires length (mm)	250	250	250
Protection rating	IP 40	IP 40	IP 40

C.3. Diferentes modelos desarrollados de brazos robóticos

Fase I

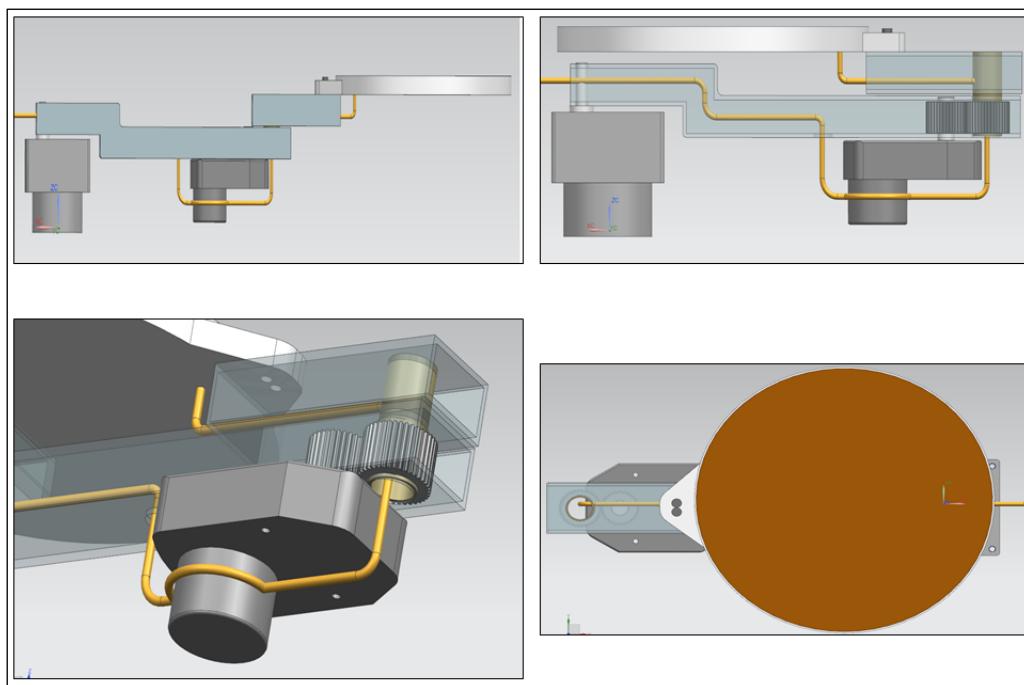


Figura C.12. Diferentes vistas de Sistema S1.

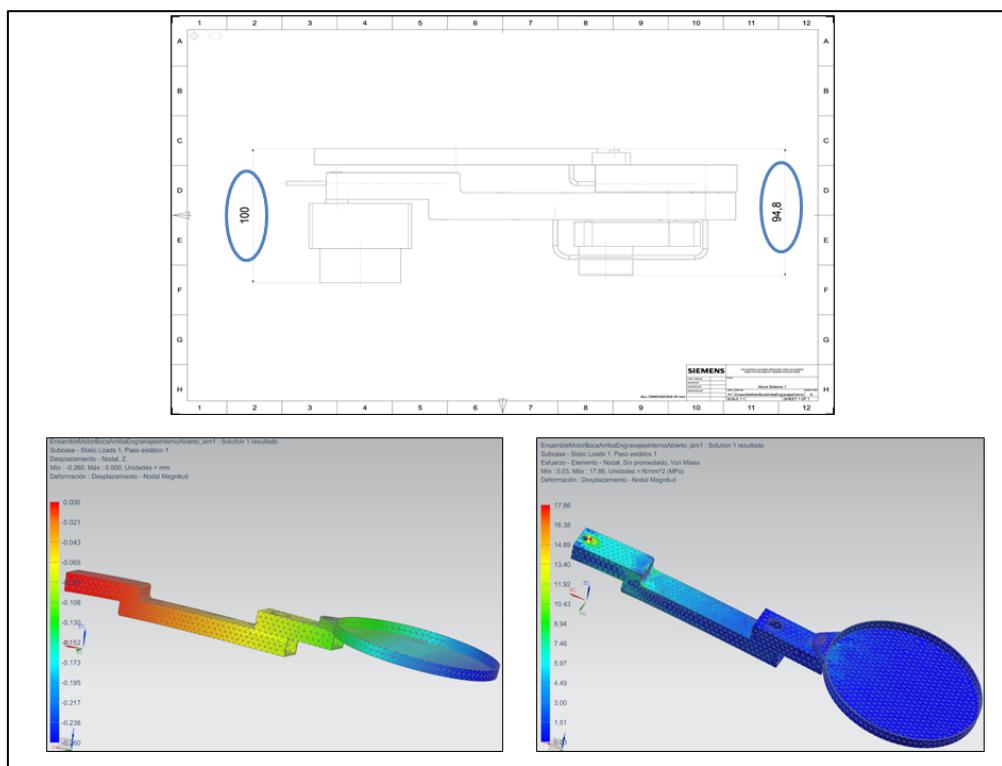


Figura C.13. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S1.

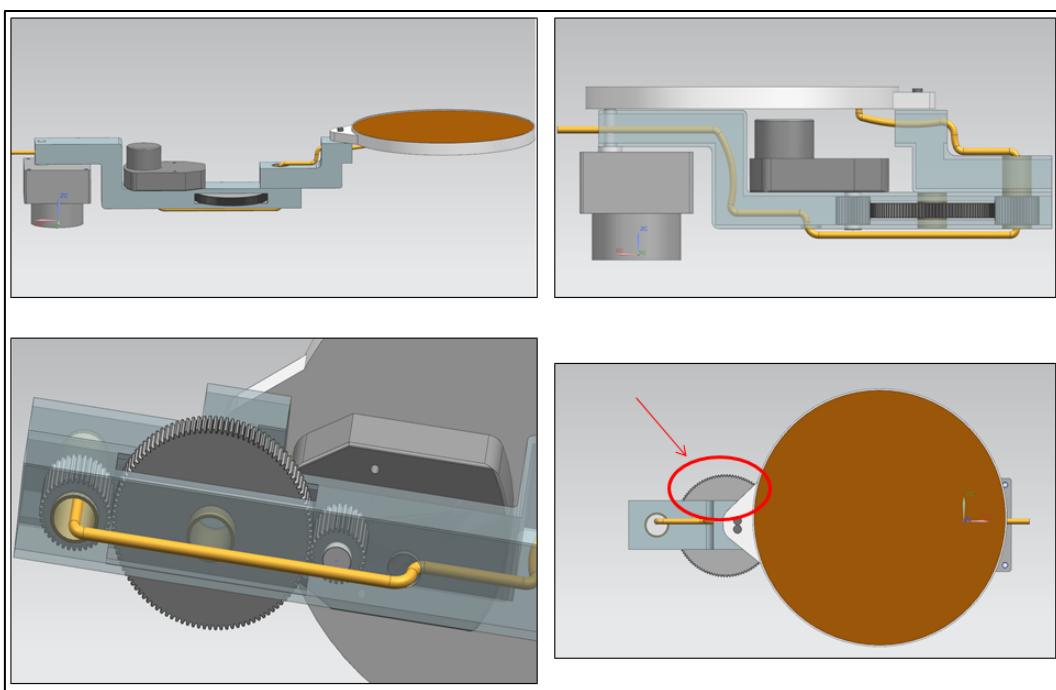


Figura C.14. Diferentes vistas de Sistema S2.

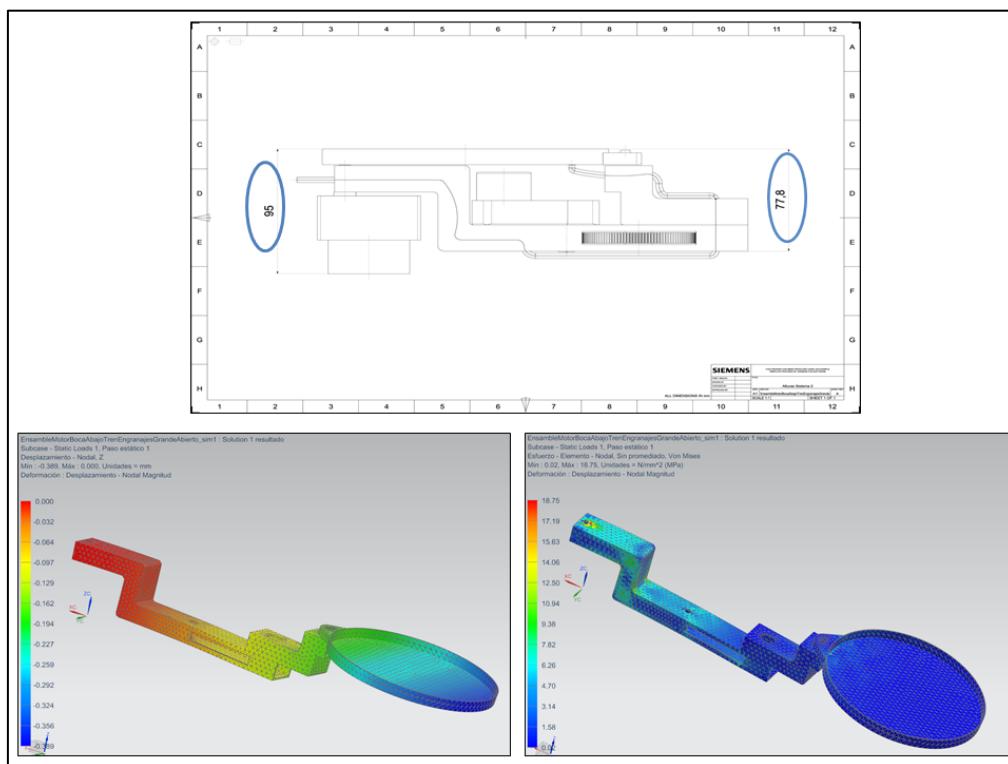


Figura C.15. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S2.

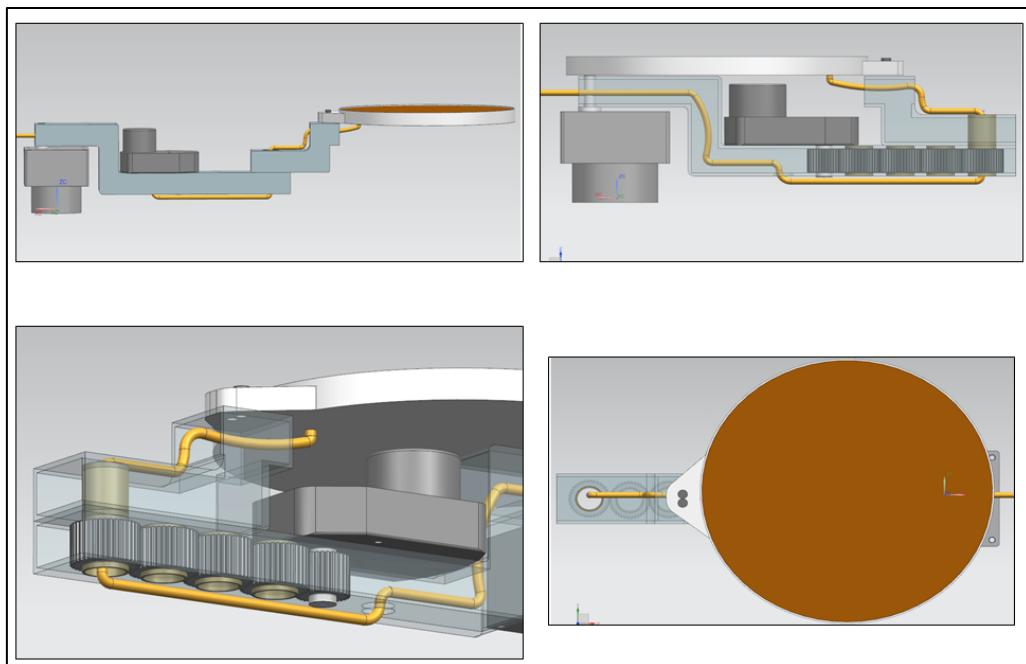


Figura C.16. Diferentes vistas de Sistema S3.

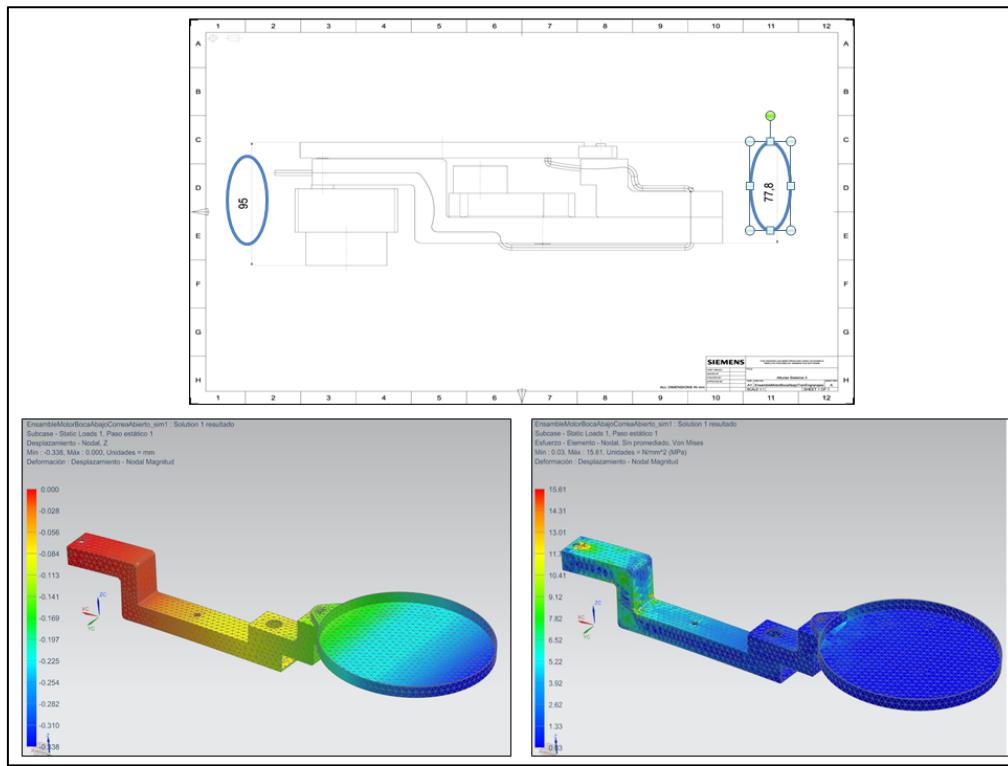


Figura C.17. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S3.

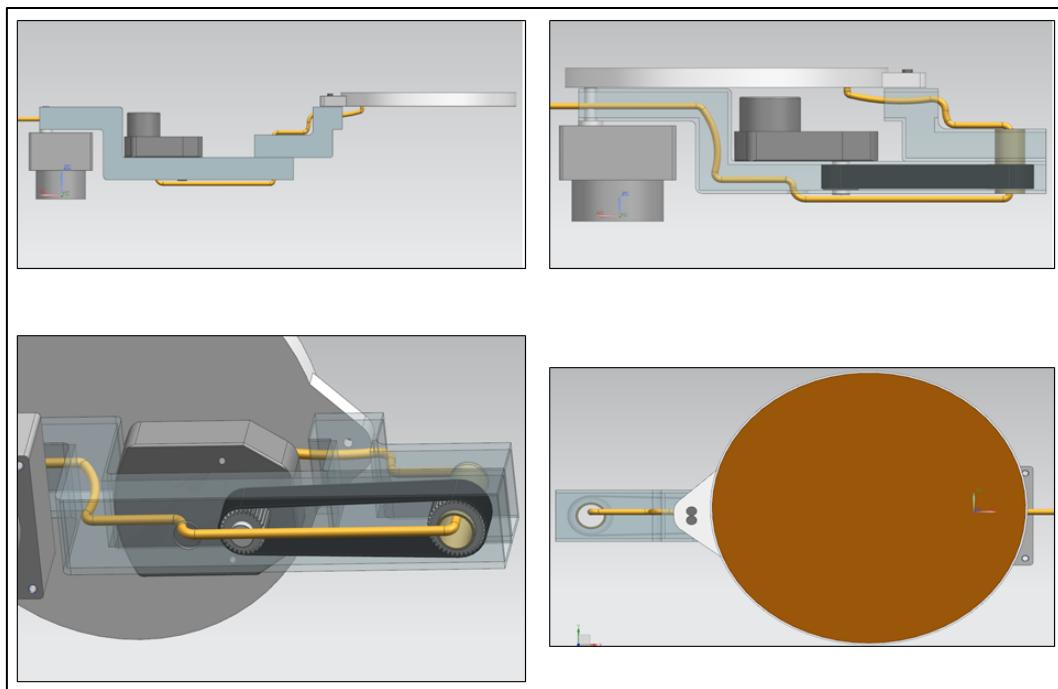


Figura C.18. Diferentes vistas de Sistema S4.

