



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA  
SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD**

**Autor:**

**Puertas Granja, Rodrigo**

**Tutores:**

**Lorenzana Ibán, Antolín**

**Magdaleno González, Álvaro**

**C.A., I.T., M.M.C. y Teoría de**

**Estructuras**

**Valladolid, junio de 2019**



## **RESUMEN**

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo final el elaborar una mesa sísmica funcional de dos grados de libertad.

A lo largo de este documento se detallan todos los procesos de diseño, fabricación y montaje de cada una de las piezas que forman la mesa vibratoria, así como de los componentes que forman un mando, que va a ser fabricado mediante impresora 3D, para controlar el motor de manera externa.

Además, se realizará todo el cableado necesario entre los componentes del motor, así como entre el motor y el mando que va a hacerlo funcionar.

Finalmente, se pondrá todo el conjunto en funcionamiento y se estudiarán posibles líneas de mejora.

## **PALABRAS CLAVE**

Mesa sísmica, Diseño, Fabricación, Montaje, Estructura.

## **ABSTRACT**

The ultimate objective of this end-of-degree project is the execution of a functional two axis shake table.

In the course of this document, it is detailed the process of design, manufacturing and assembly of all the parts which form the shake table, as well as the components of a remote, which is going to be made by 3D printing, to control externally the engine.

Moreover, the required wiring will be made between the engine components themselves just as the wiring between the engine and the remote which will command it.

Finally, the whole assembly will be put into operation and there will be an investigation about possible areas of improvement.

## **KEY WORDS**

Shake Table, Design, Manufacturing, Assembly, Structure



# CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	5
1.4. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO .....	7
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS .....	9
2.1. OBJETIVOS DE LA MESA .....	11
2.2. OBJETIVOS DEL MANDO .....	11
2.3. OBJETIVOS DE LA CAJA .....	12
CAPÍTULO 3. COMPONENTES COMERCIALES.....	13
3.1. COMPONENTES DE LOS MOTORES .....	13
3.1.1. MOTOR DEL MÓDULO SUPERIOR .....	14
3.1.2. MOTOR DEL MÓDULO INFERIOR .....	18
3.2. COMPONENTES DE LAS GUÍAS .....	21
CAPÍTULO 4. DISEÑO.....	25
4.1. DISEÑO DE LA MESA SÍSMICA .....	25
4.1.1. DISEÑO DE LA UNIÓN MOTOR - PLACA SUPERIOR .....	27
4.1.2. DISEÑO DE LA PLACA SUPERIOR .....	28
4.1.3. DISEÑO DE LA PLACA INFERIOR .....	30
4.1.4. ALIGERAMIENTOS .....	31
4.1.5. DISEÑO DEL ZANCO.....	32
4.1.6. DISEÑO DEL CONJUNTO .....	33
4.2. DISEÑO DEL MANDO .....	36
4.2.1. FORMA GENERAL DEL MANDO .....	36
4.2.2. COMPONENTES DEL MANDO .....	39
4.2.3. CONEXIÓN DEL MANDO.....	39
4.2.4. DISEÑO FINAL DEL MANDO.....	40
4.3. DISEÑO DE LA CAJA .....	42
CAPÍTULO 5. PROTOTIPADO .....	47
5.1. FABRICACIÓN .....	47

5.1.1. FABRICACIÓN DE LA MESA .....	47
5.1.2. FABRICACIÓN DEL MANDO .....	51
5.2. MONTAJE.....	53
5.2.1. MONTAJE MECÁNICO DE LA MESA.....	53
5.2.2. MONTAJE ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	66
5.2.3. MONTAJE DE LA CAJA.....	78
CAPÍTULO 6. PUESTA EN MARCHA .....	81
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	83
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXO I. FACTURAS DE LOS COMPONENTES COMERCIALES .....	87
1. COMPONENTES DEL MOTOR DEL MÓDULO SUPERIOR .....	87
2. COMPONENTES DEL MOTOR DEL MÓDULO INFERIOR.....	88
3. COMPONENTES DE LAS GUÍAS.....	89
ANEXO II. PLANOS.....	91
ANEXO III. CÁLCULO DE LA REDUCTORA DE VOLTAJE.....	101
ANEXO IV. CONFIGURACIÓN DE LOS DRIVERS .....	103

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

A la hora de construir edificaciones hay que tener en cuenta diversos factores para prevenir un fallo de la estructura, tales como la resistencia de los materiales con los que se va a construir dicho edificio, o la resistencia estructural del edificio en conjunto.

En cuanto a resistencia estructural, dicha edificación va a estar afectada por multitud de cargas, ya sean cargas estáticas o cargas dinámicas.

La mayoría de estas cargas están ligadas a acciones climatológicas, como son, por ejemplo, el peso de la nieve sobre una cubierta (carga estática), o la acción del viento sobre el edificio (carga dinámica)

Todas estas acciones hay que tenerlas muy en cuenta a la hora del diseño de un edificio ya que, de no ser así podrían provocar fallos y deformaciones irreversibles en su estructura.

Otro fenómeno natural, además de la climatología, que provoca cargas dinámicas son los terremotos, los cuáles pueden tener consecuencias catastróficas tanto en las estructuras como en la vida humana. Según el Centro de Investigación de Epidemiología de los Desastres Naturales (CRED: *Centre for Research on Epidemiology of Natural Disasters*), en colaboración con la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR o UNDRR: *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*), aunque los terremotos no son el desastre natural que más población afecta (superado por inundaciones y tormentas), sí son el desastre natural que más muertes causa. De acuerdo con estos dos organismos, los seísmos han causado más de 747.000 muertes en todo el mundo en el período de 1998 a 2017. Además, en ese mismo período, se calcula que las pérdidas asociadas a este tipo de desastre natural ascienden a 661 billones de dólares [1].

Estos fenómenos son impredecibles y el tipo de carga que producen tiene un carácter muy aleatorio, por lo que es muy difícil de prevenir sus efectos a la hora de diseñar una edificación.

Por este motivo, hay que realizar ensayos sobre dichas estructuras o edificaciones para comprobar estos efectos. Este es un proceso muy costoso debido a las dificultades que conlleva realizar ensayos a estructuras de este tamaño.

Ante la imposibilidad de realizar ensayos sobre las estructuras reales, surge la necesidad de crear un equipo que permita simular y analizar los efectos devastadores de un terremoto sobre una maqueta de una estructura a escala.

Así se pueden observar y analizar los efectos del seísmo sobre la maqueta y actuar en consecuencia sobre la estructura real, incorporando sistemas de amortiguación o corrigiendo errores de diseño de los edificios que permitan reducir en lo posible el nivel de destrucción de un seísmo, tanto en lo material, como en vidas humanas.

### 1.2. ANTECEDENTES

Una mesa sísmica es, como se mencionado anteriormente, un equipo que permite simular el efecto de un terremoto sobre una maqueta a escala de una estructura. En líneas generales, una mesa vibratoria está compuesta por dos placas: una placa inferior, fija, sobre la que va montada un motor, de cualquier tipo y una placa superior, móvil, sobre la que se van a fijar las estructuras que se quieren analizar.

La placa superior móvil desliza sobre unas guías para no permitir holguras y, por lo tanto, esfuerzos a flexión. Además, está unida a la parte móvil del motor, por lo que se va a desplazar solidaria al movimiento de este cuando sea accionado.

Las mesas sísmicas más sencillas son de un grado de libertad, es decir, con movimiento solo en una dirección, pero existen mesas sísmicas de dos grados de libertad (movimiento en una dirección y en su perpendicular) e incluso de tres grados de libertad (dos direcciones en el plano del suelo y dirección vertical). Por supuesto, para el funcionamiento de una mesa vibratoria se necesitará un motor por cada grado de libertad que se precise.

Uno de los antecedentes y tomado de referencia es la *Shake Table II* (Figura 1) de *Quanser*, que es el estándar mundial en equipos de laboratorio de ingeniería para la enseñanza e investigación [2].

Esta *Shake Table II* es una mesa sísmica de un grado de libertad. El motor que lleva incorporado es un servomotor de alta potencia de 400 W que permite alcanzar una aceleración de 2,5 g ( $24,5 \text{ m/s}^2$ ) cuando la plataforma superior está cargada con una masa de 7,5 kg.

La plataforma superior tiene un recorrido de 15,2 cm (7,6 cm en cada dirección desde el punto central) y se desplaza sobre dos guías de metal endurecido mediante rodamientos lineales. Esto produce un movimiento lineal suave con muy poca deflexión.