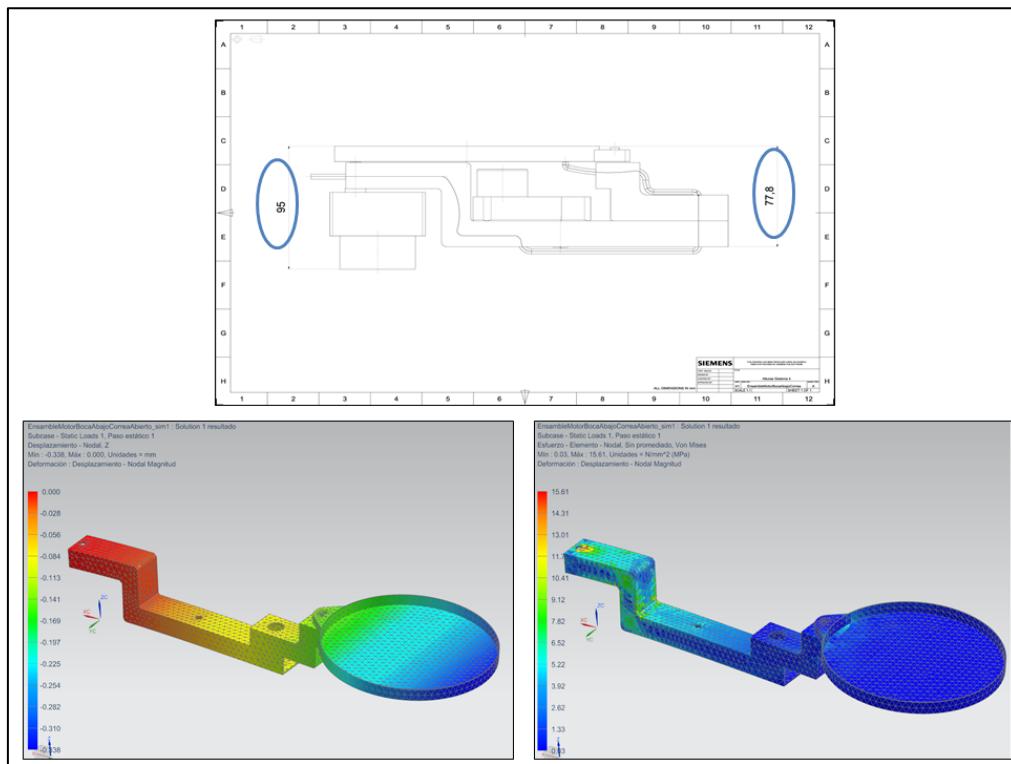


Figura C.19. Plano, desplazamientos y tensión de Von Mises de Sistema S4.

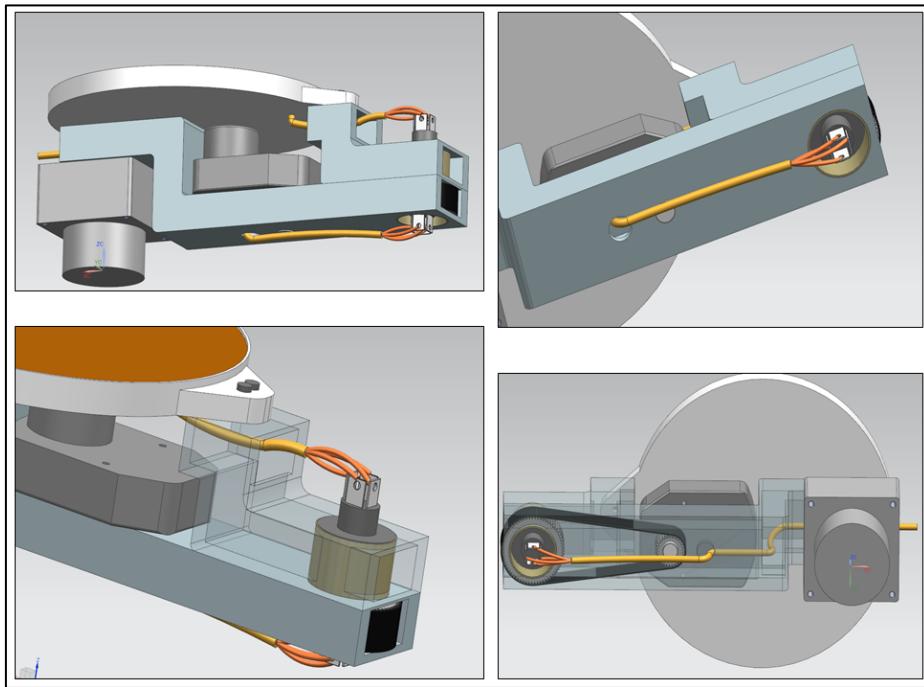


Figura C.20. Vistas de sistema S4 con conector rotatorio de Mercotac.

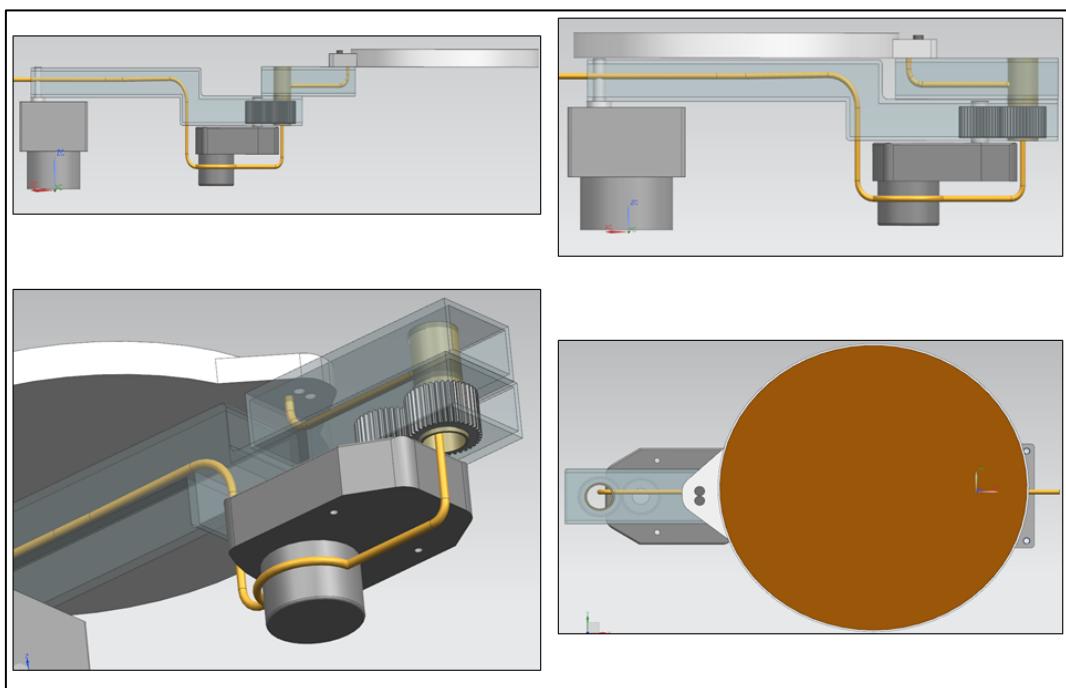
Fase II

Figura C.21. Diferentes vistas de Sistema A.

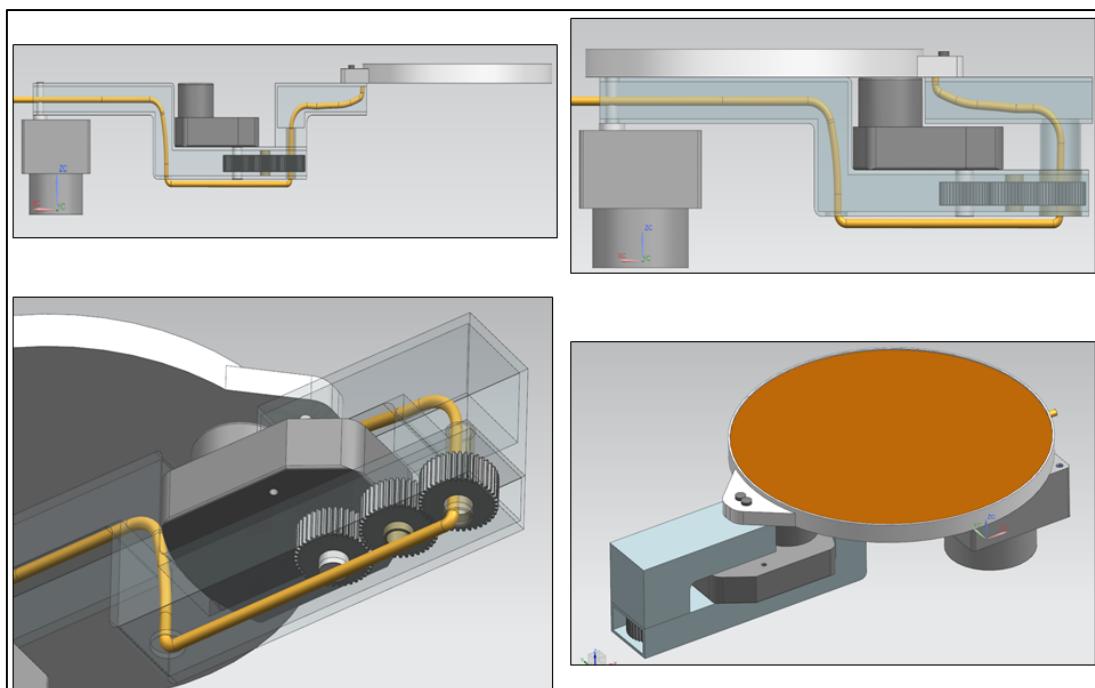


Figura C.22. Diferentes vistas de Sistema B.

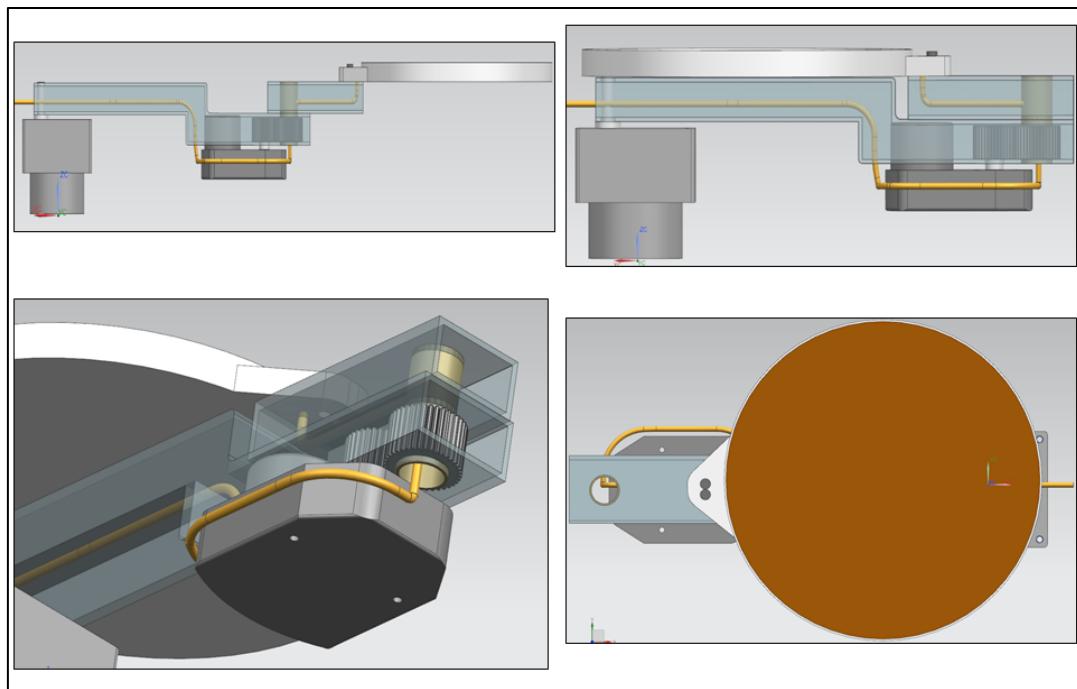


Figura C.23. Diferentes vistas de Sistema C.

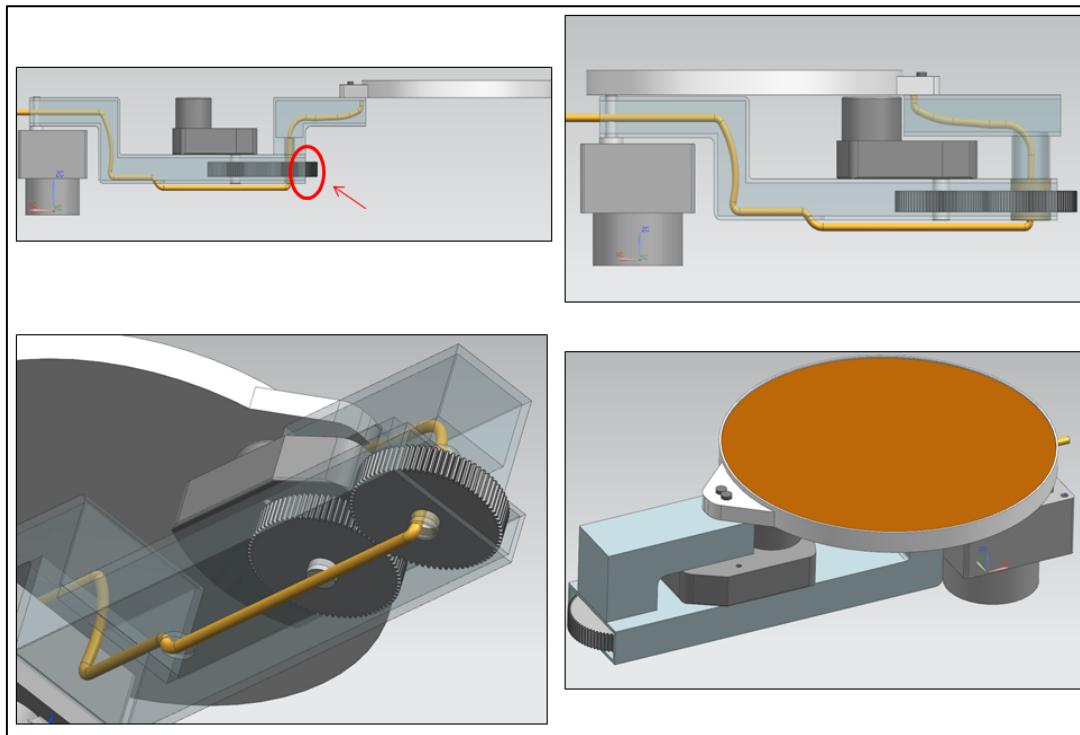


Figura C.24. Problemática al intentar diseñar sistema B con sólo 2 engranajes.

C.4. Análisis Elementos Finitos prototipo final

Se presentan a continuación varios de los resultados que se obtuvieron al analizar por el Método de los Elementos Finitos los sistemas de brazos robóticos 1 y 3, y que completan los presentados en la memoria sobre el sistema de brazos robóticos número 2.

- **Sistema de brazos robóticos número 1:**

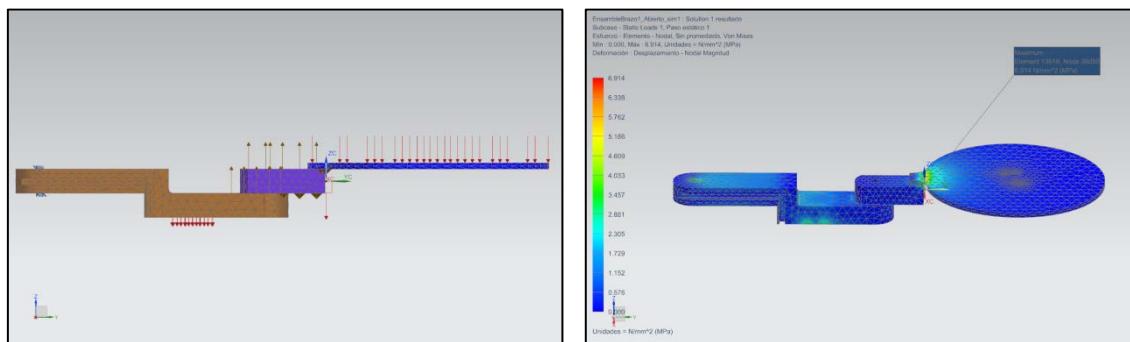


Figura C.25. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 1).

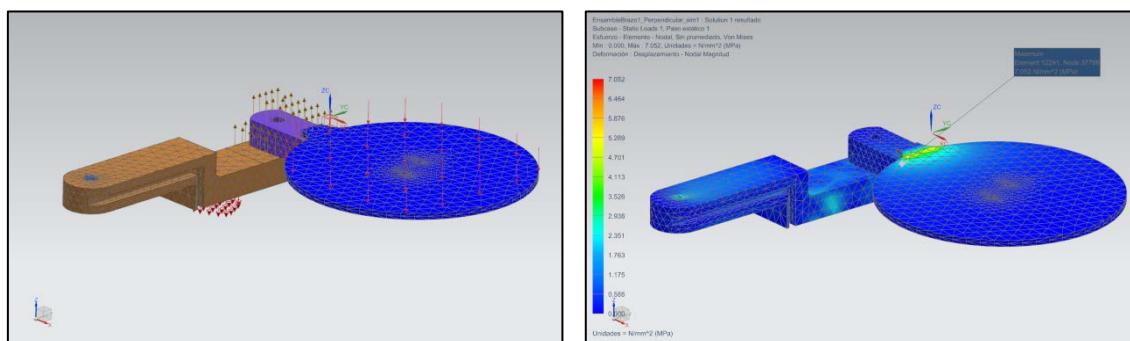


Figura C.26. Modelo brazo a 90º mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema brazos número 1).

Modelo analizado	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (Mpa)
Brazo totalmente estirado	0.235	6.914
Brazo cerrado	0.129	8.078
Brazo a 90º	0.190	7.052

Tabla C-1. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 1.

- Sistema de brazos robóticos número 3:**

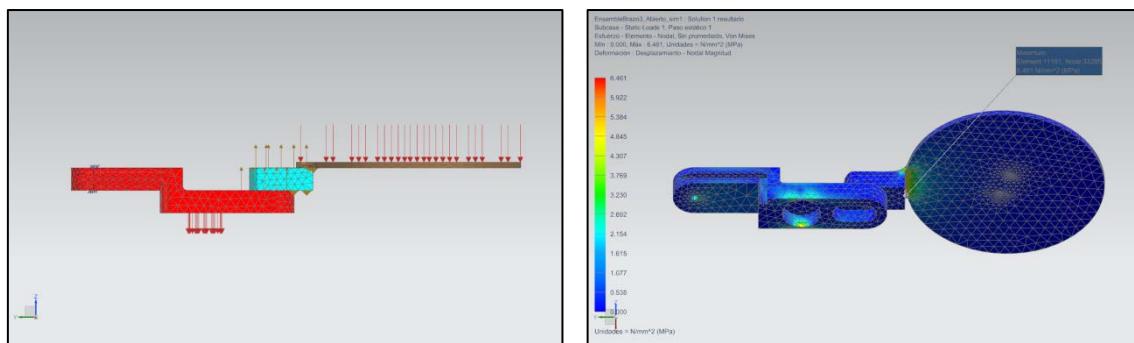


Figura C.27. Modelo brazo estirado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 3).

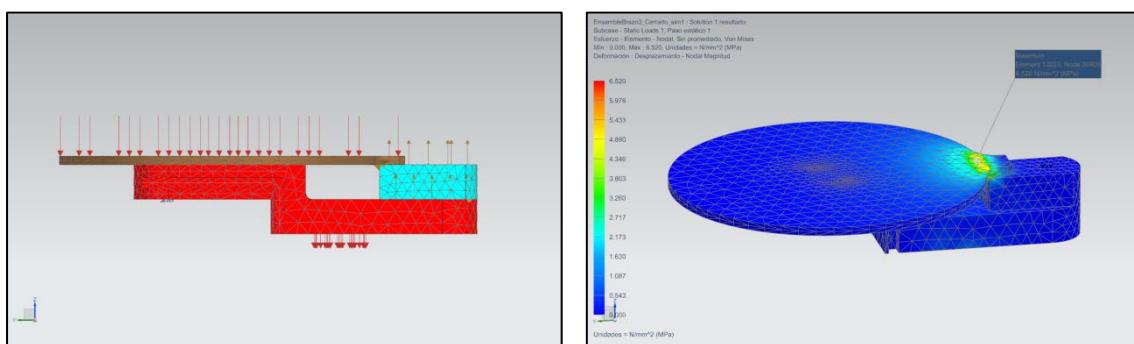


Figura C.28. Modelo brazo cerrado mallado con cargas, y tensiones Von Mises (Sistema de brazos número 3).

Modelo analizado	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (Mpa)
Brazo totalmente estirado	0.201	6.46
Brazo cerrado	0.125	6.520
Brazo a 90º	0.167	6.640

Tabla C-2. Valores de desplazamientos y tensión Von Mises sistema brazos número 3.

C.5. Propiedades de la aleación de Aluminio serie 7

Principal Aleante	Designación	Tratamiento térmico
Aluminio Puro	1xxx	No tratable
Cobre	2xxx	Tratable
Manganeso	3xxx	No tratable
Silicio	4xxx	No tratable
Magnesio	5xxx	No tratable
Magnesio y Silicio	6xxx	Tratable
Zinc	7xxx	Tratable
Otras aleaciones	8xxx	-----
Serie reservada	9xxx	-----

Tabla C-3. Propiedades de las series del aluminio.

En la tabla C-3 el primer dígito indica el grupo de la aleación (principal aleante), reservándose el 1 para el aluminio de 99% de pureza. Para este caso particular los dos últimos dígitos indican el mínimo porcentaje de aluminio en el orden de las centésimas, es decir, estos son los dos números a la derecha de la coma del mínimo porcentaje de aluminio expresado en enteros y centésimas (por ejemplo 1030 indica 99,30 de aluminio puro). El segundo dígito indica las modificaciones al límite de impurezas: si es cero (0) indica que no tiene especial control. Del 1 al 9 indican especiales controles de las impurezas, las principales son el hierro y el silicio.

Para el caso de las aleaciones de aluminio, el segundo dígito es un número que va del 0 al 9, si es cero se trata de la aleación original. Los números del 1 al 9 están asignados consecutivamente indicando las modificaciones de la aleación. Las últimas dos cifras no tienen especial significado pero sirven para identificar las diferencias de las aleaciones de aluminio en el grupo.

Serie 7XXX

El zinc es el elemento aleante más importante en esta serie y cuando se le agrega una pequeña cantidad de magnesio resulta tratable térmicamente lográndose muy alta resistencia mecánica ya que se tiene el mayor potencial de endurecimiento por precipitación (de las aleaciones de aluminio). A estas aleaciones suelen agregárseles cobre y cromo en pequeñas cantidades con el fin de mejorar sus características mecánicas, aunque el cobre a menudo se añade para

mejorar la resistencia a la corrosión bajo tensión (con el inconveniente de reducir la capacidad de soldadura). Además de utilizar cobre para minimizar la corrosión bajo tensión se utiliza la relación entre el Zn/Mg, un aumento de esta relación disminuye la resistencia a la corrosión bajo tensión, este fenómeno ha sido el principal causante en la restricción del uso de estas aleaciones.

La aleación más conocida y utilizada es la 7075. Esta tiene alta resistencia mecánica, buenas propiedades mecánicas a la fatiga y es utilizada en elementos estructurales sometidos a altas solicitudes como estructuras de fuselaje, recubrimientos de alas, etc. Se les realiza tratamientos térmicos de solución y envejecido artificialmente para mejorar las propiedades mecánicas. Esta aleación tiene la particularidad de seguir precipitando naturalmente, mejorando las propiedades mecánicas en el tiempo.

En las tablas C-4 y C 5 pueden observarse diferentes características de la aleación de aluminio 7075.

Alloy	Composition
2618	Al – 2.3Cu – 1.6Mg
2224	Al – 4.4Cu – 1.5Mg – 0.6Mn
7050	Al – 6.2Zn – 2.3Cu – 2.2Mg
7075	Al – 5.6Zn – 2.5Mg – 1.6Cu
7150	Al – 6.4Zn – 2.4Mg – 2.2Cu

Tabla C-4. Composición química de las principales aleaciones de la serie 7.

ALEACION	CARGA ROTURA	LIMITE ELÁSTICO	ALARGAMIENTO	DUREZA BRINELL
NORMAS A.A.	Rm - N / mm ²	Rp 0,2 - N / mm ²	A 5,65 %	HB
7075- T7351	440	360	6	140
7075- T6 / T651	470	400	5	130
2024- T6	425	315	5	125
7020- T6 / T651	360	290	10	120
2024- T3	400	270	8	120
2007- T3	340	220	6	115
2014- T4	430	275	18	110
2007- T4	330	210	7	110
2017- T4	380	260	12	105
2011- T3	380	295	15	100
6061- T6 / T651	150	110	16	95
6062- T6 / T651	295	250	8	95
2030- T4	330	210	7	95
6060- T6	190	150	8	85
5052- H34	195	90	30	70
5083- O/H111	270	110	16	70
5086- O/H111	240	95	16	65
6063- T5	175	130	6	60
5154- O/H111	215	85	16	55
5754- O/H111	190	80	16	55
5251- O/H111	160	60	16	45
1200- H18	125	150	15	45
3003- H14	130	110	6	45
5005- H24	145	110	6	45
1050- H18	165	150	15	43
1200- H14	125	115	20	37
1050- H14	125	115	20	35
1200- O	90	34	40	23
1050- O	90	34	40	21

Tabla C-5. Carga a la rotura y límite elástico de diferentes aleaciones de aluminio.

Anexo D. PIEZAS COMPONENTES DE PROTOTIPO Y UNIONES

- Detalles de componentes

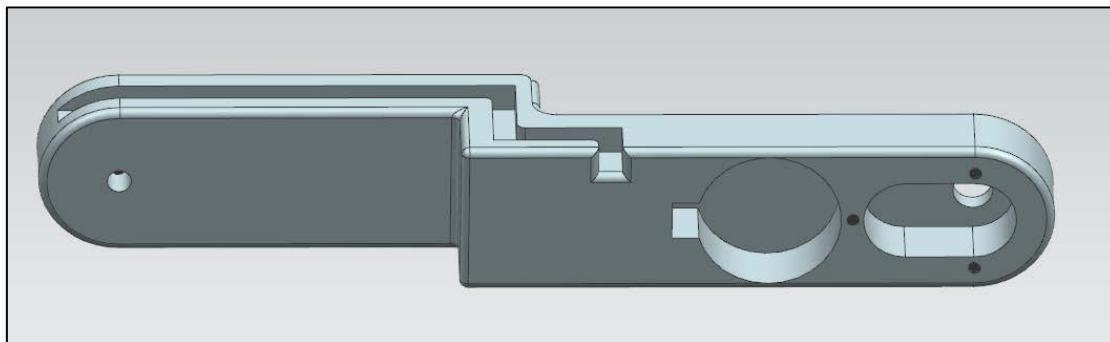


Figura D.1. Parte inferior brazo principal (sistema de brazos robóticos número 2).

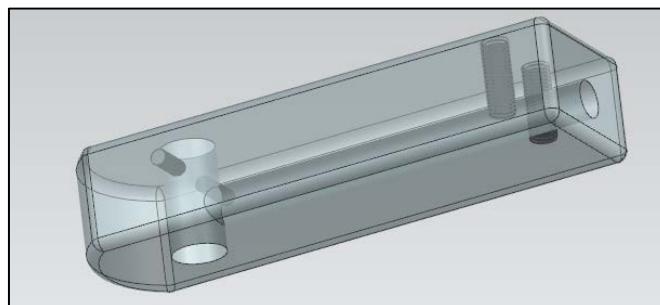


Figura D.2. Interior de brazo portainductor (sistema de brazos robóticos número 2).

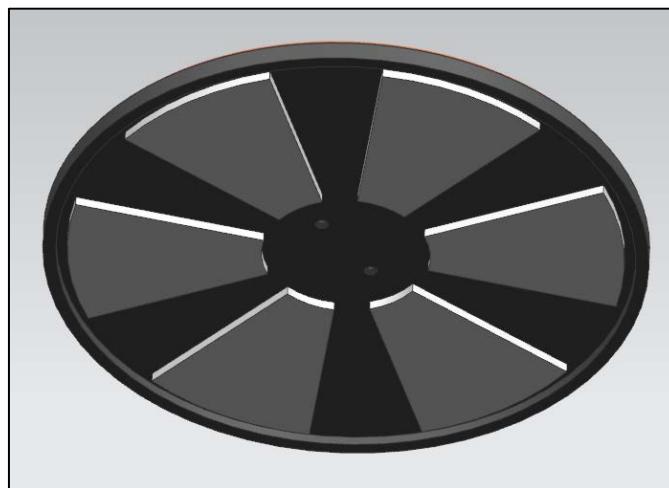


Figura D.3. Parte inferior (con ferritas) del inductor.

- **Detalles del paso del cable y uniones**

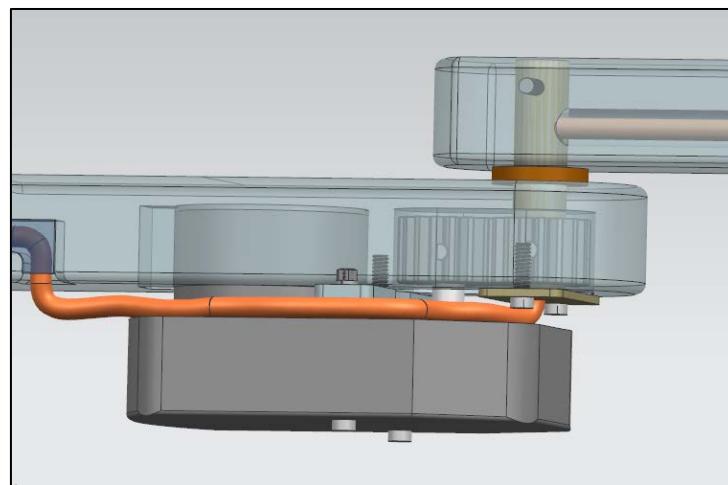


Figura D.4. Detalle del paso del cable sobre el motor.

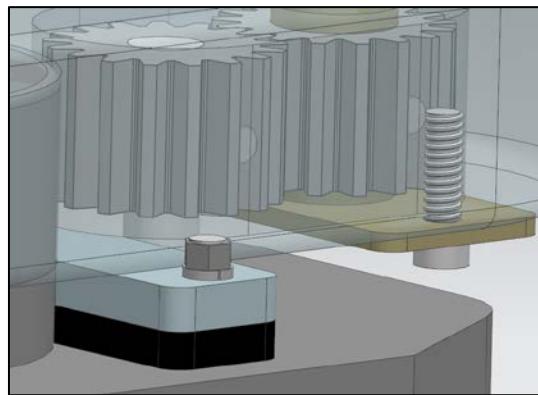


Figura D.5. Detalle unión atornillada de motor móvil a la placa de sujeción.

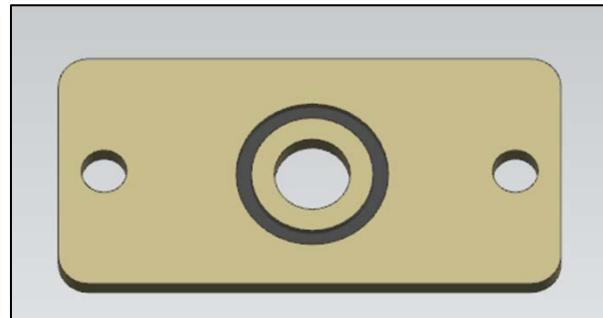


Figura D.6. Placa apoyo casquillo con anillo interior de teflón.

- **Sistemas finales de brazos robóticos 1 y 3:**

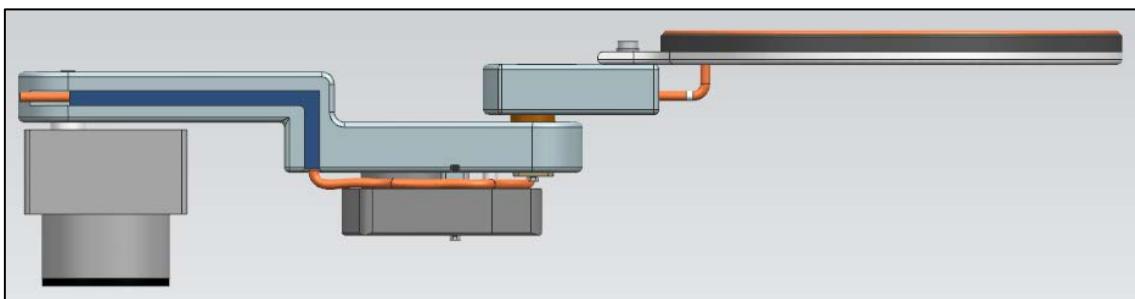


Figura D.7. Sistema final de brazos robóticos número 1.

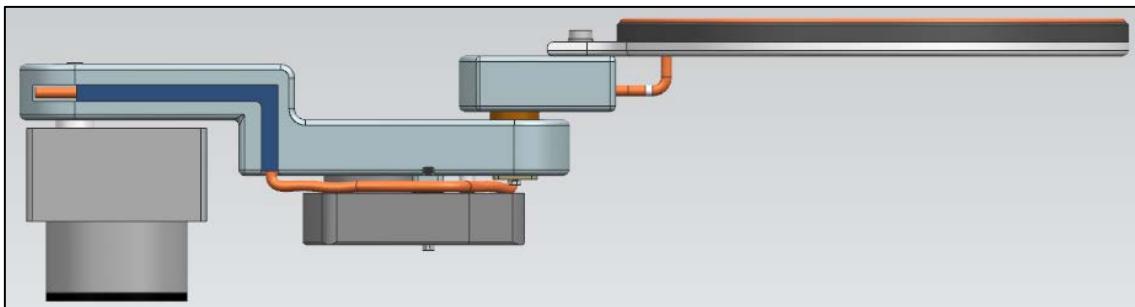


Figura D.8. Sistema final de brazos robóticos número 3.

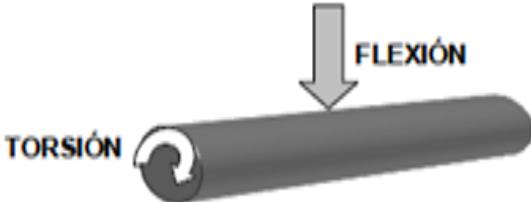
Anexo E. MÉTODOS Y NORMATIVA

Cálculo de un eje para resistencia a cargas estáticas

Ejes de transmisión 3

CÁLCULO DE UN EJE PARA RESISTENCIA A CARGAS ESTÁTICAS

Ejemplo: Eje que transmite potencia (TORSIÓN) sobre el que está montada una rueda de dentado recto (FLEXIÓN)



TORSIÓN

FLEXIÓN

(Logo)

Área de Ingeniería Mecánica

Ejes de transmisión 4

FLEXIÓN $\sigma_x = \frac{M \cdot d / 2}{I} = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3}$

TORSIÓN $\tau_{xy} = \frac{T \cdot d / 2}{J} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3}$

σ_x = Tensión de flexión (esfuerzo normal según la dirección x).
 τ_{xy} = Tensión de torsión (esfuerzo tangencial en el plano xy).
 M = Momento flector en la sección crítica.
 I = Momento de inercia transversal del eje = $\frac{\pi \cdot d^4}{64}$
 T = Momento torsor en la sección crítica.
 J = Momento de inercia polar del eje = $\frac{\pi \cdot d^4}{32}$
 d = Diametro del eje.