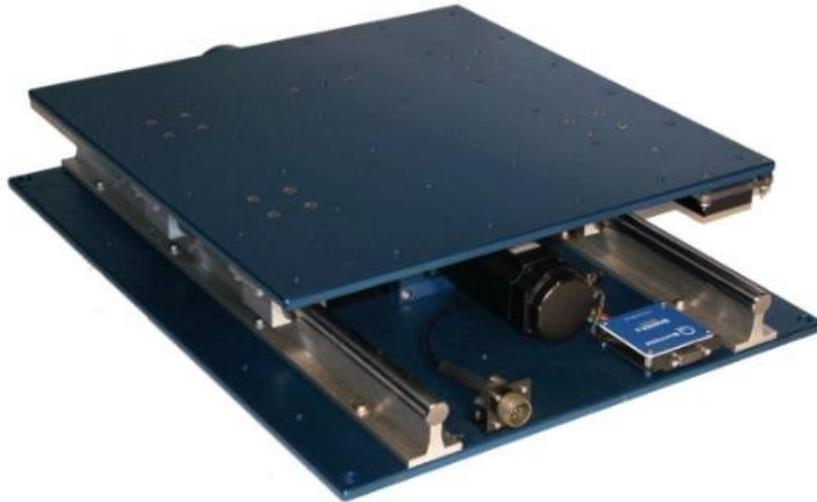


Figura 1. Shake Table II

Esta mesa ha sido diseñada y fabricada para la Asociación Universitaria para el estudio de mesas vibratorias (UCIST: *University Consortium on Instructional Shake Tables*).

Tomando como referencia la *Shake Table II* [2], de *Quanser*, en un trabajo de Fin de Grado del mismo departamento, del año 2017, se ha tratado de buscar una alternativa a esta mesa sísmica [3]. Así, se ha diseñado y fabricado una mesa sísmica de un grado de libertad compuesta por un motor paso a paso NEMA 23HS2430 con un husillo roscado. La plataforma superior de la mesa se desliza a través de dos guías templadas SFC de 20 mm de diámetro con rodamientos lineales. Esta mesa sísmica, de fabricación propia, es la que se observa en la Figura 2.

Esta mesa vibratoria está disponible en el Departamento de Estructuras de la Escuela de Ingenieros Industriales.

A pesar de elaborar mesas sísmicas de un grado de libertad con diferentes motores o diferentes prestaciones que la de referencia, las mesas sísmicas reales son de dos grados de libertad en el plano horizontal (e incluso un tercero en dirección vertical), ya que los movimientos sobre las estructuras nunca se van a dar en un único eje de movimiento sino que va a ser un movimiento combinado en dos direcciones e incluso en un tercero vertical, por lo que para conseguir una mesa que simule una excitación real hay que buscar alternativas [4].

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

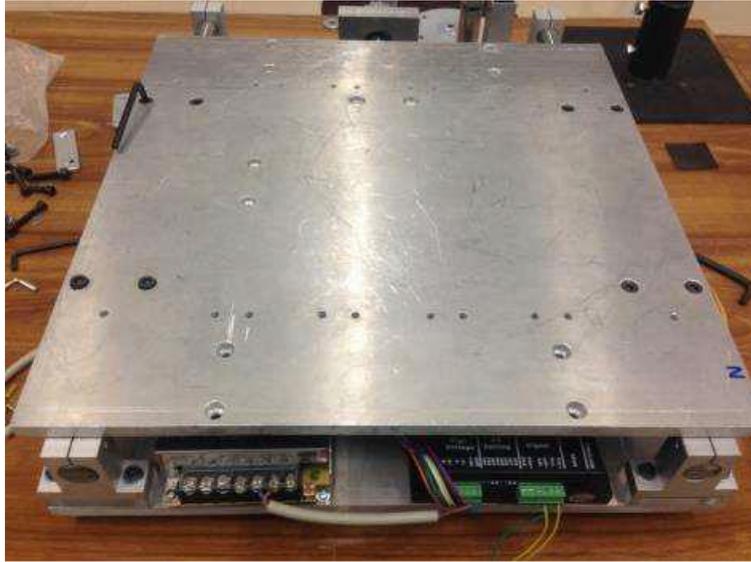


Figura 2. Mesa sísmica de un grado de libertad con un motor paso a paso

Una de las ventajas de la mesa sísmica *Shake Table II* [2], de *Quanser*, es que se puede conseguir una mesa sísmica de dos grados de libertad apilando una sobre otra (Figura 3). Así, la mesa sísmica de dos grados de libertad se forma como la unión de dos módulos, independientes, de un grado de libertad.



Figura 3. Mesa sísmica de dos grados de libertad formada por la unión de dos módulos de un grado de libertad

Otra alternativa es comprar la *Shake Table III XY* [5], también de *Quanser*, que ya está diseñada como una mesa sísmica de dos grados de libertad, sin necesidad de apilar módulos. La diferencia de esta mesa sísmica con la anterior, además del número de grados de libertad, es que emplea motores lineales en lugar de un servomotor.

El adquirir una mesa sísmica de dos grados de libertad por sí misma y no como unión de varios módulos, encarece mucho el precio, por lo que se va a intentar diseñar una mesa sísmica de dos grados de libertad formada por la unión de dos módulos, de fabricación propia.

### 1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado, por lo tanto, va a consistir en la elaboración de una mesa sísmica de dos grados de libertad como unión de dos módulos de un grado de libertad, al igual que el ejemplo de la *Shake Table II* de la Figura 3. Por ello, durante todo el proyecto se hablará de “módulo superior” y “módulo inferior” para referirse a cada uno de ellos.

Para la elaboración de esta mesa vibratoria se emplearán componentes ya existentes en el Departamento de Estructuras, minimizando así los elementos nuevos que haya que adquirir.

Estos componentes son dos motores lineales de la marca LinMot [6], así como dos guías lineales, que deslizan sobre un conjunto de rodamientos de bolas, ambos elementos de la marca HepcoMotion [7].

LinMot es una empresa puntera en la fabricación y el desarrollo de motores lineales a nivel mundial. Por su parte, HepcoMotion, que pertenece al Grupo Hepco, es líder mundial en la fabricación de sistemas lineales y componentes de automatización.

La elaboración de esta mesa sísmica va a tener algunas diferencias con respecto al equipo vibratorio fabricado anteriormente y disponible en el laboratorio:

En primer lugar, el elaborar una mesa sísmica de dos grados de libertad va a permitir estudiar el comportamiento de la estructura a analizar tanto en la dirección de un eje, como en la dirección perpendicular, así como el comportamiento ante un movimiento compuesto en dos direcciones. En cuanto a la cuestión de montaje, la diferencia con la mesa de un único grado de libertad será que la placa móvil del módulo inferior también será la placa fija del módulo superior.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

En segundo lugar, el sustituir el motor paso a paso por motores lineales va a permitir conseguir una mayor precisión y repetibilidad, así como una elevada potencia con respecto a su tamaño. Además, los motores lineales producen mucho menos ruido que los motores paso a paso. Asimismo, los motores lineales son muy polivalentes, lo cual es una ventaja, ya que, como veremos más adelante, el motor debe poder ser retirado de la mesa sísmica para ser utilizado en otros fines.

Una vez fabricada la mesa sísmica objeto de este proyecto, se instalarán sobre su placa superior las estructuras de estudio, las cuáles van a ser maquetas de un edificio multiplanta, formadas por dos módulos de una planta colocados uno encima del otro. Estas maquetas han sido diseñadas y fabricadas en un Trabajo de Fin de Grado previo, del año 2016 [8]. Las columnas van a estar fabricadas de metal y los forjados de plástico (Figura 4). Esta estructura va a simular el comportamiento de un edificio real frente a un seísmo.



*Figura 4. Maqueta de edificio multiplanta formada por dos módulos de una planta con el sistema AMD 2 y acelerómetros instalados.*

Con la mesa sísmica totalmente instalada, incluidos los montajes e instalaciones de los motores y de las estructuras anteriormente citadas que permiten simular el comportamiento sobre los edificios reales que se quieren

analizar, se introducirán señales de excitación al motor. Estas señales pueden ser de movimiento lineal, senoidal, o incluso la propia señal aleatoria de un terremoto que ya ha ocurrido para observar los efectos de casos reales sobre la maqueta.

Estas señales de excitación se enviarán a los motores desde un ordenador mediante dos softwares: el primero, DEWESoft, que posteriormente se utilizará para hacer mediciones y análisis; y el segundo, LinMot-Talk, propio de la marca de motores lineales LinMot.

Este segundo software, además, es necesario para la previa configuración de ambos drivers, en la que se tendrá que tener en cuenta las características de cada uno de los motores, la masa que tiene que soportar cada uno de ellos, la carrera disponible de cada motor y las funciones adicionales que se les quiera atribuir a cada uno de ellos.