(Logo)

Área de Ingeniería Mecánica

Cálculo de la tensión cortante máxima

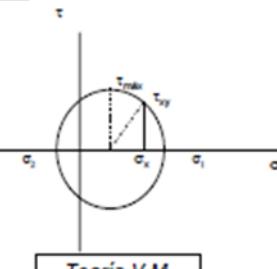
$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{16}{\pi \cdot d^3} \sqrt{M^2 + T^2}$$

Teoría E.C.M.

$$S_{sy} = S_y / 2$$

$$d = \left[\frac{32 \cdot n}{\pi \cdot S_y} (M^2 + T^2) \right]^{\frac{1}{4}}$$



Teoría V.M.

$$S_{sy} = 0.577 \cdot S_y$$

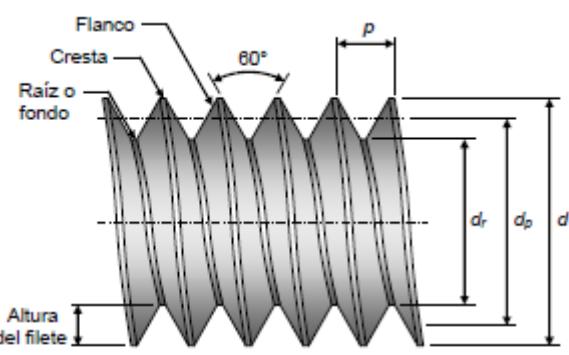
$$d = \left[\frac{27.7 \cdot n}{\pi \cdot S_y} (M^2 + T^2) \right]^{\frac{1}{4}}$$



Área de Ingeniería Mecánica

Diseño de tornillos

- Características rosas estándar para tornillos de unión:



p : paso
 N_h : número de hilos por pulgada
 d : diámetro mayor (nominal)
 d_p : diámetro de paso
 d_r : diámetro menor o de raíz

$$N_h = (1 \text{ in})/p$$

$$\text{Altura del filete} = (d - d_r)/2$$

Para rosca unificada (UNS):
 $d_r = d - 1.299038/N_h$
 $d_p = d - 0.649519/N_h$

Para rosca métrica ISO:
 $d_r = d - 1.226869p$
 $d_p = d - 0.649519p$

Figura 8.5 Forma y dimensiones de las roscas unificadas y métricas estándar de ISO

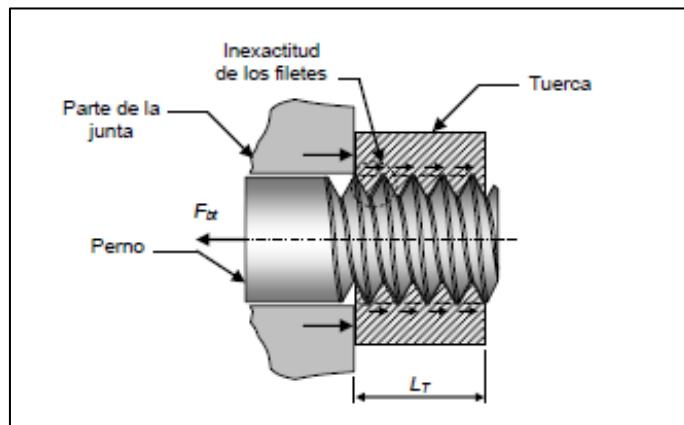
Se muestran los tres diámetros de la rosca, el mayor, d , el menor, d_r , y el de paso, d_p , el cual es igual a:

$$d_p = \frac{d + d_r}{2}$$

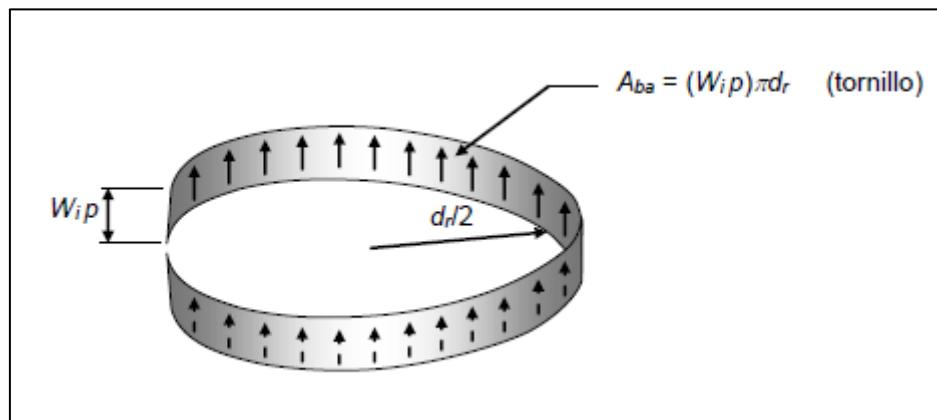
Diámetro mayor (nominal) d (mm)	ROSCA BASTA			ROSCA FINA		
	Paso p (mm)	Diámetro menor d_r (mm)	Área de esfuerzo a tracción A_t (mm^2)	Paso p (mm)	Diámetro menor d_r (mm)	Área de esfuerzo a tracción A_t (mm^2)
3.0	0.50	2.39	5.03			
3.5	0.60	2.76	6.78			
4.0	0.70	3.14	8.78			
5.0	0.80	4.02	14.18			
6.0	1.00	4.77	20.12			
7.0	1.00	5.77	28.86			
8.0	1.25	6.47	36.61	1.00	6.77	39.17
10.0	1.50	8.16	57.99	1.25	8.47	61.20
12.0	1.75	9.85	84.27	1.25	10.47	92.07
14.0	2.00	11.55	115.4	1.50	12.16	124.55
16.0	2.00	13.55	156.7	1.50	14.16	167.25
18.0	2.50	14.93	192.5	1.50	16.16	216.23
20.0	2.50	16.93	244.8	1.50	18.16	271.50
22.0	2.50	18.93	303.4	1.50	20.16	333.50
24.0	3.00	20.32	352.5	2.00	21.55	384.42
27.0	3.00	23.32	459.4	2.00	24.55	495.74
30.0	3.50	25.71	560.6	2.00	27.55	621.20
33.0	3.50	28.71	693.6	2.00	30.55	760.80
36.0	4.00	31.09	816.7	3.00	32.32	864.94
39.0	4.00	34.09	975.8	3.00	35.32	1028.4

La longitud roscada de los tornillos métricos está dada por $L_r = 2d + 6$ mm, si $L_{tb} \leq 125$ mm y $d \leq 48$ mm, por $L_r = 2d + 12$ mm, si $125 \text{ mm} < L_{tb} \leq 200$ mm, y por $L_r = 2d + 25$ mm, si $L_{tb} > 200$ mm.

Clase	Intervalo de tamaños (inclusive) (mm)	Resistencia límite mínima a la tracción S_p (MPa)	Resistencia de fluencia mínima a la tracción S_y (MPa)	Resistencia última mínima a la tracción S_u (MPa)	Características del acero
4.6	M5-M36	225	240	400	Medio o bajo carbono
4.8	M1.6-M16	310	340	420	Medio o bajo carbono
5.8	M5-M24	380	420	520	Medio o bajo carbono
8.8	M1.6-M36	600	660	830	Medio o bajo carbono, templado y revenido
9.8	M1.6-M16	650	720	900	Medio o bajo carbono, templado y revenido
10.9	M5-M36	830	940	1040	Martensítico de bajo carbono, templado y revenido
12.9	M1.6-M36	970	1100	1220	De aleación, templado y revenido



- Esfuerzo cortante en los filetes de una rosca:



Para el perno:

$$A_{ba} = \pi d_r (W_i p) n_f, \quad \text{donde} \quad 1 \leq n_f \leq \frac{L_T}{p}.$$

Para la tuerca:

$$A_{ba} = \pi d (W_o p) n_f, \quad \text{donde} \quad 1 \leq n_f \leq \frac{L_T}{p},$$

Tipo de filete	W_i	W_o
UNS/ISO	0.80	0.88
Cuadrada	0.50	0.50
Acme	0.77	0.63
Diente de sierra	0.90	0.83

Anexo F. CATÁLOGOS

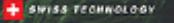
- Engranajes

ENGRANAJES CILINDRICOS
CYLINDRICAL GEARS

MODULO 1		ANGULO DE PRESION 20°									
A	B										
25	15										
12	14	12	9	-	0,01	55	57	55	40	12	0,36
13	15	13	10	-	0,02	56	58	56	40	12	0,37
14	16	14	11	-	0,02	57	59	57	40	12	0,38
15	17	15	12	-	0,02	58	60	58	40	12	0,39
16	18	16	13	-	0,03	59	61	59	40	12	0,40
17	19	17	14	-	0,03	60	62	60	40	12	0,41
18	20	18	15	8	0,03	61	63	61	50	12	0,47
19	21	19	15	8	0,04	62	64	62	50	12	0,49
20	22	20	16	8	0,04	63	65	63	50	12	0,50
21	23	21	16	8	0,05	64	66	64	50	12	0,51
22	24	22	16	8	0,05	65	67	65	50	12	0,52
23	25	23	18	8	0,06	66	68	66	50	12	0,53
24	26	24	20	10	0,06	67	69	67	50	12	0,55
25	27	25	20	10	0,07	68	70	68	50	12	0,56
26	28	26	20	10	0,07	69	71	69	50	12	0,57
27	29	27	20	10	0,08	70	72	70	50	12	0,58
28	30	28	20	10	0,08	72	74	72	50	12	0,46
29	31	29	20	10	0,09	75	77	75	50	12	0,51
30	32	30	20	10	0,09	76	78	76	50	12	0,52
31	33	31	25	10	0,11	80	82	80	50	12	0,58
32	34	32	25	10	0,12	85	87	85	50	12	0,65
33	35	33	25	10	0,12	90	92	90	50	12	0,73
34	36	34	25	10	0,13	95	97	95	50	12	0,82
35	37	35	25	10	0,14	100	102	100	50	12	0,91
36	38	36	25	10	0,14	110	112	110	50	12	1,10
37	39	37	25	10	0,15	114	116	114	50	12	1,19
38	40	38	25	10	0,16	120	122	120	50	12	1,32
39	41	39	25	10	0,16	127	129	127	50	12	1,47
40	42	40	25	10	0,17						
41	43	41	30	10	0,19						
42	44	42	30	10	0,20						
43	45	43	30	10	0,21						
44	46	44	30	10	0,22						
45	47	45	30	10	0,23						
46	48	46	30	10	0,23						
47	49	47	30	10	0,24						
48	50	48	30	10	0,25						
49	51	49	30	10	0,26						
50	52	50	30	12	0,26						
51	53	51	40	12	0,32						
52	54	52	40	12	0,33						
53	55	53	40	12	0,33						
54	56	54	40	12	0,34						

136

- Placa antivibraciones

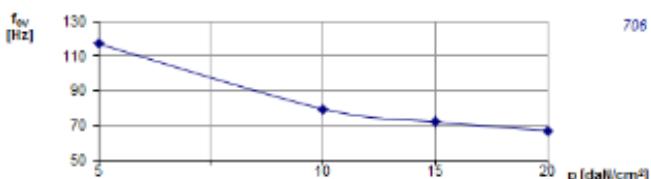
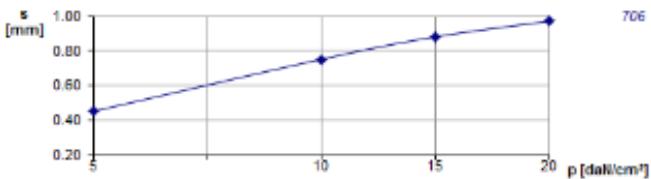
AirLoc
stops vibrations 

Hoja de datos técnicos

AirLoc 706 Núm. art. **3.07051.70**

De aplicación universal, elevada estabilidad a largo plazo.

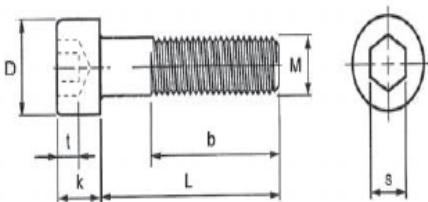
Carga óptima p
10.0 daN/cm²

Informaciones sobre el artículo		Ilustración del artículo											
De aplicación universal, elevada estabilidad a largo plazo.													
Tipo	706	Longitud L [mm]	1000										
Nombre	AirLoc 706	Ancho B [mm]	500										
Núm. art.	3.07051.70	Espesor de placa sin carga [mm]	3										
Color	verde amarillento	Plattenstärke Toleranz es	DIN 7715/T5/P3										
Características técnicas		Dimensiones											
Perfil	una cara	Longitud L [mm]	1000										
Dureza [° Shore A]	70 - 75	Ancho B [mm]	500										
Carga p de [daN/cm ²]	5.0	Espesor de placa sin carga [mm]	3										
Carga p a [daN/cm ²]	20.0	Plattenstärke Toleranz es	DIN 7715/T5/P3										
Carga óptima p [daN/cm ²]	10.0												
Frecuencia propia vertical f_v con carga óptima [Hz]	79.5												
Frecuencia propia horizontal f_h con carga óptima [Hz]	22.5												
Tolerancia frecuencia propia +/- [Hz]	10%												
Proporción de amortiguación vert. D con carga óptima [%]	32.8												
Tolerancia +/-	10%												
Coeficiente de fricción sobre hormigón de acabado fino	0.85												
Coeficiente de fricción tolerancia +/-	0.1												
Peso [kg]	2.8												
Margen de temperatura													
Margen de temperatura de [°C]	-15												
Margen de temperatura hasta [°C]	100												
Diagrama frecuencia propia vertical													
 <p>706</p> <p>f_v [Hz] 130 5</p> <p>p [daN/cm²] 1000</p> <table border="1"> <caption>Data points for Diagrama frecuencia propia vertical</caption> <thead> <tr> <th>p [daN/cm²]</th> <th>f_v [Hz]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>115</td></tr> <tr><td>10</td><td>75</td></tr> <tr><td>15</td><td>70</td></tr> <tr><td>20</td><td>68</td></tr> </tbody> </table>				p [daN/cm ²]	f_v [Hz]	5	115	10	75	15	70	20	68
p [daN/cm ²]	f_v [Hz]												
5	115												
10	75												
15	70												
20	68												
<p>Tolerancia frecuencia propia vertical f_v +/- 10% [Hz]</p>													
Diagrama compresión													
 <p>706</p> <p>s [mm] 1.00 0.40</p> <p>p [daN/cm²] 1000</p> <table border="1"> <caption>Data points for Diagrama compresión</caption> <thead> <tr> <th>p [daN/cm²]</th> <th>s [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0.40</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.85</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.95</td></tr> </tbody> </table>				p [daN/cm ²]	s [mm]	5	0.40	10	0.75	15	0.85	20	0.95
p [daN/cm ²]	s [mm]												
5	0.40												
10	0.75												
15	0.85												
20	0.95												
<p>Tolerancia Compresión s +/- 10%</p>													

- Tornillería**

DIN 912

HEXAGON SOCKET HEAD SCREWS
TORNILLOS CILÍNDRICOS CON EXÁGONO INTERIOR
Calidades/Grades 8,8 - 12,9

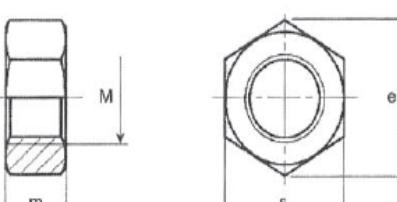


Medidas sobre esta linea, rosca hasta la cabeza
Measures over this line with thread until head

Medidas	M-3	M-4	M-5	M-6	M-8	M-10	M-12
D	5,5	7	8,5	10	13	16	18
k	3	4	5	6	8	10	12
f	2,5	3	4	5	6	8	10
v	1,3	2,2	2,9	3,05	4,5	5,9	7
b (L<200)	18	20	22	24	28	32	36
b (L>200)						45	49
Longitudes comerciales en milímetros/Commercial lengths in millimeters							
de/from	6	6	8	8	10	16	20
hasta/up to	20	25	25	30	35	40	50
de/from	25	30	30	35	40	45	55
hasta/up to	40	100	100	120	200	300	300

DIN 934

HEXAGON NUTS
TUERCAS HEXAGONALES
Calidades/Grades 4 - 8 - 10



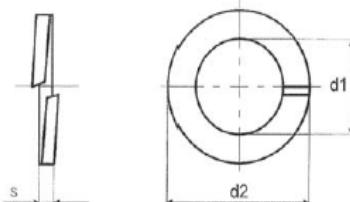
Medidas	M-2	M-2,5	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
s	5	6	7	8	9	10	12
m	1,4	1,8	2	2,35	2,55	2,85	3,35
e min.	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z3

Medidas	M-8	M-10	M-12	M-14	M-16	M-18	M-20
s	13	17	19	22	24	27	30
m	6,5	8	10	11	13	15	16
e min.	14,38	18,9	21,1	24,69	26,75	30,14	33,53

Medidas	M-22	M-24	M-27	M-30	M-33	M-36	M-39
s	32	36	41	46	50	55	60
m	18	19	22	24	26	29	31
e min.	35,72	39,98	45,63	51,28	55,8	61,31	66,96

Medidas	M-42	M-45	M-48	M-52	M-56	M-60
s	65	70	75	80	85	90
m	34	36	35	42	45	48
e min.	72,61	78,26	83,91	89,56	95,07	100,72

DIN 127/B SPRING LOC WASHERS ARANDELAS "GROWER"

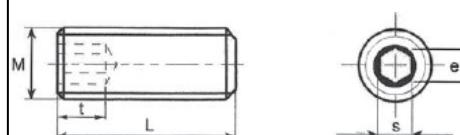


Medidas	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
d1 mín.	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1
d2 máx.	6,2	7,6	9,2	11,8	12,8	14,8
s	0,8	0,9	1,2	1,6	1,6	2

Medidas	M-10	M-12	M-14	M-16	M-18
d1 mín.	10,2	12,2	14,2	16,2	18,2
d2 máx.	18,1	21,1	24,1	27,4	29,4
s	2,2	2,5	3	3,5	3,5

Medidas	M-20	M-22	M-24	M-27	M-30
d1 mín.	20,2	22,5	24,5	27,5	30,5
d2 máx.	33,6	35,9	40	43	48,2
s	4	4	5	5	6

DIN 913 HEXAGON SOCKET SET SCREWS WITH FLAT POINT VARILLAS ROSCADAS CON HEXÁGONO INT. Y EXTR. CÓN
Calidades/Grades 45H



Medidas	M-3	M-4	M-5	M-6	M-8	M-10	M-12
s	1,5	2	2,5	3	4	5	6
e mín.	1,73	2,3	2,87	3,44	4,58	5,72	6,86
t mín	2	2,5	3	3,5	5	6	8
d1 máx.	2	2,5	3,5	4	5,5	7	8,5

Longitudes comerciales en milímetros/Commercial lenghts in millimeters

de/from	3	3	4	5	6	8	10
hasta/up to	30	40	50	60	100	100	100

Medidas	M-14	M-16	M-18	M-20	M-22	M-24
s	6	8	10	10	12	12
e mín.	6,86	9,15	11,43	11,43	13,72	13,72
t mín	9	10	11	12	13,5	15
d1 máx.	10	12	13	15	17	18

Longitudes comerciales en milímetros/Commercial lenghts in millimeters

de/from		16		20		25
hasta/up to		100		100		100

DIN 963

d mm.	M2	M2,5	M3	M4	M5	M6
D mm.	3,8	3,8	4,7	5,6	7,5	9,2
K mm.	1,2	1,2	1,5	1,65	2,2	2,5
Punta atornillador	0,5x3,0	0,6x3,5	0,8x4,0	1,0x5,5	1,2x6,5	1,6x8,0

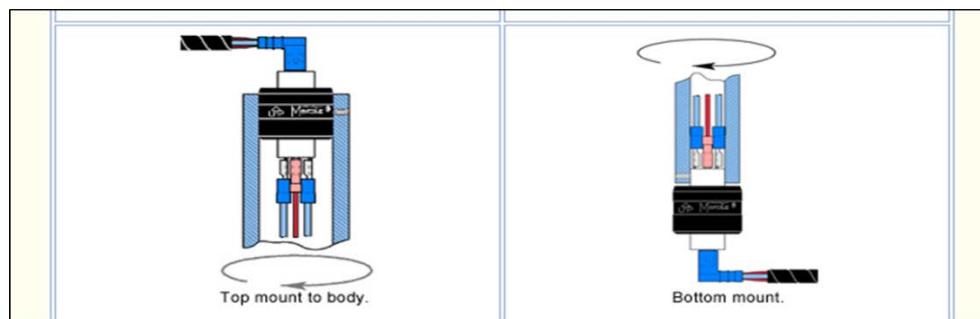
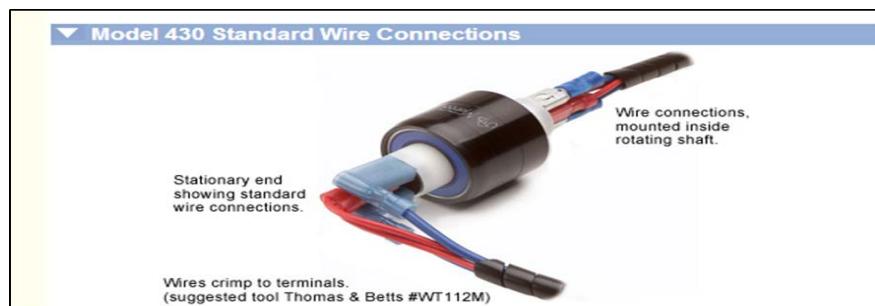
**Tornillo DIN 7985 M3x12 mm. de titanio gr. 2 (puro)**

Tornillo DIN 7985 M3x12 mm. de titanio gr. 2 (puro)

**DETALLES**

Tornillo DIN 7985 M3x12 mm. de titanio gr. 2 (puro)

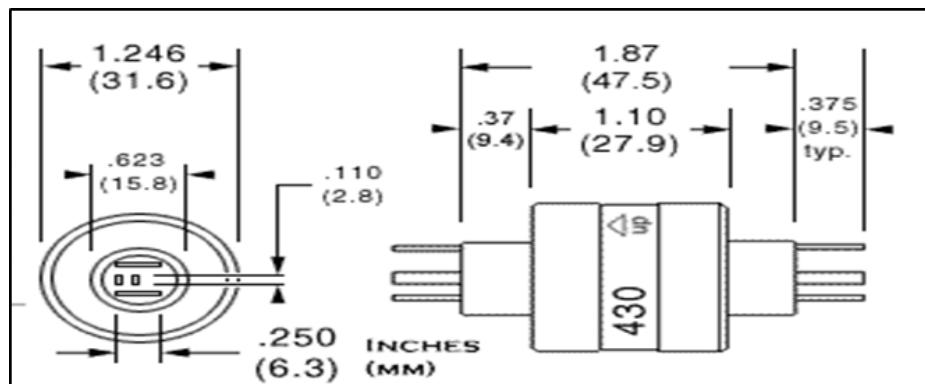
- **Conector Rotatorio Mercotac**



Mercotac model 430 is ideal for heated roller applications, where connecting to sensitive thermocouple signals and simultaneously powering the heater are required.

Model No.	Terminals	Voltage AC/DC	Amp Rating @240VAC	Max. Freq. MHz	Contact Resistance	Max. RPM	Temp Max. F (C) / Min. F (C)	Rotation Torque (gm-cm)	Circuit Separation
430	4	0-250	2@4/2@30	100	<1mΩ	1200	140 (60) /-20(-29)	400	>25M Ω
430-SS	4	0-250	2@4/2@30	100	<1mΩ	1200	140 (60) /-20(-29)	400	>25M Ω

"SS" designator indicates stainless steel ball bearing (recommended for wet or corrosive environments)



- Datasheet Driver AllMotion**



General Specifications

Supply Input	9-30V 4A Examples: Digikey part 102-1337-ND or 62-1047-ND (enclosed)
Dimensions	2.25" X 2.25" (57mm X 57mm) square, .6" (15mm) thick
Step Resolution/speed	1/16 microstep; 59000 microsteps/second
Operating Modes	PC controlled or standalone
PC Control	Up to 16 controllers can be daisy-chained together.
Communications Protocol	USB and RS485. Direct USB and RS485 connections built in. Provision built in for future addition of CAN protocol.
Control Protocol	Compatible with devices that use the Cavo DT or OEM protocol. Can use EZCommander™ Windows application or serial terminal program such as HyperTerminal to issue ASCII text-based commands.
Motor Compatibility	Typically compatible with any stepper motor that is 3" or smaller (size 23 or smaller). Outputs can regulate to any motor voltage via software commands.
Mating Connectors	AMP MTA 100 series. Recommended tools: Digikey A9982; or (better) A1968 + A2031
Digital/Analog Interface	Accepts 10 opto-electronic or 12 mechanical switch inputs, or 4 mechanical switch inputs. Also 12 ADC inputs. ADC inputs accurate to 7 bits; can be modified to 10 bit (contact factory).
	Signal Levels: <0.8V Vlow; >2V Vhigh (TTL compatible). Threshold set at 1.23V; can be changed via programming.
	Optical switch specifications: Transistor optical switch with IC> 1 mA @ IF=20mA. Examples: Digikey QVA11134 or H21A1; Honeywell HOA1867-012 or HOA1870-33 (prewired); OPTEK OPB830W11 (prewired).
5V Output Current	<200mA (power available for encoders and sensors)
Encoder Interface	Max. freq. 4 MHz, 5V signals (3.3V upon special request)
Operating Temperature	-20 to 85°C PCB copper temperature
Relative Humidity	10% to 90% non condensing (operating and storage)

DIGITAL I/O CONNECTOR

Mating connector: AMP MTA 100 Series 8 pin, 26 GA, part 3-843815-8 Digikey part A31030-ND

Pin	Function	Notes
1	Switch input #2, A/D Input #2	10k Ω pullup to 3.3V. Switch closure is to ground.
2	Switch input #1, A/D Input #1	10k Ω pullup to 3.3V. Switch closure is to ground.
3	Opto sensor #2 LED	See Note 1.
4	Opto sensor #2 Input, A/D Input #4, switch	10k Ω pullup to 3.3V. Switch closure is to ground.
5	Opto sensor #2 ground	Common Input ground
6	Opto Sensor #1 LED	See Note 1.
7	Opto Sensor #1 Input, A/D Input #3, switch	10k Ω pullup to 3.3V. Switch closure is to ground.
8	Opto sensor #1 ground	Common Input ground

ENCODER CONNECTORS (2)

Mating connector: AMP MTA 100 Series 6 pin, 28 GA, part 3-843815-6 Digikey part A31027-ND

Pin	Function	Notes
1	Ground	Ground for encoder
2	Index	Input from encoder. High level must be >4.5V (external pullups may be required).
3	Chan A	Input from encoder. See comment for Pin 2.
4	+5V (V+)	Power to encoder
5	Chan B	Input from encoder. See comment for Pin 2.

POWER OUTPUT DRIVERS CONNECTOR

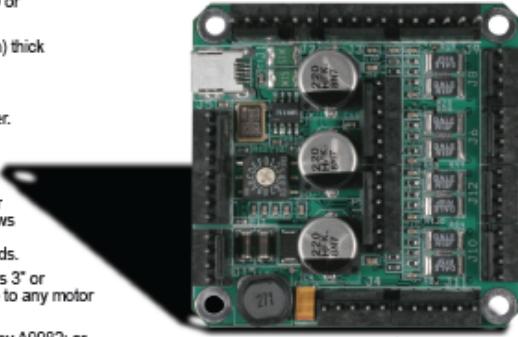
Mating connector: AMP MTA 100 Series 4 pin, 22GA, part 3-843813-4 Digikey part A31108-ND

Pin	Function	Notes
1	ON/OFF Driver #2 (V-)	Open collector
2	ON/OFF Driver #2 (V+)	2A peak; 1A continuous
3	ON/OFF Driver #1 (V-)	Open collector
4	ON/OFF Driver #1 (V+)	2A peak; 1A continuous

Note 1: Each LED sensor input includes a series 200 Ω resistor to 5V. Resistor can be removed for sensors needing direct access to 5V. Max current draw is <200mA.

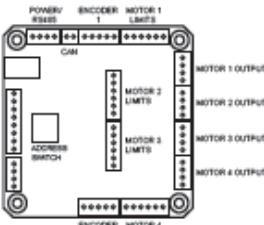
EZStepper Model EZ4AXIS

Intelligent 4-axis Controller/Driver with Dual Encoder Feedback



Model EZ4AXIS actual size

For rapid implementation of multi-axis stepper motor solutions in products requiring automation. Controls four fully independent stepper motors.



POWER AND RS485 COMMUNICATION

Mating connector: AMP MTA 100 Series 4 pin, 22 GA, part 3-843813-4 Digikey part A31108-ND

Pin	Function
1	V+ (external supply) +9-30V
2	GROUNDS
3	RS485 B
4	RS485 A

MOTOR OUTPUT CONNECTORS (4)

Mating connector: AMP MTA 100 Series 4 pin, 22 GA, part 3-843813-4 Digikey part A31108-ND

Pin	Function
1	Motor A+
2	Motor A-
3	Motor B+
4	Motor B-

MOTOR LIMIT CONNECTORS (4)

Mating connector: AMP MTA 100 Series 4 pin, 22 GA, part 3-843813-4 Digikey part A31108-ND

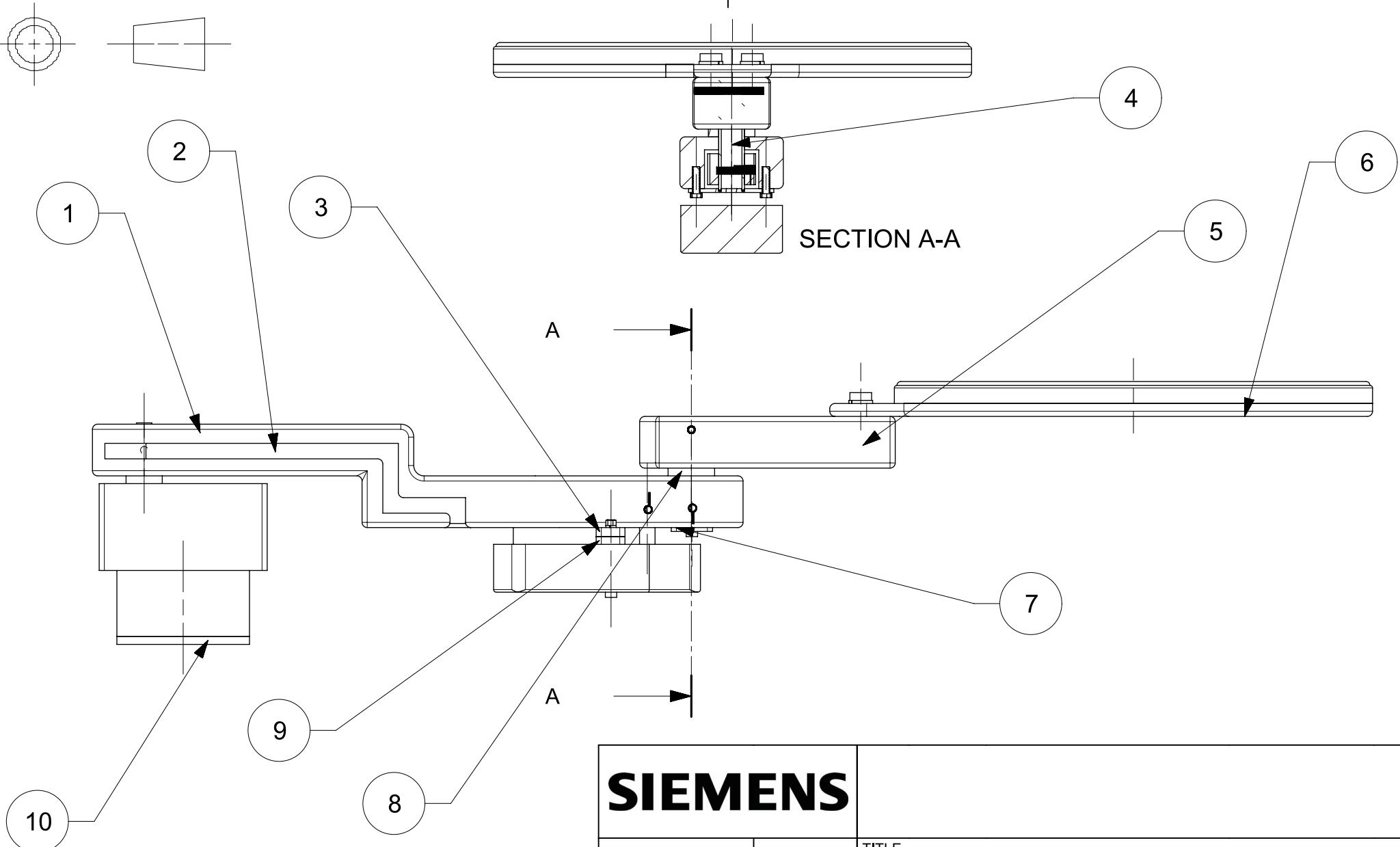
Pin	Function	Notes
1	Upper Limit Power	Typically optical sensor LED. See Note 1.
2	Upper Limit In	Optical sensor/switch to ground
3	GROUNDS	Ground
4	Lower Limit Power	Typically optical sensor LED. See Note 1.
5	Lower Limit In	Optical sensor/switch to ground
6	GROUNDS	Ground

Anexo G. PLANOS

En este Anexo se encuentran los planos realizados para la fabricación de las piezas en los talleres de mecanizado.

Se incluye primero un plano de conjunto en el que se numeran todas las piezas que se van a mecanizar y a continuación un plano acotado de cada una de ellas siguiendo el orden de numeración dado. El sistema de brazos robóticos utilizado para el plano de conjunto es el sistema número 2, ya que excepto los brazos y la placa del cable, todos los elementos son comunes entre ellos.

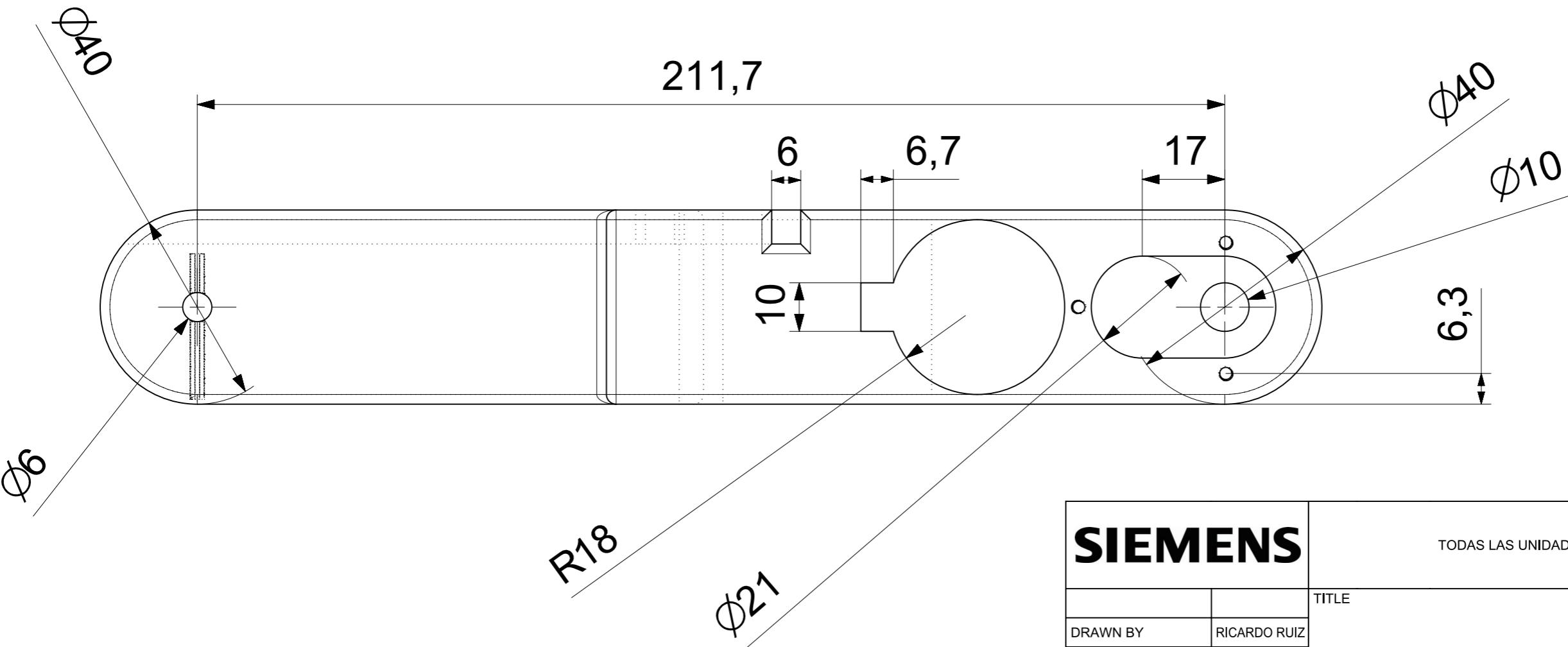
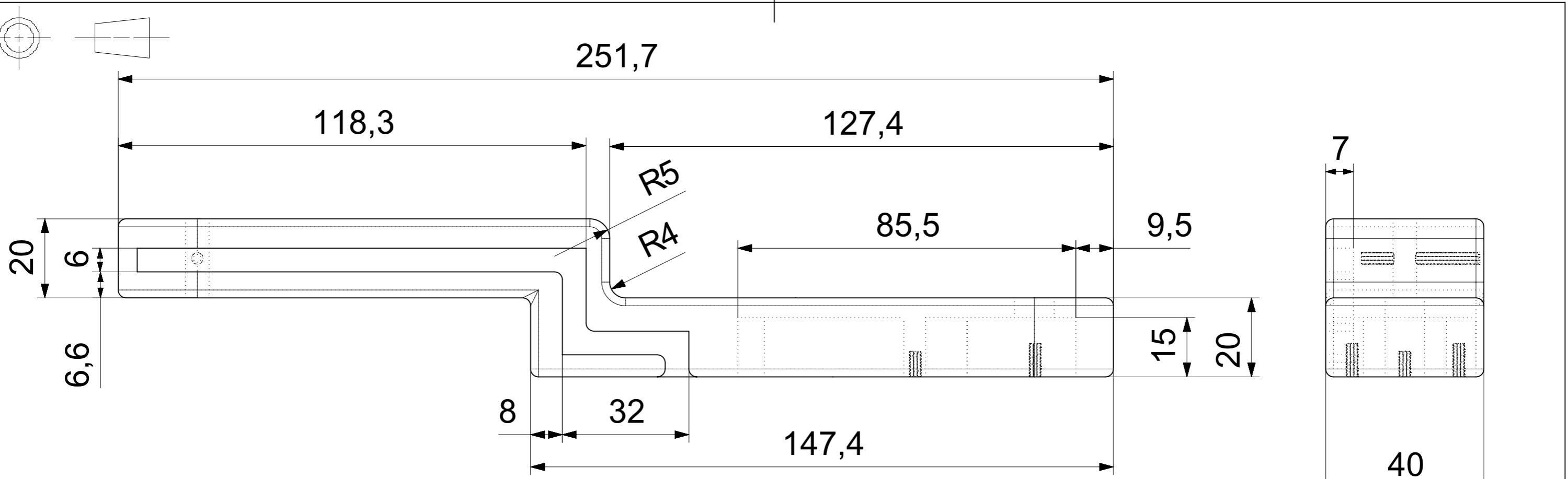
Se añaden finalmente los planos de las piezas no comunes de los sistemas de brazos robóticos 1 y 3 (placa cable, brazo principal y brazo portainductor), un plano con las diferentes alturas del brazo, y un plano de todo el prototipo completo en el que se acotan los puntos de anclaje de los 3 sistemas de brazos en el bastidor.