También es posible hacer funcionar los motores de esta mesa sísmica sin necesidad de utilizar un ordenador. La solución es programar el driver para que se puedan enviar al motor ciertos comandos de manera externa, mediante una botonera.

Esta botonera, cuyo diseño, fabricación y montaje también serán objeto de este Trabajo de Fin de Grado, también es otro de los aspectos en que este proyecto va a mejorar el trabajo relacionado con la mesa sísmica anterior.

Por último, de la estructura que se pretende examinar se puede obtener un análisis exhaustivo mediante la colocación sobre ella de diferentes instrumentos de medición, dependiendo de las magnitudes que se quieran conocer, como pueden ser acelerómetros para medir aceleraciones o vibraciones, láser para medir desplazamientos o flechas, sensores de fuerza... Así, se puede observar el comportamiento de dicha estructura ante la entrada de una señal de excitación conocida.

### **1.4. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO**

En primer lugar, se va a realizar un análisis de cada uno de los objetivos que tiene que cumplir este proyecto, tanto principales, como secundarios y de cada subapartado del proyecto.

Después, se van a enumerar los componentes necesarios para este trabajo, así como describir cada uno de ellos y explicar sus características. También, se va a mencionar de cuáles de esos componentes ya se dispone, y cuáles de esos componentes es necesario adquirir para completar el proyecto.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Una vez explicados los objetivos a cumplir y los componentes para elaborar este proyecto, este Trabajo de Fin de Grado se va a dividir en dos grandes apartados: por un lado, el diseño y, por otro lado, el prototipado.

En el apartado de diseño se explicarán todos los aspectos que se han considerado a la hora de elaborar todas las piezas que forman parte de la mesa sísmica.

En el apartado de prototipado se explicarán tanto los aspectos relacionados con la fabricación de esas piezas diseñadas anteriormente, como lo relacionado con el montaje de todos los elementos hasta conseguir el equipo final.

A continuación, se incluirá un breve capítulo de aspectos necesarios para la puesta en marcha del equipo y, por último, un capítulo de conclusiones y posibles líneas de mejora donde, por un lado, se enumerarán las conclusiones de este trabajo y las competencias adquiridas y, por otro lado, se explicarán brevemente aspectos de este proyecto que puedan ser mejorados en un futuro.

## CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste, como se ha indicado anteriormente, en el diseño y prototipado de una mesa sísmica de dos grados de libertad mediante la utilización de motores lineales. Para ello, correrá a cargo de este proyecto el diseño de cada uno de sus componentes, su fabricación y el montaje de todo el conjunto.

El elaborar una mesa sísmica de dos grados de libertad hace que, en comparación con la mesa sísmica anterior, de un solo grado de libertad, cada componente que se necesite, lo hace por duplicado.

El segundo objetivo principal de este proyecto será el diseñar y fabricar un mando mediante impresora 3D para cada motor, de manera que pueda albergar todos los elementos (botones, interruptores, potenciómetros, LEDs) que permitan hacer funcionar cada motor sin necesidad de emplear un ordenador. Para ello, previamente hay que configurar los drivers para que puedan recibir señales externas y realizar todo el cableado necesario entre los diferentes elementos.

Este mando albergará todo el cableado propio en su interior, pero se diseñará una conexión de manera que el mando se conecte y desconecte del resto del equipo mediante un único cable y no mediante el número de cables que haya en su interior.

Por último, se diseñará una caja para cada motor, ideada para ser fabricada también mediante impresora 3D, en la que se puedan albergar todos los componentes externos del motor, tales como el driver y las diferentes fuentes de alimentación, así como todo el cableado entre dichos elementos.

De esta forma, los dos drivers de ambos motores y todas las fuentes de alimentación necesarias quedan recogidas en ambas cajas, así como todo el cableado. En el exterior, por tanto, solo quedaría la mesa sísmica, propiamente dicha, con el cableado mínimo y necesario por cada motor, tal y como se muestra en la Figura 5:

- Un único cable que va del motor de la mesa sísmica al driver (situado en la caja) (1).
- Un único cable que va desde el mando a la caja del driver y fuentes de alimentación (2).
- Un único cable de las fuentes de alimentación a la corriente (3).

- Un único cable que sale de la caja para la conexión con un ordenador. Se deja este cable por el que poder introducir una señal analógica al motor (4).

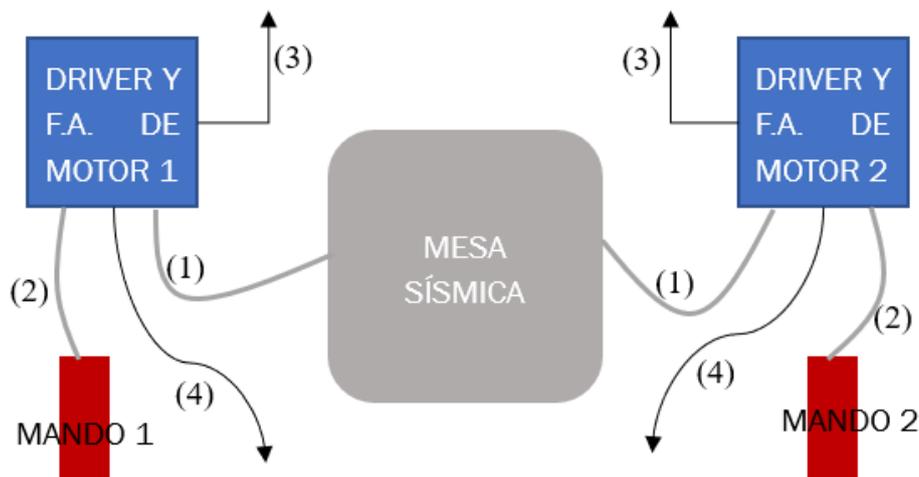


Figura 5. Esquema general del proyecto

De esta manera, cada capítulo del proyecto se va a dividir en los tres apartados principales en que se divide el trabajo:

- La mesa sísmica propiamente dicha, que se compondrá de las placas principales y cada una de las piezas diseñadas, y todos los componentes comerciales (los dos motores, las guías y los rodamientos). También se utilizarán piezas normalizadas de tornillería para su montaje.
- El mando para controlar el motor de manera externa sin necesidad de un ordenador. Aunque se hable del mando, siempre hay que tener en cuenta que son dos mandos, uno para cada motor, idénticos.
- La caja para albergar todos los componentes adicionales del motor, tales como el driver y las fuentes de alimentación. Al igual que en el mando, aunque se hable del diseño y la fabricación de la caja, hay que tener en cuenta que serán necesarias dos, una para cada uno de los motores.

Dentro de cada subapartado, también hay ciertos objetivos secundarios:

## 2.1. OBJETIVOS DE LA MESA

La mesa tiene que cumplir tanto objetivos de diseño como objetivos de montaje. Dentro de los objetivos de diseño, se tiene que:

- La mesa tiene que ser lo más ligera posible.
- La mesa tiene que tener la mínima altura posible.
- Los motores tienen que ser fácilmente desembragables, debido a que estos van a ser utilizados por los integrantes del Departamento de Estructuras para otros proyectos.
- La mesa tiene que aprovechar toda la carrera del vástago del motor lineal.
- La mesa tiene que tener las dimensiones apropiadas para la instalación de las maquetas de los edificios multiplanta en su placa superior [8]. Además, al tener que realizar esta instalación en la placa superior, de esta no puede sobresalir ningún elemento ya que entorpecería la colocación de dichas estructuras.

También tiene que cumplir unos objetivos de montaje, como son:

- La mesa tiene que tener la mínima holgura posible en la unión de las guías y los rodamientos.
- La mesa tiene que tener la mínima holgura posible en las uniones entre los motores y sus respectivas placas superiores móviles para evitar esfuerzos a flexión de los vástagos de los motores.

## 2.2. OBJETIVOS DEL MANDO

El mando, que se fabricará mediante impresora 3D, tiene que cumplir unos objetivos propios:

- Tamaño y dimensiones suficientes para albergar tantos elementos (botones, interruptores, potenciómetros, LEDs, conmutadores...) como comandos necesite.
- Tamaño y dimensiones suficientes para albergar todo el cableado en su interior.
- Forma ergonómica.

Como ya se ha mencionado anteriormente, también se diseñará una conexión para el mando, de manera que permita la unión con la caja de drivers y fuentes de alimentación fácilmente mediante el acoplamiento de un único cable y no

mediante la conexión de todos y cada uno de los cables que tenga en su interior.

### **2.3. OBJETIVOS DE LA CAJA**

El objetivo de cada caja, también ideada para su fabricación mediante impresora 3D, es, como se ha citado con anterioridad, albergar todos los componentes externos de los motores, como son los drivers y las fuentes de alimentación, y de este modo reducir el cableado de todo el conjunto.

Además, permite así tener localizados y guardados todos los elementos de cada motor en un único lugar.

## CAPÍTULO 3. COMPONENTES COMERCIALES

En este apartado se describirán y explicarán las características de cada uno de los componentes comerciales que se necesitan para la elaboración de la mesa sísmica. Los componentes comerciales se dividen en los componentes de los motores y los componentes de las guías.

Las facturas de todos los componentes, tanto de los componentes de los motores como de los componentes de las guías, se adjuntan en el *ANEXO I. FACTURAS DE LOS COMPONENTES COMERCIALES*.

### 3.1. COMPONENTES DE LOS MOTORES

En primer lugar, se van a citar los componentes motores de los que se dispone en el Departamento para la realización de la mesa sísmica.

Se trata de dos motores lineales, de la marca LinMot [6], de dos tamaños diferentes, por lo que el motor de menor tamaño se utilizará para el módulo superior y el motor de mayores dimensiones se empleará en el módulo inferior. Esto es consecuencia de que el motor grande soporta una mayor masa, por lo que es conveniente colocarlo en la posición inferior.

Ambos montajes motores están formados por un estátor, una brida que lo fija y una parte móvil, que es el *slider*, o vástago. A mayores, cada motor cuenta con un driver, que es el controlador del motor y dos fuentes de alimentación: una principal y otra secundaria. También se describirá brevemente el cable que conecta cada motor con su correspondiente driver.

Cabe destacar también que, aunque el estátor del motor tenga unas características técnicas propias, algunas de ellas dependen, en parte, del vástago que se le incorpore, por lo que en ambos motores también se comentarán las características del conjunto motor, no sólo de los elementos por separado.

Las características de todos los elementos que conforman los montajes de los motores están extraídas de la documentación técnica de cada tipo de elemento: documentación técnica de estátors, documentación técnica de sliders, de bridas, documentación técnica de drivers, de fuentes de alimentación, de cables... Todos estos documentos están disponibles en la página web del fabricante [6], de donde se puede obtener información con mayor profundidad.

Aunque se van a citar los elementos de cada uno de los motores posteriormente, para explicar algunas de sus características, en la Tabla 1, a modo de recordatorio y para evitar confusiones se pueden observar los diferentes componentes de cada uno de los dos motores:

Tipo de elemento	Módulo superior	Módulo inferior
Estátor	LINPS01-23x80F-HP-R	LINPS01-37x120F-HP-C
Vástago	LINPL01-12x270/230-HP	LINPL01-20x360/300-HP
Brida	LINPF02-23x90	LINPF02-37x100
Driver	LINC1250-EC-XC-1S-000	LINC1250-EC-XC-1S-000
Fuente de alimentación principal	LINS01-72/500	LINS01-72/1000
Fuente de alimentación secundaria	FUS-25D-24	FUS-100D-24
Cable	LINK05-Y/R-2	LINKS05-Y/C-4

Tabla 1. Elementos de los dos conjuntos motores

### 3.1.1. MOTOR DEL MÓDULO SUPERIOR

El montaje motor del módulo superior está compuesto por:

- Estátor *LINPS01-23x80F-HP-R* (Figura 6).  
Este motor es capaz de dar una fuerza máxima de 67 N con una velocidad máxima de 7,3 m/s y una repetibilidad de  $\pm 0,05$  mm. En cuanto a dimensiones, la longitud del estátor es de 162 mm, con un diámetro exterior de 23 mm e interior de 12 mm, donde va a ir alojado el vástago. Tiene una masa de 265 g.  
Dentro de su nombre técnico, las letras HP denotan que es un componente de la sección de equipos de alto rendimiento (HP: *high performance*). De la misma manera, la R indica el tipo de conector que posee este estátor, donde se va unir el cable para enlazar este componente con el driver correspondiente.



Figura 6. Estátor LINPS01-23x80F-HP-R

- Brida LINPF02-23x90 (Figura 7).  
Es el elemento del conjunto motor que da sujeción al estátor. De medidas 90x55x30 mm. Posee cuatro taladros donde introducir diferentes tornillos. Dos de ellos se van a utilizar para apretar la brida en torno al estátor (los dos taladros más próximos a la abertura de la brida) y los otros dos taladros para fijar la brida, con el estátor fijado, a una superficie plana.



Figura 7. Brida LINPF02-23x90

- Slider LINPL01-12x270/230-HP (Figura 8).  
El *slider* es la parte móvil del conjunto motor. Tiene un diámetro de 12 mm, cuyo fin es introducirlo en el diámetro interior del estátor anteriormente explicado. Al igual que el estátor, las letras HP de su nomenclatura corresponden con equipos de alto rendimiento (HP: high performance). Tiene una longitud de 270 mm y su masa es de 215 g.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Además, viene mecanizado con un taladro roscado en métrica M5 en cada uno de sus extremos para introducir otros elementos roscados, así como muescas para poder introducir anillas de seguridad en cada uno de sus extremos.



Figura 8. Slider LINPL01-12x270/230-HP

- Driver *LINC1250-EC-XC-1S-000* (Figura 9).  
Es el controlador del motor. Tiene multitud de entradas digitales y analógicas, y una entrada tipo Ethernet destinada a la conexión con un ordenador para modificar la configuración del motor previamente a la puesta en marcha del mismo.  
A este driver se van a conectar tanto el motor, con su cable correspondiente, como las fuentes de alimentación principal y secundaria.



Figura 9. Driver LINC1250-EC-XC-1S-000

- Fuente de alimentación *LINS01-72/500* (Figura 10).  
Fuente de alimentación de 72 V, 500 W (6,7 A). Tiene unas dimensiones de 125x121x62 mm. Esta fuente de alimentación se nutre de la corriente monofásica.  
Posee un enganche en uno de sus lados que le va a permitir ser acoplado posteriormente en un carril normalizado.



Figura 10. Fuente de alimentación LINS01-72/500

A mayores, también se utilizará en el montaje de este motor la fuente de alimentación *FUS-25D-24*, de la marca FullWat, de 24 VDC, 1 A, 25W. Esta es una fuente de alimentación de carril, de dimensiones 90x45x35 mm.

El conjunto del estátor *LINPS01-23x80F-HP-R* con el vástago *LINPL01-12x270/230-HP* da lugar a un conjunto motor capaz de ofrecer una carrera máxima de 200 mm, con una carrera normal de 140 mm, aunque esta se va a ver reducida debido a la instalación de unos topes de goma a cada extremo del vástago que van a actuar como finales de carrera. Además, es capaz de proporcionar un pico de fuerza de 67 N. La velocidad máxima con la que el motor puede llegar a desplazarse es de 7,3 m/s.



Figura 11. Cable LINK05-Y/R-2

La conexión del motor al driver se realiza mediante un cable *LINK05-Y/R-2* (Figura 11).

Este es un cable estándar, de 0,5 mm<sup>2</sup> de sección, apropiado para controladores de las series C1100 y C1200 por un extremo (en este caso el controlador es de la serie C1200) y para motores con conector tipo R (lo cual es el caso del estátor LINPS01-23x80) por el otro extremo. El cable tiene 2 m de longitud.

### 3.1.2. MOTOR DEL MÓDULO INFERIOR

El montaje motor del módulo inferior está compuesto por:

- Estátor *LINPS01-37x120F-HP-C* (Figura 12).  
Este motor es capaz de dar una fuerza máxima de 255 N con una velocidad máxima de 3,8 m/s y una repetibilidad de  $\pm 0,05$  mm. En cuanto a dimensiones, la longitud es de 216 mm, con un diámetro exterior de 37 mm e interior de 20 mm donde va a ir alojada la parte móvil del motor. Tiene una masa de 740 g. Respecto a su nomenclatura, las siglas HP indican que es un motor de la gama de alto rendimiento (HP: *high performance*), mientras que la letra C indica el tipo de conector que tiene el motor.