Nota:

Todos los redondeos de las aristas no indicados expresamente en los planos, tienen un valor de 2mm.

SIEMENS			
		TITLE	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ		
ESCALA	1:2		
		SIZE	DRG NO.
		A4	EnsambleBrazo2



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

TITI

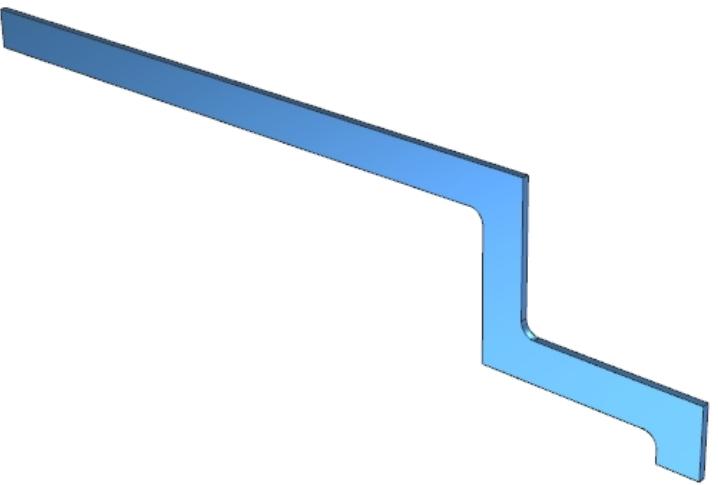
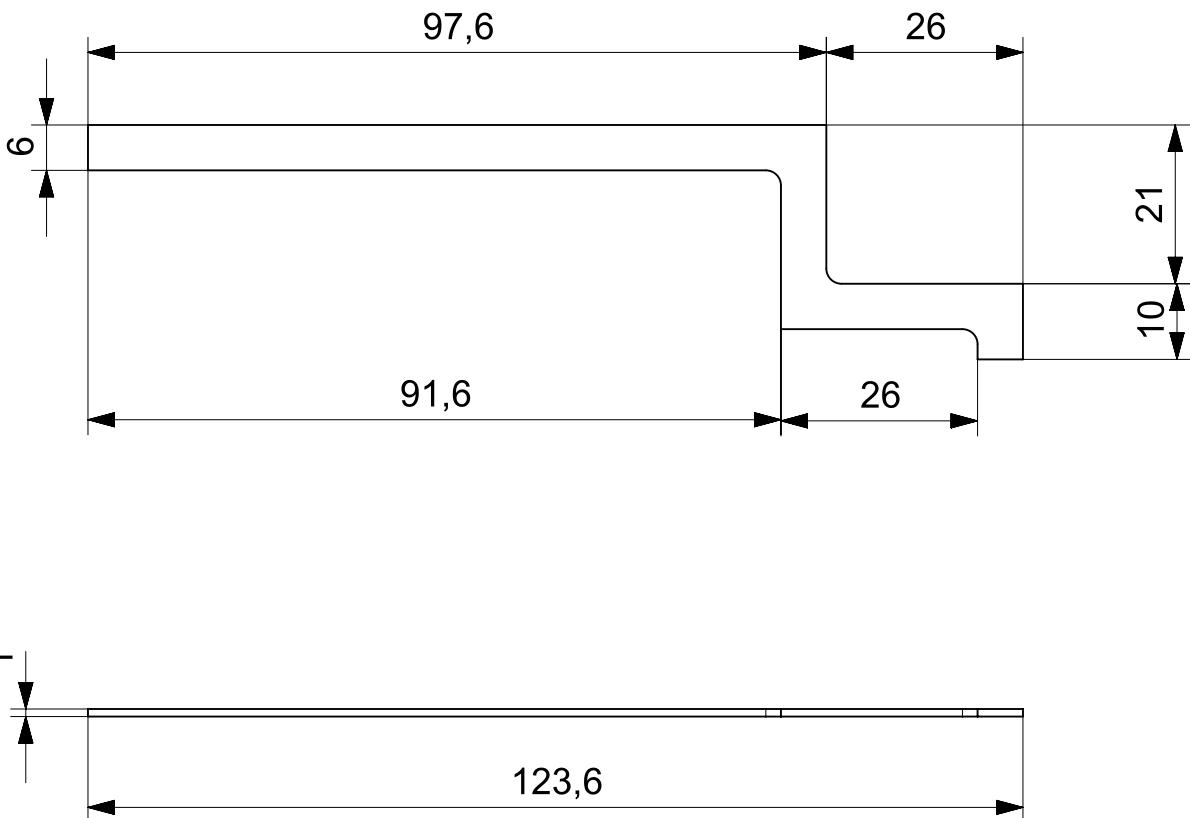
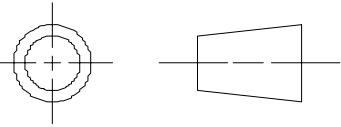
DRAWN BY RICARDO R

ESCALA 1:1

NUMERO PIEZA 1

BRAZO 2 PRINCIPAL

Brazo2 ZAluminio



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

NUMERO PIEZA 2

TITLE

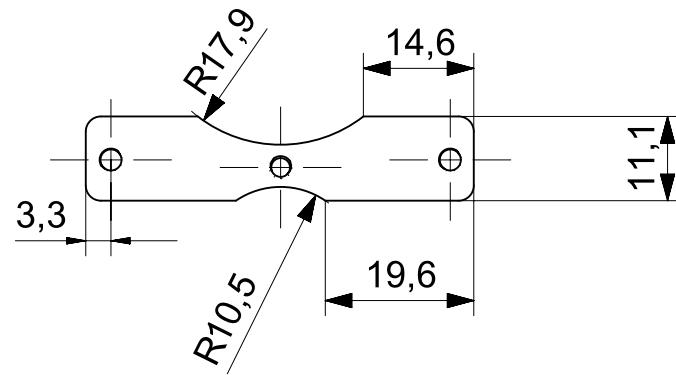
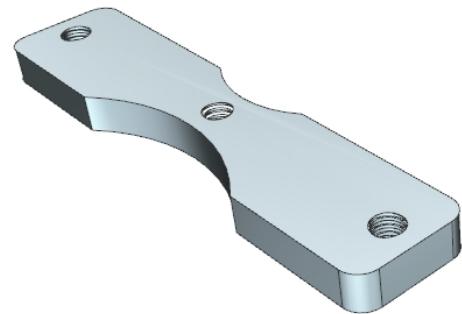
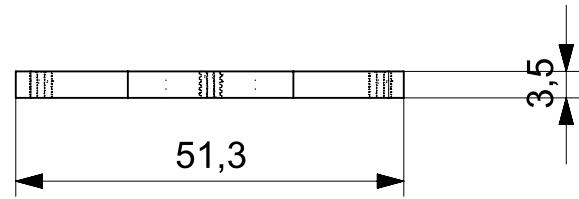
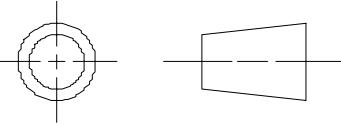
PLACA CABLE BRAZO 2

SIZE

A4

DRG NO.

Brazo2_PlacaTeflon



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

NUMERO PIEZA 3

TITLE

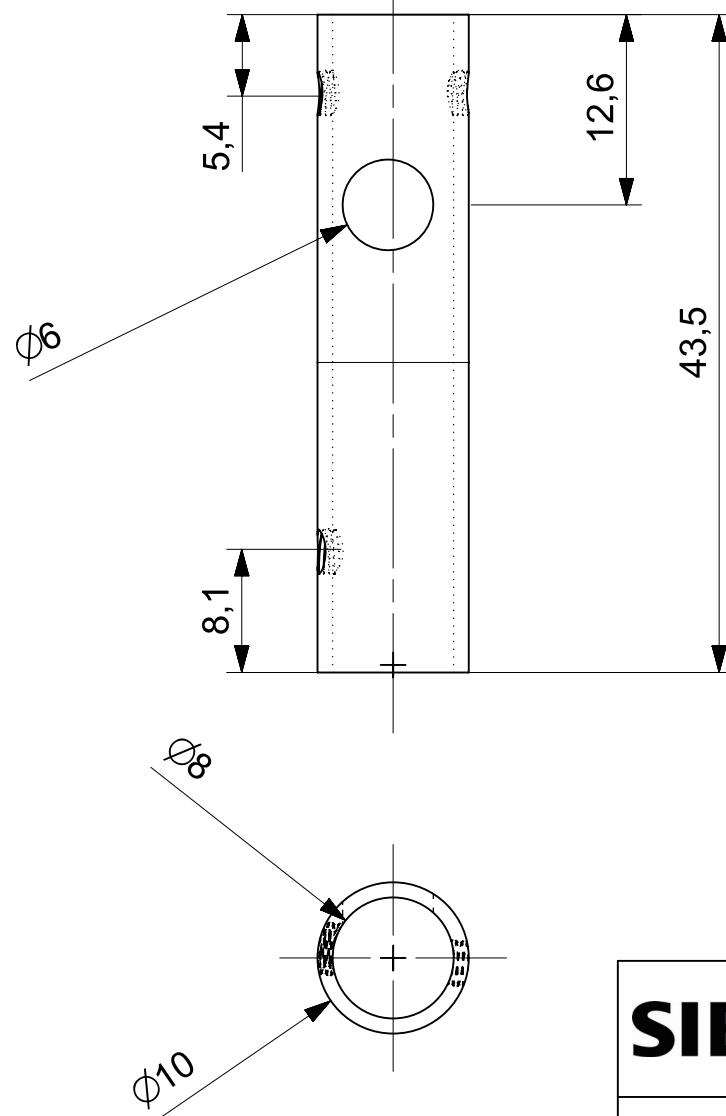
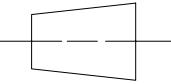
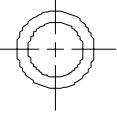
PLACA SUJECCIÓN MOTOR MÓVIL

SIZE

A4

DRG NO.

SujeccionMotorMovil



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 2:1

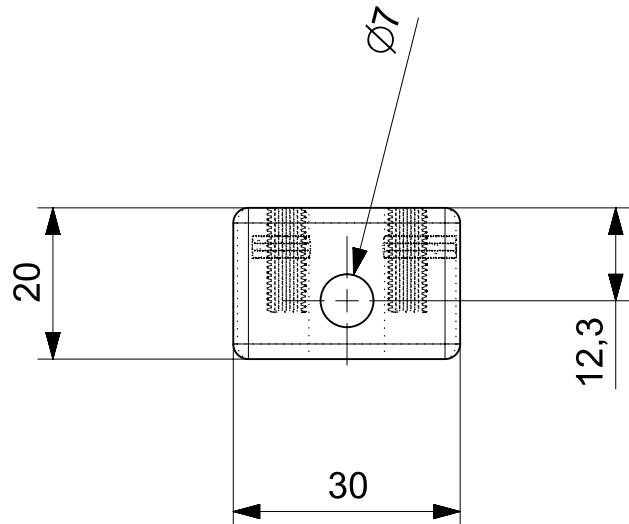
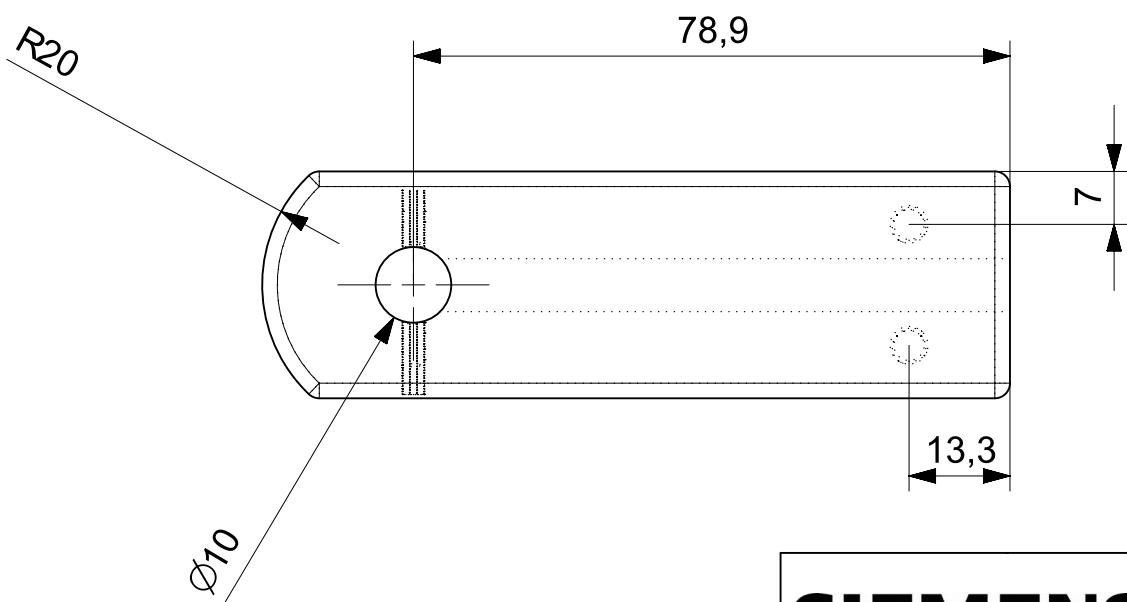
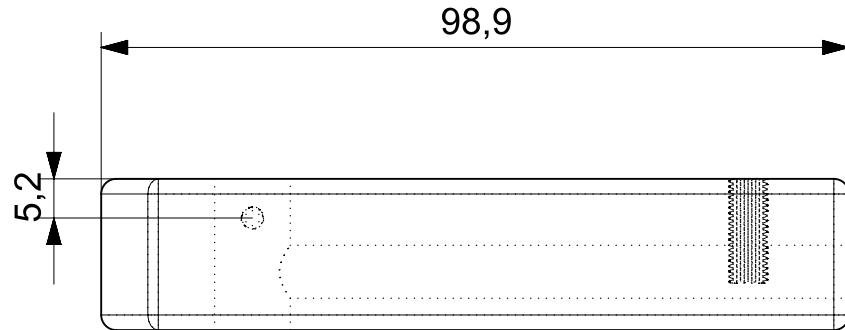
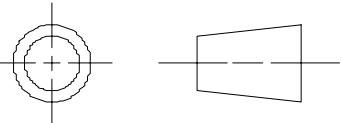
NUMERO PIEZA 4

SIZE A4

DRG NO.

EJE-CASQUILLO

CasquilloD10A43



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

NUMERO PIEZA 5

TITLE

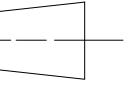
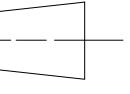
BRAZO 2 PORTAINDUCTOR

SIZE

DRG NO.