Figura 12. Estátor *LINPS01-37x120F-HP-C*

- Brida *LINPF02-37x100*.  
De dimensiones 100x80x55 mm. Al igual que en el caso del motor anterior, la función de este elemento del motor es la sujeción del estátor. Tiene varios taladros mecanizados: se utilizarán dos de ellos para apretar la brida contra el estátor y darle sujeción, y se utilizarán los otros dos para fijar la brida, con el estátor ya fijado, sobre una superficie plana.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

- Vástago *LINPL01-20x360/300-HP*.  
Este elemento es la parte móvil del motor. Es igual que el *slider* del motor del módulo superior: es un producto de la gama de elementos de alto rendimiento, viene mecanizado con muescas para introducir anillas de seguridad en los extremos y también está mecanizado con unos taladros roscados en cada uno de sus extremos.  
Las diferencias con el vástago anterior son las dimensiones. Este vástago tiene 20 mm de diámetro, para poder ser introducido en el diámetro interior de este nuevo estátor (*LINPS01-37x120F-HP-C*). Además, los taladros roscados están roscados en métrica M8. Este vástago tiene 360 mm de longitud y una masa de 760 g.
- Driver *LINC1250-EC-XC-1S-000*.  
El driver del motor del módulo inferior no se va a describir, ya que es idéntico al controlador del motor pequeño del módulo superior.
- Fuente de alimentación *LINS01-72/1000* (Figura 13).  
Fuente de alimentación de 72 V, 1000 W (13,5 A). De dimensiones 230x183x66 mm. Esta fuente de alimentación se nutre de corriente trifásica.



Figura 13. Fuente de alimentación *LINS01-72/1000*

A mayores, también se utilizará en el montaje de este motor la fuente de alimentación *FUS-100D-24*, de la marca FullWat, de 24 VDC, 4,2 A, 100 W, que

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

es, al igual que la fuente de alimentación adicional del montaje motor del módulo superior, una fuente de alimentación de carril.

El conjunto del estátor *LINPS01-37x120F-HP-C* con el vástago *LINPL01-20x360/300-HP* da lugar a un conjunto capaz de ofrecer una carrera máxima de 240 mm, con una carrera normal de 160 mm, que también se va a ver reducida como consecuencia de la instalación de unos topes de goma que van a actuar como finales de carrera, con un pico de fuerza de 255 N. La velocidad máxima con la que el motor puede llegar a moverse es de 3,8 m/s.

La conexión del motor al driver se realiza mediante un cable *LINKS05-Y/C-4*, que es el cable que se muestra en la Figura 14. Este es un cable de alta flexibilidad, de 0,5 mm<sup>2</sup> de sección, apropiado para controladores de las series C1100 y C1200 por un extremo (en este caso el controlador también es de la serie C1200) y para motores con conector tipo C (lo cual es el caso del estátor *LINPS01-37x120*) por el otro extremo.



Figura 14. Cable LINKS05-Y/C-4

Este cable se diferencia del cable del anterior motor, además de porque este es de alta flexibilidad, por el tipo de conector que se enchufa en el motor. Tiene 4 m de longitud.

A simple vista los cables de los dos motores parecen iguales pero los conectores de ambos son diferentes, por lo que los cables no pueden ser intercambiados entre los dos motores.

### 3.2. COMPONENTES DE LAS GUÍAS

Una vez descritos todos los componentes de los montajes motores, hay que pasar a describir los componentes de las guías, que van a ser las propias guías y los rodamientos que deslizan sobre ellas.

Ambos elementos, tanto las guías lineales como los cojinetes que deslizan sobre ellas están sacados del catálogo de HepcoMotion, disponible en la página web de dicha marca [7], donde se especifican las características técnicas de cada uno de los productos.

Cabe decir que en el Departamento ya se cuenta con dos guías lineales y dos carros con cuatro cojinetes cada uno.

Por un lado, la guía se corresponde con la NS25 L356 P3 (Figura 15).

Es una guía con espaciador de doble canto, de 356 mm de longitud y 25 mm de anchura. Posee cuatro taladros escariados, separados entre ellos por una distancia de 90 mm y el primero a 43 mm del extremo de la guía.

Estos taladros están diseñados para ser pasantes de una rosca métrica M5, por lo que su diámetro es de 5,5 mm, aumentando hasta 10 mm en la parte superior de la guía para poder ocultar la cabeza del tornillo.

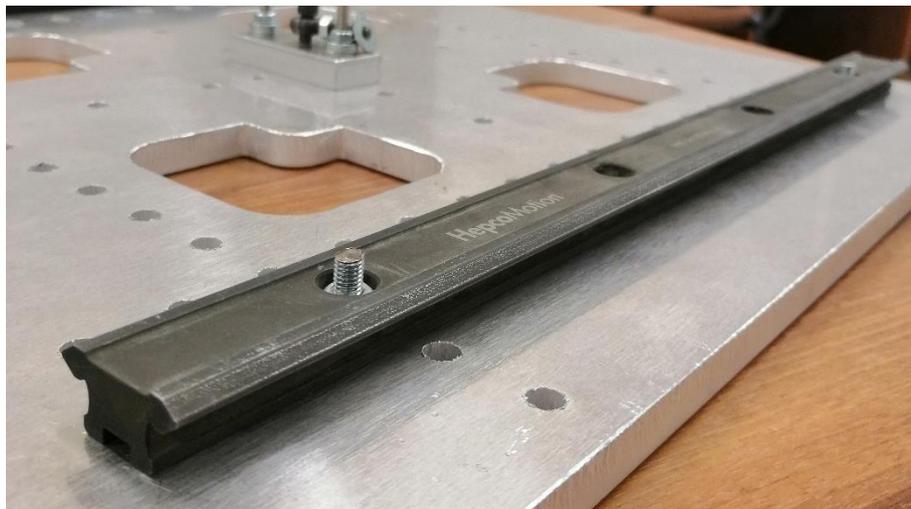


Figura 15. Guía de HepcoMotion NS25 L356 P3

Dicha guía está fabricada en calidad P3, no existe una cremallera montada en la guía (que podría llevarla) y los agujeros de fijación practicados para introducir

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

tornillos no están roscados, sino que son pasantes, como ya se ha dicho. Tiene una masa de 1,5 kg por metro, por lo que su masa aproximada es de 580 gramos.

El hecho de utilizar una guía con espaciador de doble canto ofrece al sistema mucha más seguridad que cualquiera de las otras alternativas que se ofrecen en el catálogo, como puede ser una guía con espaciador, pero de simple canto, o cualquier guía plana, tanto de doble canto como, por supuesto, de simple canto.

Además, el hecho de utilizar una guía que no es plana ofrece al conjunto cierta altura, necesaria para salvar el motor en ambos módulos de la mesa sísmica, lo cual evita incluir más elementos para conseguir esa altura.

En cuanto a los rodamientos empleados, de los ocho disponibles en el laboratorio, cuatro se corresponden con los *GLJ 265 C* y los otros cuatro con los *GLJ 265 E*.

El hecho de que haya dos tipos diferentes de rodamientos es debido a que el rodamiento del tipo C es un rodamiento concéntrico respecto de su eje y el tipo E, en cambio, es un rodamiento excéntrico. De esta manera, a la hora de realizar el montaje, la guía pasará entre un rodamiento concéntrico y un rodamiento excéntrico y, mediante el ajuste de esta excentricidad, se puede corregir la holgura existente.

Por lo tanto, para cualquier montaje que se vaya a realizar, se utilizarán la mitad de los rodamientos concéntricos y la otra mitad, excéntricos.

El tipo de rodamiento utilizado en el montaje de la mesa sísmica de dos grados de libertad se corresponde con el rodamiento de poco espesor Slimline. Estos son rodamientos muy compactos debido al diseño de una sola hilera de bolas, y ofrecen una muy buena rigidez de manera económica. Este tipo de rodamientos ofrecen un mejor rendimiento respecto a los rodamientos estándar y, además, son más versátiles, ya que pueden ser utilizados en cualquier tipo de guía, mientras que los rodamientos estándar están diseñados para funcionar con su guía correspondiente.

Tienen un diámetro de 26,5 mm y una altura (la altura del rodamiento más la altura de la contratuerca) de 11,3 mm. El perno tiene un diámetro de 8 mm, con una rosca métrica M8 de paso fino (1 mm).

Estos rodamientos, originariamente, vienen montados sobre unos carros, como se observa en la Figura 16. Se necesita un carro por cada guía, y en cada carro

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

se montan cuatro rodamientos (dos concéntricos y dos excéntricos), pero para el montaje de esta mesa sísmica se va a prescindir de estos carros.



Figura 16. Rodamientos Slimline GLJ265C y GLJ265E montados sobre un carro

De esta manera, con dos carros, cada uno de los cuáles con dos rodamientos concéntricos y dos rodamientos excéntricos (en total ocho rodamientos, de los cuáles cuatro son concéntricos y otros cuatro son excéntricos) y con dos guías lineales ya se puede realizar el montaje de una mesa sísmica de un grado de libertad.

Pero, para realizar la mesa sísmica de dos grados de libertad es necesario duplicar todos los elementos, por lo que hay que proceder al pedido de los componentes que faltan. La factura del pedido de estos productos está adjunta en el **ANEXO I. FACTURAS DE LOS COMPONENTES COMERCIALES**.

Se necesitan:

- 2x guía con espaciador de doble canto NS25 L356 P3
- 4x rodamiento de poco espesor Slimline GLJ 265 C
- 4x rodamiento de poco espesor Slimline GLJ 265 E

Debido a que los rodamientos existentes en el laboratorio no están en el catálogo, se piden los rodamientos *GSJ 265 C* y *GSJ 265 E*. Estos rodamientos son muy parecidos a los ya existentes. La única diferencia, de acuerdo con el nombre del producto, es que los rodamientos del pedido son de perno corto (S: *short*), mientras que los originales son de perno largo (L: *long*).

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

El hecho de que haya rodamientos de dos tipos diferentes no va a afectar en el diseño ni en el montaje del proyecto.

Se colocarán todos los rodamientos de perno largo en el montaje del módulo inferior de la mesa sísmica, mientras que en el módulo superior se instalarán todos los rodamientos de perno corto.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO

Dentro de este Trabajo de Fin de Grado va a haber tres subapartados a diseñar, que son: la mesa vibratoria propiamente dicha, el mando que va a controlar de manera externa el motor de la mesa sísmica y la caja para albergar los componentes externos de los motores.

### 4.1. DISEÑO DE LA MESA SÍSMICA

El diseño de la mesa sísmica, básicamente, va a consistir en tres placas cuadradas, una sobre otra, a las que se fijan una serie de zancos para superar la altura del motor de cada módulo. En estos zancos se van a instalar los rodamientos, sobre los que deslizarán las guías, fijas a cada placa superior.

De esta manera cada una de las tres placas que componen la mesa tienen un comportamiento diferente:

- La placa inferior será la única placa fija y contendrá el motor del módulo inferior (el motor grande).
- La placa intermedia hará las veces de placa móvil del módulo inferior y de placa fija del módulo superior. Se moverá solidaria al movimiento del vástago del motor del módulo inferior, por lo que lo hará en la dirección de un único eje. También contendrá al motor del módulo superior (el motor pequeño).
- La placa superior actúa como placa móvil del módulo superior, por lo que se moverá solidaria con el vástago del motor del módulo superior que, a su vez, se está moviendo por la acción del motor del módulo inferior. Por lo tanto, la placa superior se moverá en las dos direcciones del plano del suelo. En esta placa es donde se van a instalar las estructuras a analizar.

Cada placa superior (la placa superior para el caso del módulo superior y la placa intermedia para el caso del módulo inferior) se tiene que mover solidaria al vástago de su respectivo motor. Para ello, es necesario diseñar un sistema de unión entre la placa y el vástago del motor.

A continuación, hay que mencionar ciertos aspectos en cuanto al diseño general de la mesa:

- Todos los elementos se diseñarán para ser fabricados en aluminio, con espesor de 10mm.
- Las placas principales serán cuadradas, de dimensiones 40x40 cm.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

- En cuanto a la forma general de las placas, será idéntica en ambas tres, de manera que, al alinearse todas, en vista de planta no se vea más que la placa superior.
- La placa intermedia (donde va fijado el motor pequeño) y la placa inferior (donde va fijado el motor grande) van a ser idénticas, por lo que se diseñará una única placa teniendo en cuenta los taladros para fijar tanto un motor como el otro.
- Todo el diseño va a estar optimizado con respecto al motor más restrictivo, es decir, el motor pequeño del módulo superior, ya que es el motor con menor carrera de los dos.
- Se intentará que los diseños de las placas sean lo más simétricos posibles.
- Se simplificará el número de elementos de tornillería diferentes. En primer lugar, para tener el mínimo número de piezas diferentes y, en segundo lugar, para utilizar una única llave o tipo de llave para el montaje.

Así, todos los tornillos que vayan apoyados sobre la cara superior de alguna de las placas serán según la norma ISO 10642:2004 [9], que son tornillos avellanados para llave Allen.

Al ser avellanado, el tornillo queda introducido en la placa, sin sobresalir por la cara superior y no afecta a posibles montajes posteriores ni a la fijación de las estructuras a analizar.

En cuanto a arandelas, todas seguirán la norma ISO 7089:2000 [10], que es la norma para arandelas planas.

Por último, las tuercas irán según la norma ISO 4032:2012 [11], que son tuercas hexagonales normales.

En todos los elementos roscados, se va a variar entre métricas M5 o M6 dependiendo del lugar en el que tienen que ir montados.

- Todos los taladros que tengan que realizarse, se realizarán según la norma ISO 273:1979 [12], que establece los diámetros de los taladros pasantes para cada rosca métrica. También, si un taladro va a ir roscado, se establecerá el diámetro apropiado para su roscado posterior, es decir, su diámetro será el de la broca, no el diámetro nominal de la rosca.

Así, se ha intentado reducir al mínimo el número de piezas diferentes a diseñar y, posteriormente, a fabricar, quedando únicamente:

- Placa superior
- Placa inferior (idéntica a la placa intermedia)
- Zanco
- Placa de refuerzo (se hablará de esta pieza a continuación)

Los planos de todas y cada una de estas piezas están incluidos en el *ANEXO II. PLANOS*.

### 4.1.1. DISEÑO DE LA UNIÓN MOTOR - PLACA SUPERIOR

La placa superior tiene que ser solidaria con el vástago del motor, de manera que cuando éste se desplace, también se mueva la placa superior.

El vástago del motor tiene en ambos extremos un orificio roscado por lo que, aprovechando esta característica, la solución a la que se ha llegado ha sido roscar un tornillo de ojo en dicho taladro roscado del extremo y por ese tornillo de ojo introducir un pasador cónico que atravesase tanto al propio tornillo de ojo como a la placa superior.

Con esta solución, el tornillo de ojo está normalizado según la norma DIN 444:2017:04 [13] y el pasador cónico según la norma ISO 2339:1986 [14].

El hecho de utilizar un pasador nos da la posibilidad de desembragar fácilmente el motor del conjunto de placas, lo cual era un objetivo del proyecto. Además, al ser un pasador cónico, en la unión se produce un pequeño apriete, que no se tendría si se opta por utilizar un pasador cilíndrico.

Esta unión es un poco débil y permite bastante trabajo a flexión, por lo que, además, se ha decidido introducir una placa de refuerzo, para rigidizar dicha unión, como se muestra en la Figura 17.



*Figura 17. Detalle del diseño de la unión del motor con la placa superior*

En el caso del motor pequeño del módulo superior, la rosca del taladro del vástago es una métrica M5, por lo que se utilizará, tanto un tornillo de ojo de métrica M5 (DIN 444 M5x30) como un pasador cónico de diámetro 5 mm (ISO 2339 5x40) [13], [14].

En el caso del motor grande, la rosca del vástago es métrica M8, por lo que la solución será la misma, pero con este nuevo diámetro (tornillo de ojo DIN 444 M8x40 y pasador cónico ISO 2339 8x50) [13], [14].

Se ha diseñado la estructura para que el pasador cónico anteriormente mencionado, se sitúe justo sobre el punto medio de la placa. Por un lado, para que esté perfectamente alineado con el vástago del motor y, por otro lado, para que el esfuerzo que sufre la unión cuando el motor esté en marcha sea idéntico tanto en una dirección, como en la contraria.

En cuanto a la placa de refuerzo, es similar a la pieza del zanco, que se explicará más adelante. Consiste en una pieza rectangular, de 22 mm de ancho y 60 mm de largo.

Posee un taladro en el centro de diámetro igual al diámetro del pasador, por donde va a atravesar el mismo. Para fijar la placa de refuerzo a la placa superior tiene dos taladros más, de diámetro 6,6 mm, el diámetro necesario según la norma ISO 273:1979 para un tornillo de métrica M6 pasante [12], que se fijará con una arandela y una tuerca de la misma métrica.

El tornillo será un ISO 10642 M6x40, con una arandela ISO 7089 6x12 y una tuerca ISO 4032 M6 [9]-[11].

### **4.1.2. DISEÑO DE LA PLACA SUPERIOR**

Para el diseño de la placa superior hay que tener en cuenta tres series de taladros: los taladros para fijar las estructuras a analizar, los taladros de la unión con el vástago del motor y los taladros para fijar las guías a la placa (ver Figura 18).

Los taladros necesarios para fijar las estructuras deben de estar en idéntica posición que los de la propia estructura, sin que esta sobresalga de la placa. Por ello, se extrae la posición de los taladros de los planos del diseño original de la maqueta del edificio multiplanta [8].

Dicha estructura se fija a la placa con tornillos de métrica M6 por lo que los taladros de esta placa superior serán de diámetro 6,6mm (diámetro necesario para una rosca de métrica M6 pasante, según norma ISO 273:1979 [12]).