A4

Brazo2_PortainductorAluminio



30

12

31

6,7

5

117,5

 $\phi 185$

O

O

III

V

SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

NUMERO PIEZA 6

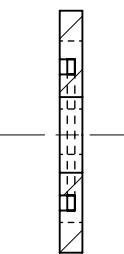
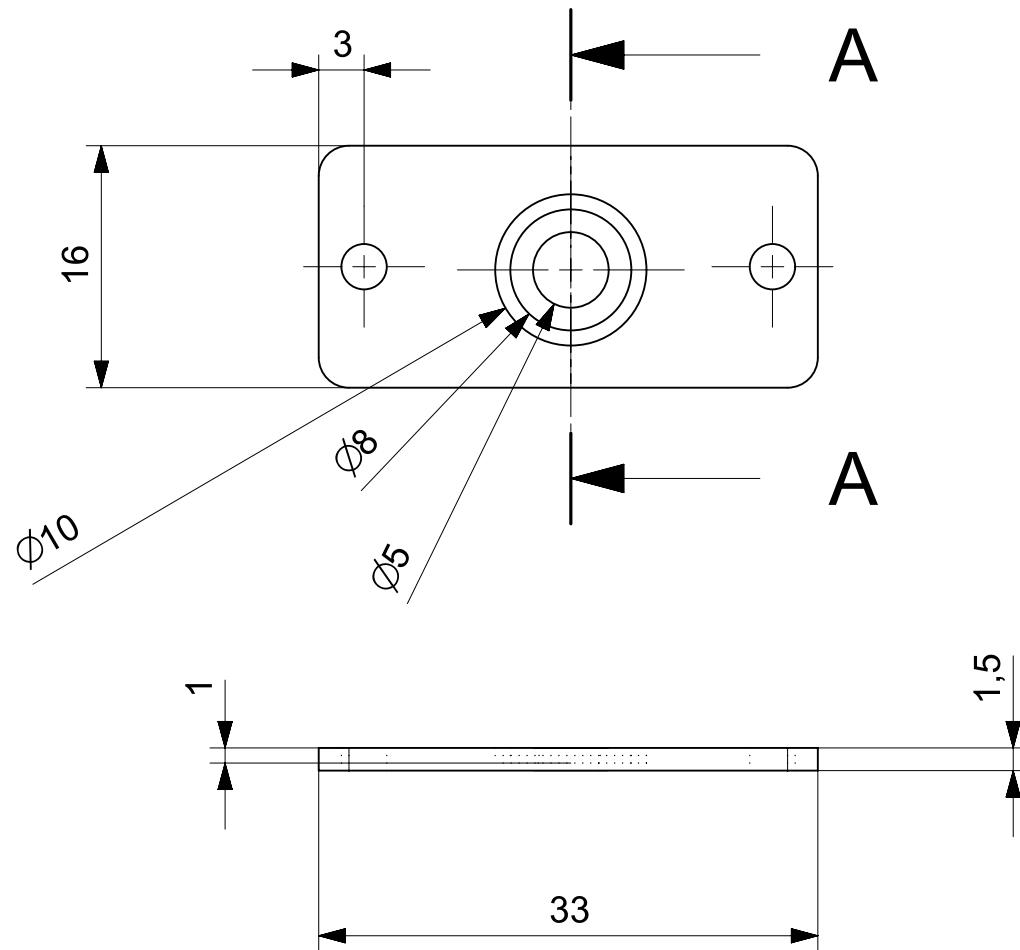
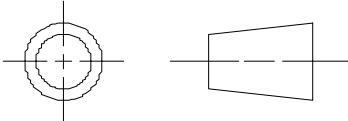
TITLE

SIZE

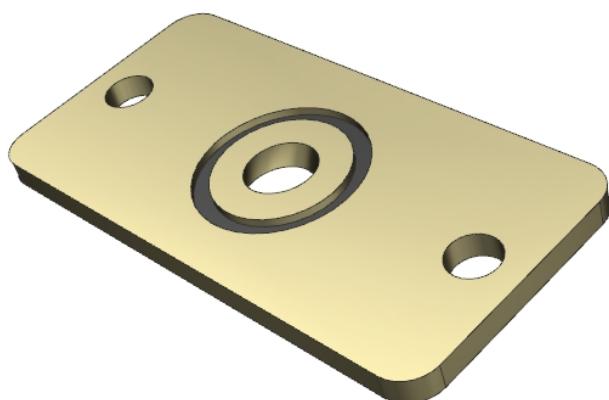
A3

PLACA PORTAINDUCTOR

PlatoPortainductorAluminio



SECTION A-A



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 2:1

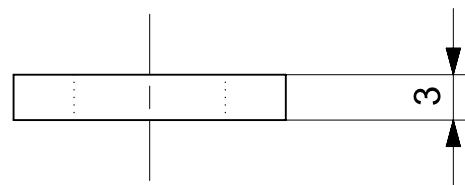
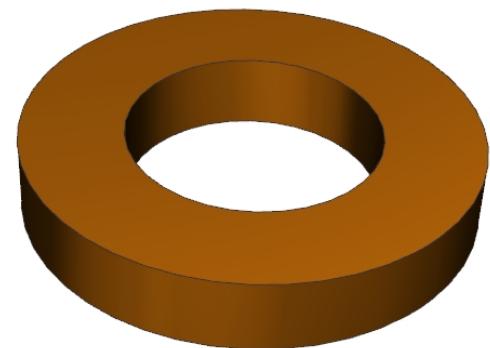
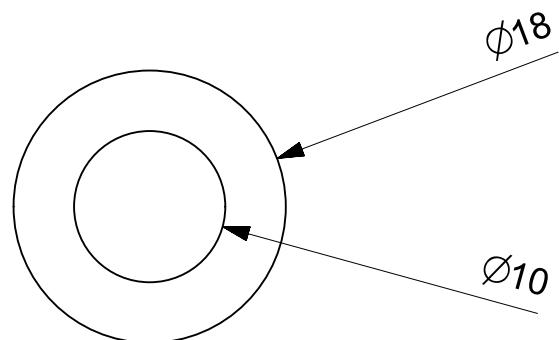
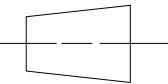
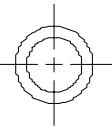
NUMERO PIEZA 7

TITLE

PLACA APOYO CASQUILLO

SIZE A4

SujeccionCasquilloEngranaje



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 2:1

NUMERO PIEZA 8

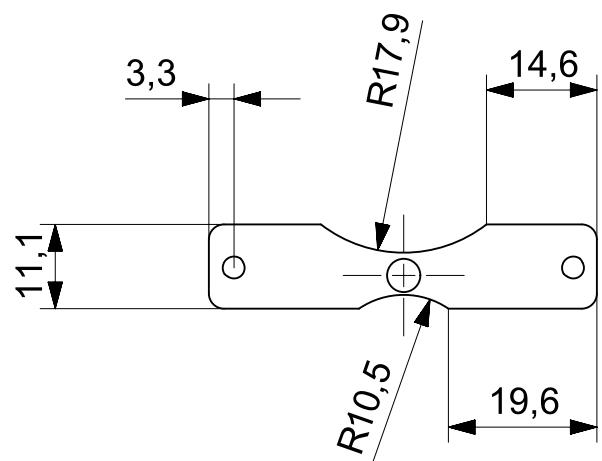
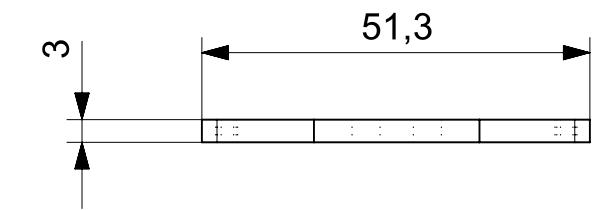
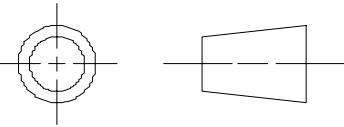
TITLE

ANILLO SEPARACION

SIZE DRG NO.

A4

Casquillo_arandela



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

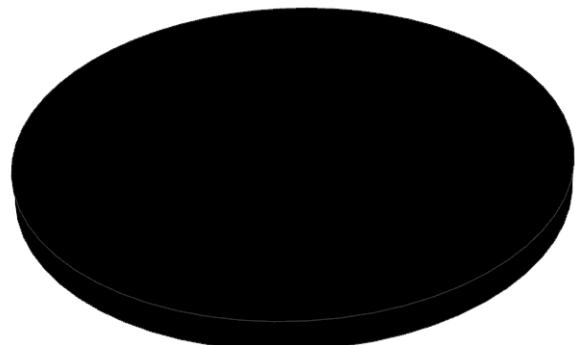
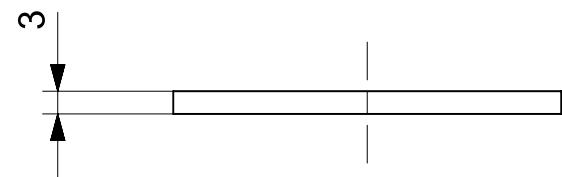
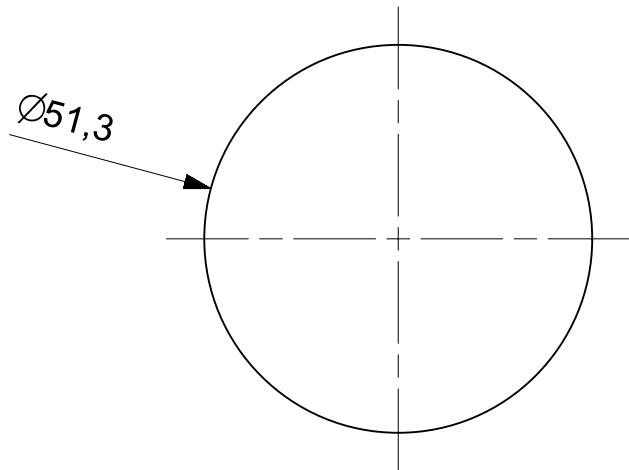
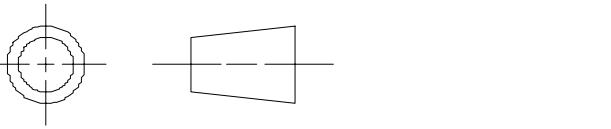
NUMERO PIEZA 9

TITLE

SILENT BLOCK MOTOR MÓVIL

SIZE A4

DRG NO.
SilentBlock_Motormovil



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

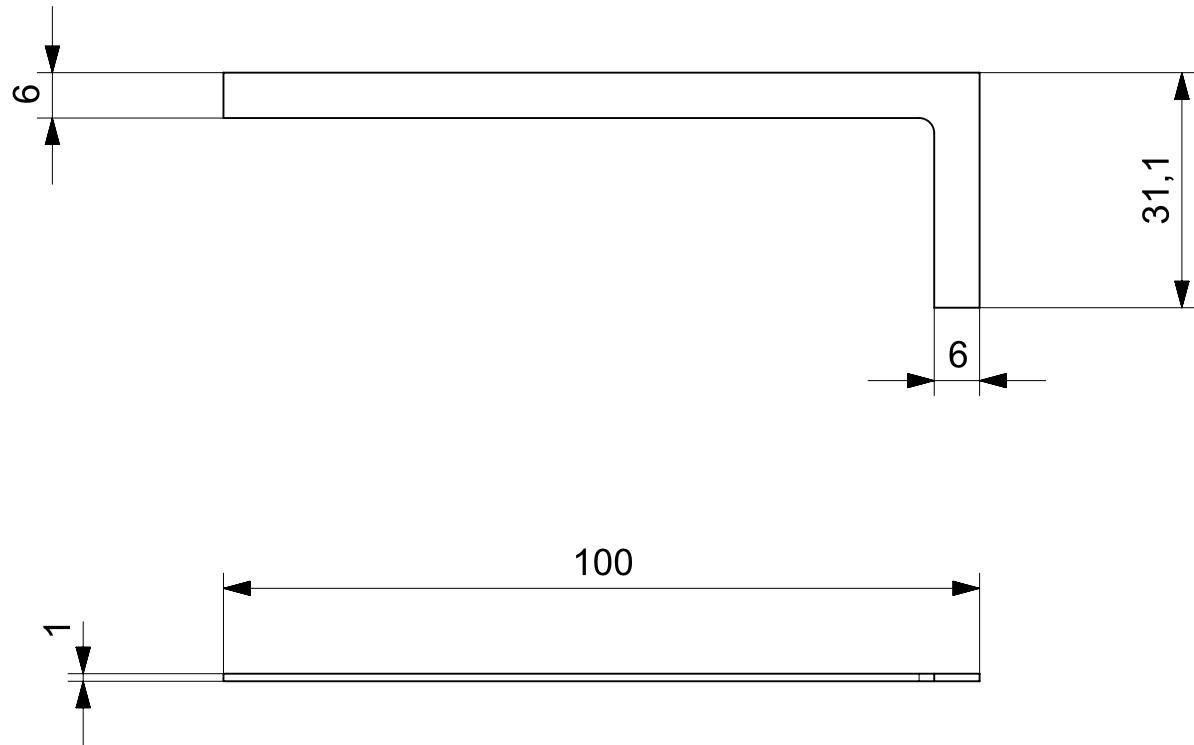
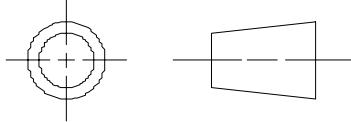
NUMERO PIEZA 10

TITLE

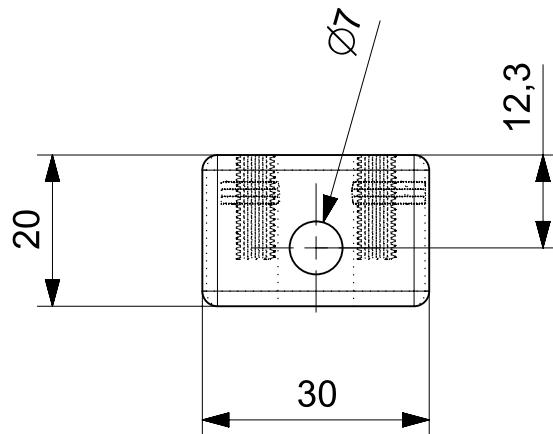
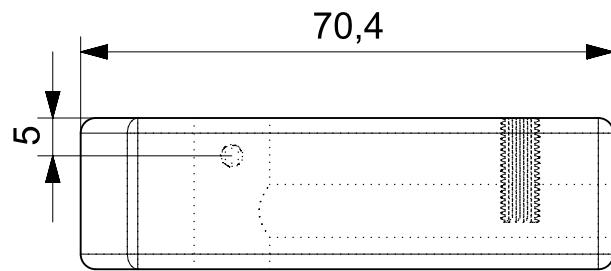
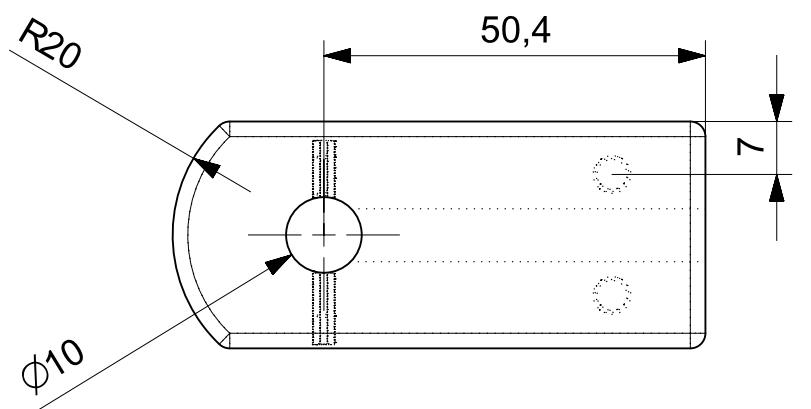
SILENT BLOCK MOTOR FIJO

SIZE A4

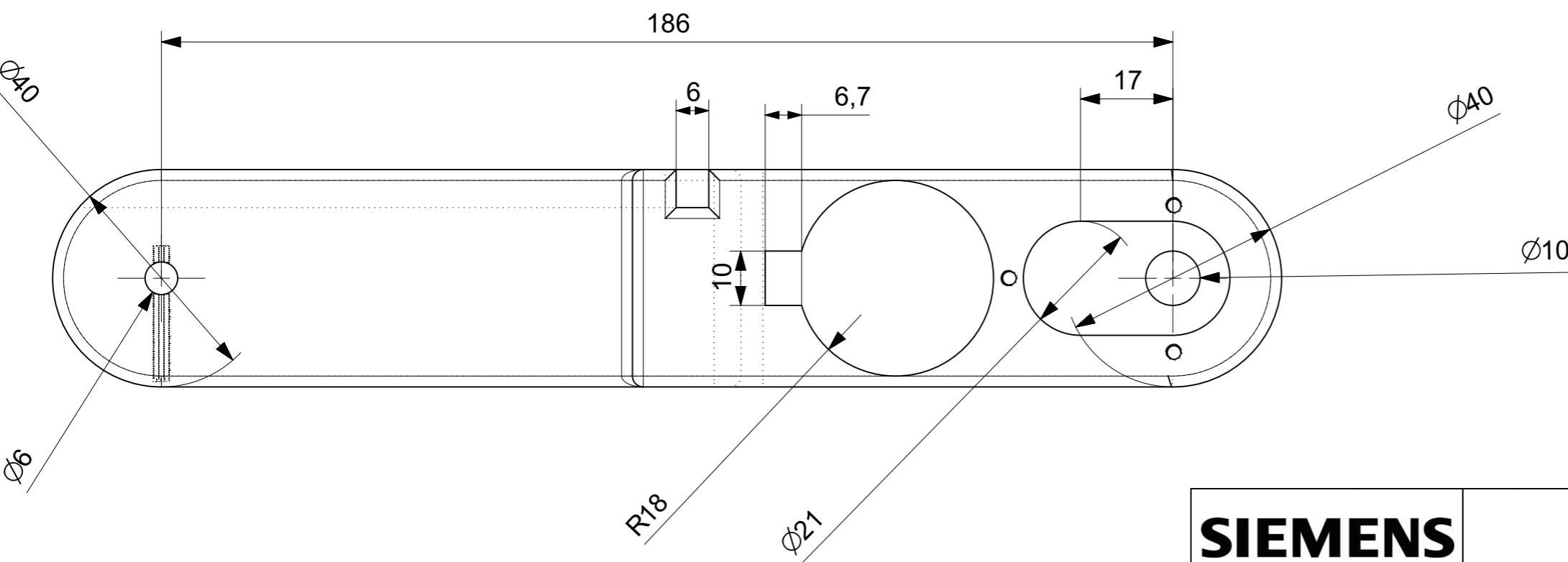
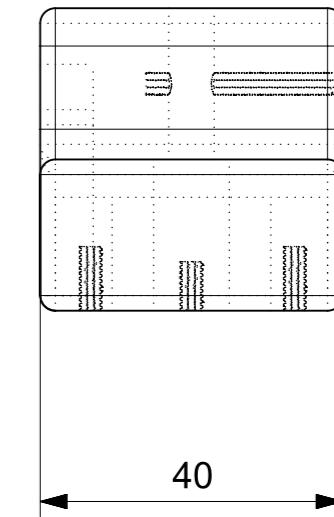
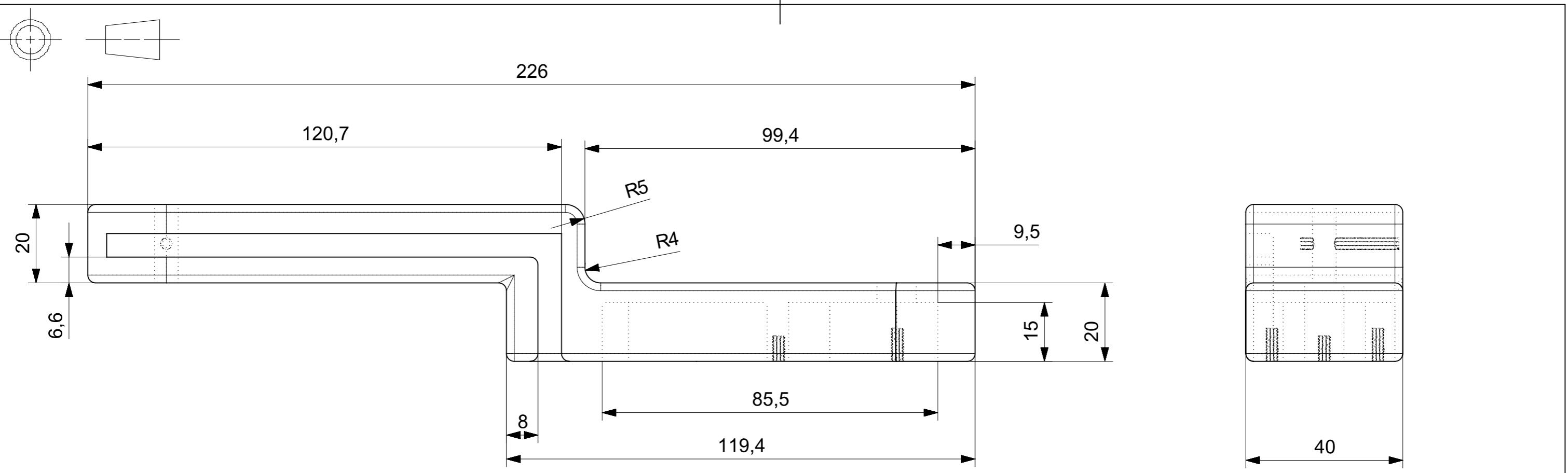
DRG NO. SilentBlock_MotorBastidor