También hay que diseñar los taladros de la unión con el vástago del motor anteriormente explicada, que consiste en un taladro de diámetro 5 mm para el pasador y dos taladros de 6,6 mm de diámetro a ambos lados para introducir sendos tornillos de métrica M6 pasantes [12]. Por comodidad, también se diseñan sus dos taladros simétricos. Estos cuatro taladros van a estar atravesados por tornillos avellanados de la norma ISO 10642:2004 [9], por lo que deben de ir avellanados.

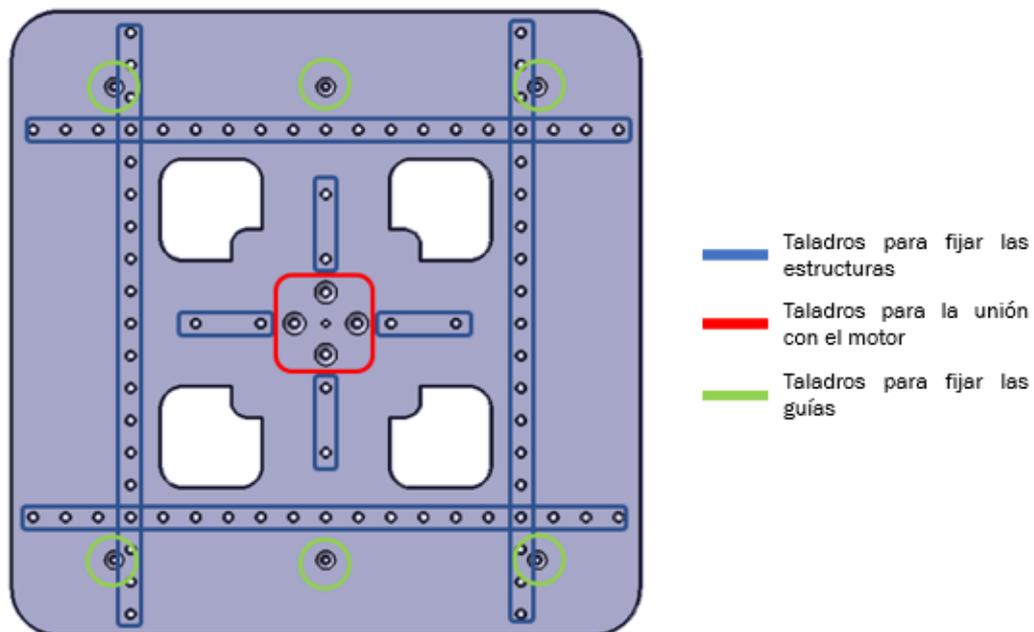


Figura 18. Esquema de los taladros de la placa superior

Por último, para fijar las dos guías a esta placa superior, se diseñarán dos taladros para cada guía, que coincidirán con los dos taladros más próximos a los extremos de los cuatro que tiene la guía, para obtener una menor holgura. Además, se añadirá un taladro central para indicar la dirección de la guía. Estos taladros tienen que estar lo más próximos al lateral de la placa, teniendo en cuenta las dimensiones de la guía y los rodamientos, de manera que ninguno de ellos sobresalga por un lateral de la placa. La longitud de la guía va a estar centrada en la placa.

Los taladros de las guías de HepcoMotion adquiridas son pasantes para una rosca de métrica M5, por lo que los taladros correspondientes en la placa superior deben de ser igualmente pasantes. De este modo, su diámetro será de 5,5 mm (diámetro apropiado según la norma ISO 273:1979 [12]) y, además,

estos taladros tendrán que estar avellanados, para ocultar la cabeza del tornillo.

### 4.1.3. DISEÑO DE LA PLACA INFERIOR

Esta es la placa más compleja, ya que tiene que tener en cuenta tanto las necesidades de ser la placa inferior del módulo superior, como las necesidades de ser la placa superior del módulo inferior. Además, también se tendrán en cuenta los aspectos pertinentes de la placa inferior del módulo inferior, ya que, como se ha dicho con anterioridad, solo se diseñará una única placa, que servirá como placa intermedia y como placa inferior (aunque haya exceso de taladros).

De esta forma, el diseño de la placa inferior tiene que contar con: taladros para fijar las guías, taladros para fijar los zancos, taladros para la unión del centro con el motor y taladros para fijar tanto el motor del módulo inferior como el motor del módulo superior. Todos esos taladros se pueden observar en la Figura 19:

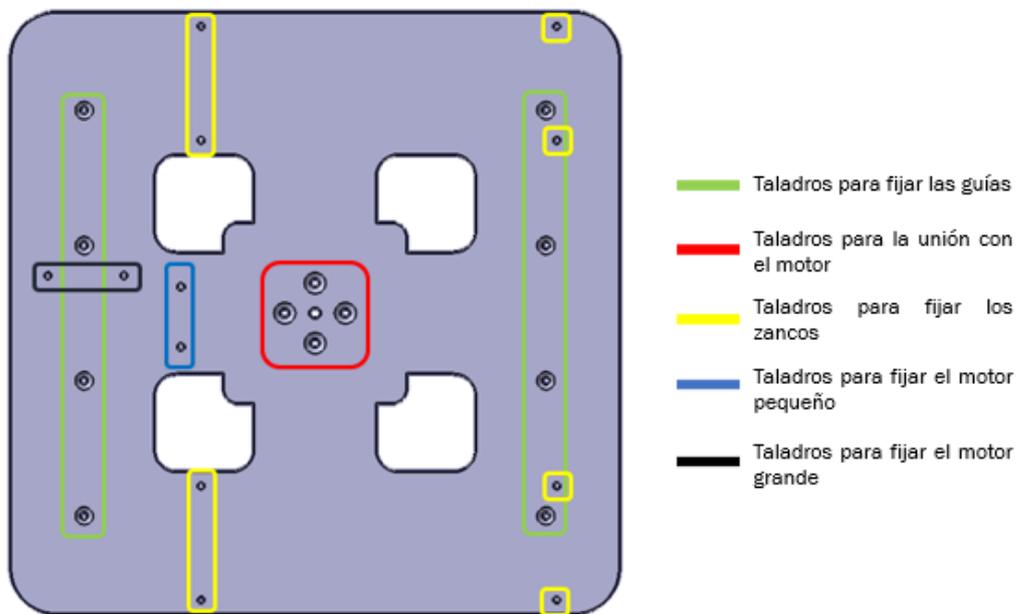


Figura 19. Esquema de los taladros de la placa inferior

Como placa superior del módulo inferior, esta placa necesita los taladros para fijar las guías del módulo inferior y los taladros para la unión del centro.

Estos taladros serán muy similares a los de la placa superior. En el caso de los taladros de las guías, serán idénticos, de 5,5 mm de diámetro y avellanados. En el caso de los taladros para la unión del centro, también serán idénticos: cuatro taladros avellanados de 6,6 mm de diámetro, dos útiles y dos simétricos, con la salvedad de que el taladro central del pasador, será de diámetro 8 mm en lugar de 5 mm.

Como placa inferior del módulo superior, esta placa precisa de los taladros para para fijar los zancos, donde van a ir colocados los rodamientos.

Se ha calculado la posición de estos zancos para que se aproveche al máximo la carrera del motor pequeño, con un margen de 5 mm en cada extremo, como precaución por si hay algún error de montaje, que las guías no se salgan.

Cada zanco va a ir fijado a esta placa con dos tornillos de métrica M6, que irán roscados en la propia placa, por lo que se necesitarán ocho taladros (el diseño tiene cuatro zancos), de un diámetro menor (5 mm) para su posterior roscado.

Por último, esta placa necesita los taladros para fijar ambos motores. Esta unión se realizará atornillando a la placa las bridas de los motores. De la información de dichas bridas, se obtiene la posición de los taladros para fijar los motores.

Además, se considera que las bridas de ambos motores no sobresalgan del contorno del equipo, así como que el estátor de ambos motores sobresalga lo mínimo posible del conjunto general del sistema.

En el caso del motor grande (módulo inferior), los dos taladros para fijarlo a la placa van a ser roscados para una métrica M6 (los taladros de la brida del motor tienen una dimensión para que sea pasante una métrica M6), por lo que el diámetro del taladro será de 5 mm para después ser roscado. En el caso del motor pequeño (motor del módulo superior), en cambio, los dos taladros van a ser de diámetro 5,5 mm (pasantes para una métrica M5, según norma ISO 273:1979 [12]) y van a ir avellanados por la parte trasera para ocultar la cabeza del tornillo.