SIEMENS		TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS	
		TITLE	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ		
ESCALA	1:1		
		SIZE	DRG NO.
		A4	Brazo1_PlacaTeflon



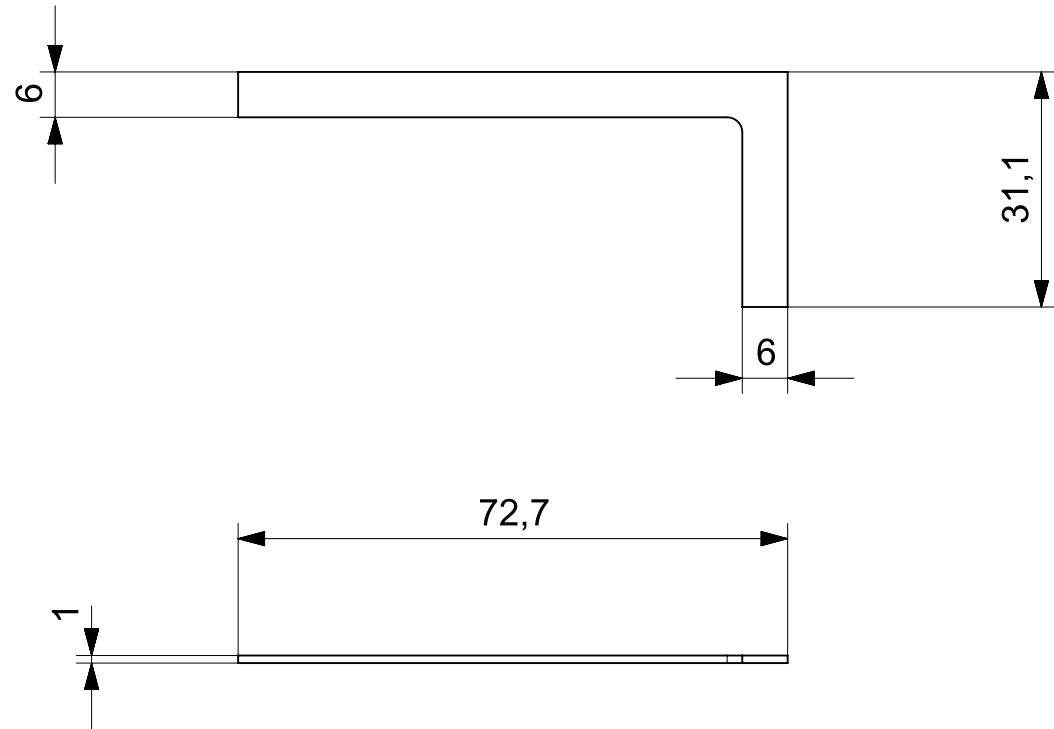
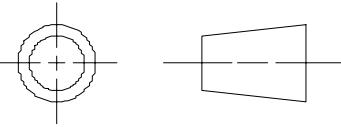
SIEMENS		TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ	TITLE	BRAZO 1 PORTAINDUCTOR
ESCALA	1:1		
		SIZE	DRG NO.
		A4	Brazo1_PortainductorAluminio



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

		TITLE	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ		
ESCALA	1:1		
		SIZE	DRG NO.
		A3	Brazo1_ZAluminio



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:1

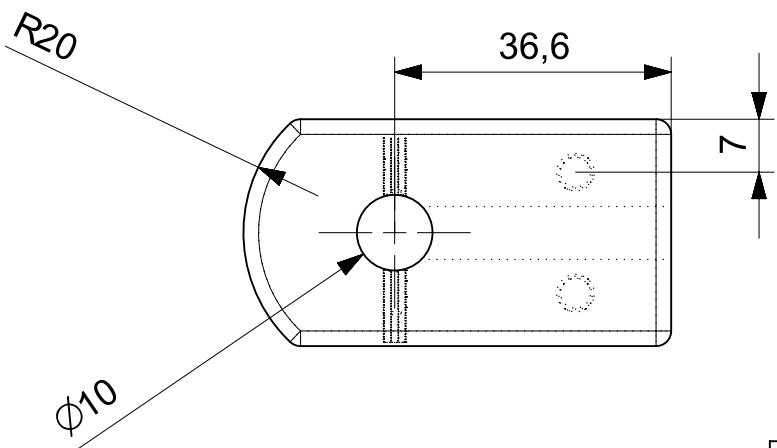
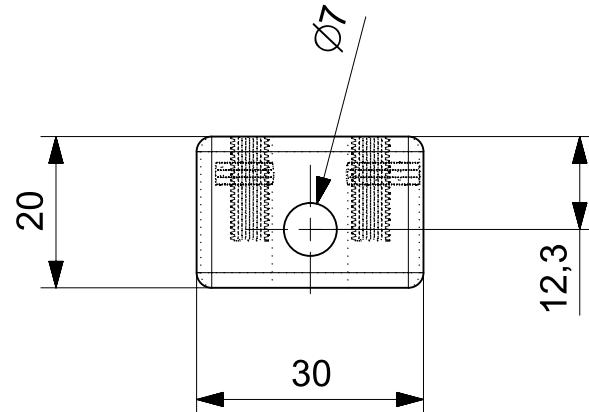
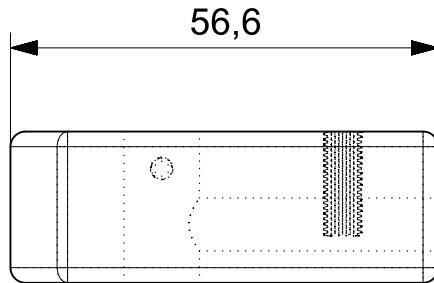
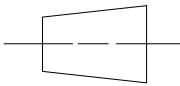
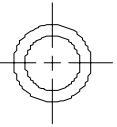
TITLE

PLACA CABLE BRAZO 3

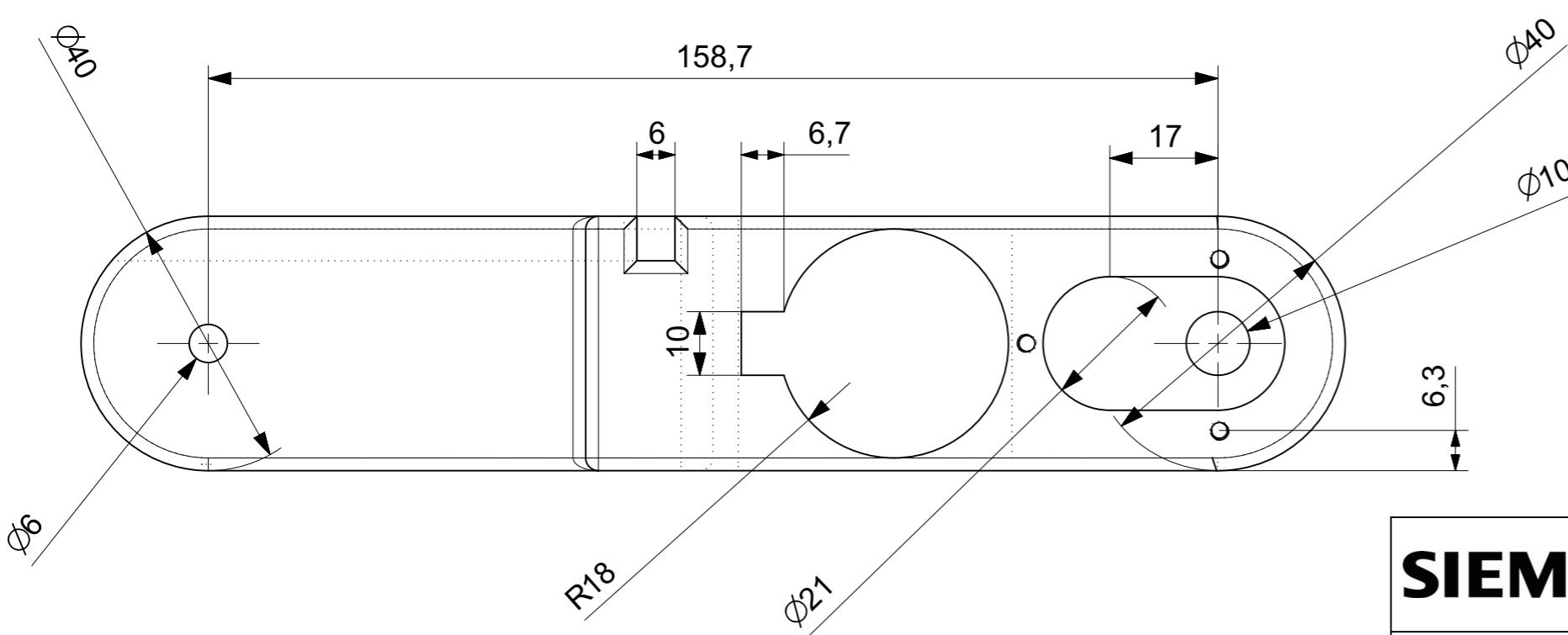
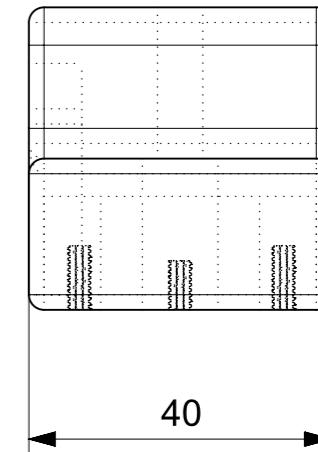
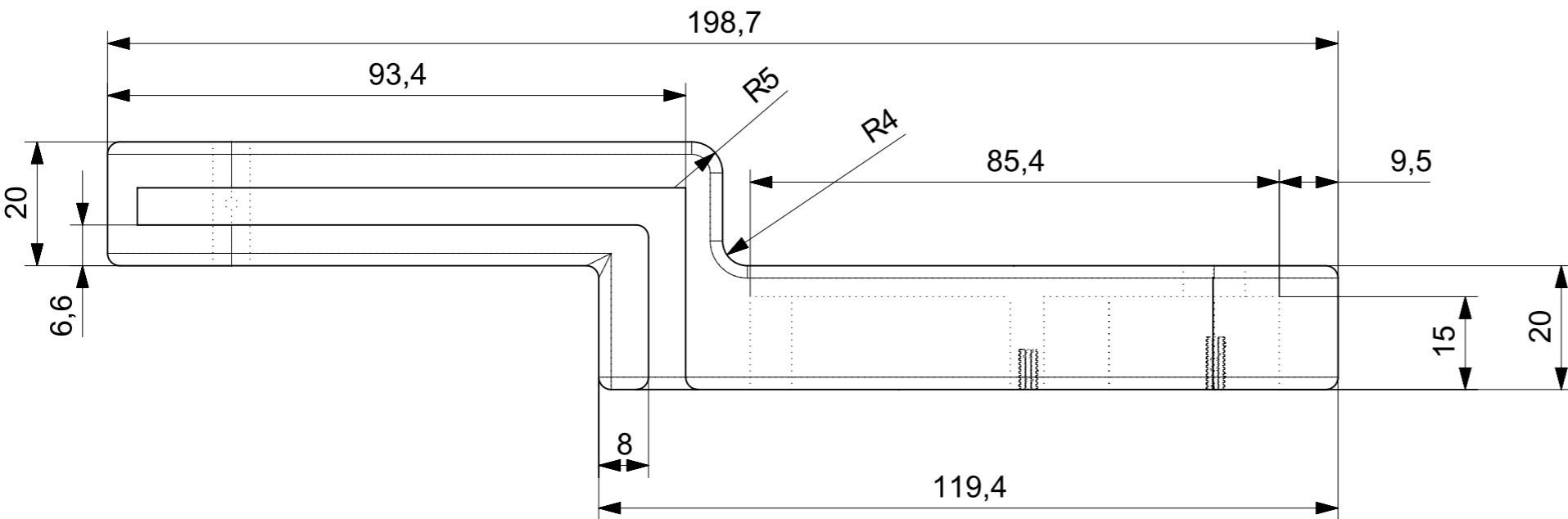
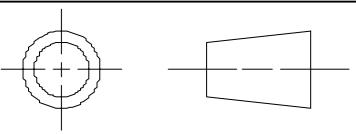
SIZE DRG NO.

A4

Brazo3_PlacaTeflon



SIEMENS		TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ	TITLE	BRAZO 3 PORTAINDUCTOR
ESCALA	1:1	SIZE	DRG NO.
		A4	Brazo3_PortainductorAluminio

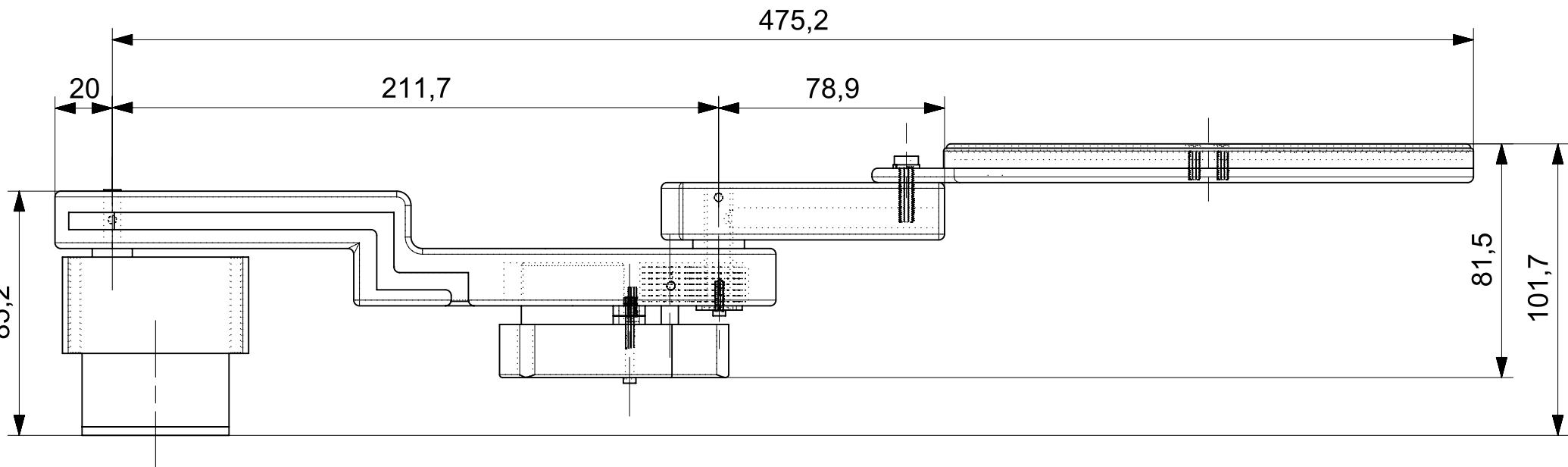
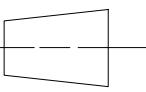
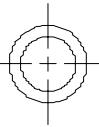


SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

		TITLE	
DRAWN BY	RICARDO RUIZ		
ESCALA	1:1		
		SIZE	DRG NO.
		A3	Brazo3_ZAluminio

BRAZO 3 PRINCIPAL



SIEMENS

TODAS LAS UNIDADES ESTAN EN MILIMETROS

DRAWN BY RICARDO RUIZ

ESCALA 1:2

TITLE

ALTURAS Y DISTANCIA ENTRE EJES

SIZE DRG NO.

A4

EnsambleBrazo2