#### **4.1.4. ALIGERAMIENTOS**

Una vez diseñadas todas las placas principales, hay que proceder a un aligeramiento, es decir, a quitar material inútil de ellas para quitar peso innecesario en el equipo.

En vez de quitar todo el material posible de cada placa por separado, lo que se va a hacer es un aligeramiento común a todas las placas, de manera que cuando estén alineadas, el contorno general de ambas placas sea idéntico.

En primer lugar, se va a proceder a un redondeo de las cuatro esquinas, con un radio de acuerdo lo más grande posible sin que afecte a la instalación de ningún elemento ni quite ningún taladro ya diseñado. Este radio va a ser igual a 30 mm.

En segundo lugar, se procede a quitar material del interior de las placas. En este caso, lo que restringe el aligeramiento son los taladros de la unión del centro, ya que no se puede retirar material de esa zona. Por ello, se deja el interior de la placa intacto y unido al resto de material imprescindible de la placa con una forma de cruz. El ancho del brazo de esa cruz lo determina la anchura de la brida del motor grande (motor del módulo inferior), ya que esta pieza debe apoyarse sobre una zona de la placa con material. Como todas las placas van a tener un aligeramiento común, los cuatro brazos de esta cruz tendrán esta anchura mencionada.

### 4.1.5. DISEÑO DEL ZANCO

El diseño del zanco no tiene nada en particular. Es una pieza rectangular, cuya longitud es la distancia en la que existe material en la placa principal (para que el zanco no sobresalga ni por un lateral de la placa ni en ninguno de los aligeramientos), en concreto 94 mm y cuya anchura es de 22 mm (distancia suficiente para poder soportar los taladros correspondientes), como se puede ver en la Figura 20.

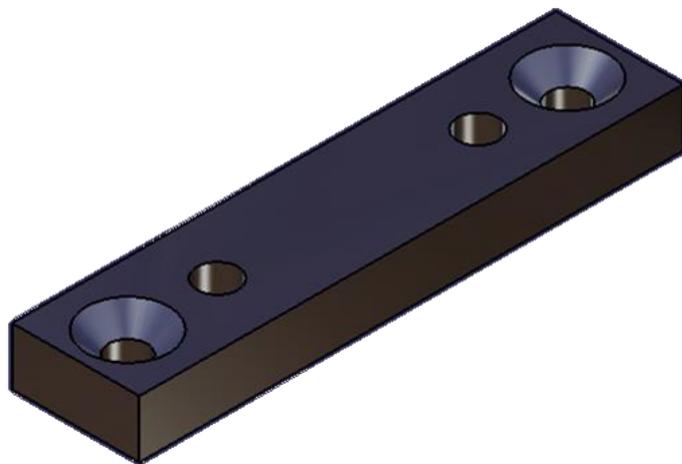


Figura 20. Diseño del zanco

Simétricos con respecto de la longitud media del zanco, tiene dos taladros, de diámetro 7 mm (diámetro de broca necesario para roscar una métrica M8), separados por una distancia de 45 mm, donde se van a roscar los rodamientos. Además, también tiene dos taladros de diámetro 6,6 mm (pasante para rosca métrica M6, según norma ISO 273:1979 [12]) para introducir dos tornillos de métrica M6 y fijar los zancos a la placa correspondiente. Estos dos últimos taladros van a ir avellanados, ya que en dichos taladros se van a introducir tornillos de la norma ISO 10642:2004 [9].

### 4.1.6. DISEÑO DEL CONJUNTO

Uno de los objetivos de este proyecto es que el motor sea fácilmente desembragable. Por ello, en la mesa vibratoria no se ha introducido ningún tipo de fin de carrera, sino que se colocan unos topes de goma en los dos extremos del vástago del motor a modo de finales de carrera. Así, cuando el motor está embragado, la placa superior no se puede salir por los extremos de las guías ya que el movimiento lo determina la carrera del motor, que está restringida por los topes de goma en el punto mínimo y en el punto máximo. Una vez desembragado el motor, la parte móvil se puede deslizar hasta el extremo de las guías y para poder ser retirada.

Todos los elementos de la mesa sísmica se han diseñado para aprovechar al máximo la carrera del motor pequeño, la cual se ha visto reducida por la previa instalación de las piezas de goma que actúan como finales de carrera del motor. En la Figura 21 se puede ver este máximo aprovechamiento de la carrera del motor, observando las posiciones mínima y máxima de la placa superior, que coinciden con la carrera mínima y la carrera máxima del vástago del motor.

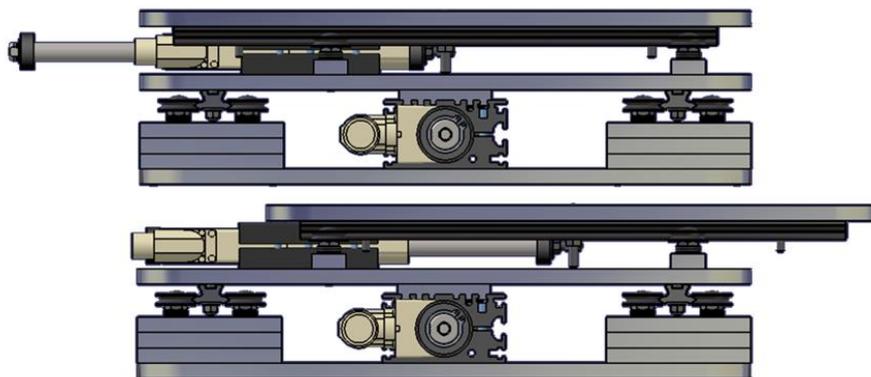


Figura 21. Detalle de la posición de la placa superior en la carrera mínima (arriba) y en la carrera máxima (abajo) del motor del módulo superior

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Todo el sistema se ha diseñado en función del motor pequeño, pero la carrera del motor grande es mayor, por lo que se corre el riesgo de que la estructura se salga por los extremos de la guía del módulo inferior. Para ello, se prevé la colocación de dos piezas de goma más en el vástago del motor del módulo inferior para reducir la carrera de este motor.

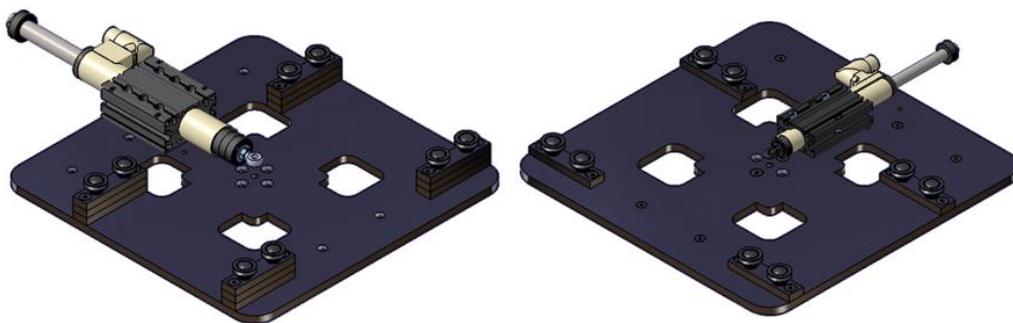
El montaje se ha diseñado para que la estructura, con ambos motores en sus carreras mínimas, esté alineada. Así, el sistema puede ser más compacto cuando esté en desuso o en la posición inicial. Este hecho también puede observarse en la Figura 21, ya que las placas están alineadas cuando la posición es la mínima.

La función de los zancos es dar altura a las guías y a los rodamientos para salvar la altura del motor.

En el caso del módulo superior, se instalará una única serie de zancos, sobre la que se roscarán los rodamientos. Previamente, se habrán colocado tres arandelas planas ISO 7089 8x16 [10] por cada rodamiento para así dar altura a estos rodamientos y evitar que el tornillo que fija la guía de la placa inmediatamente superior impacte con los zancos (este aspecto se detallará más adelante).

En el caso del módulo inferior, el diseño será similar en cuanto a los rodamientos y las arandelas. En cuanto a los zancos, serán necesarios tres zancos apilados para superar la altura del motor de este módulo, ya que tiene mucha mayor altura que el del módulo superior.

Esta diferencia en cuanto a la colocación de los zancos en el diseño del módulo inferior y el módulo superior puede verse en la Figura 22.



*Figura 22. Diferencia en el montaje de los zancos entre el módulo inferior (izquierda) y el módulo superior (derecha)*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

También se puede observar esta diferencia en la colocación de los zancos en ambos módulos con el diseño del montaje final realizado. En la Figura 23, además, se observa también el hecho de que, de no poner arandelas para elevar los rodamientos, los tornillos que sujetan las guías a la placa inmediatamente superior, impactarían con los zancos.

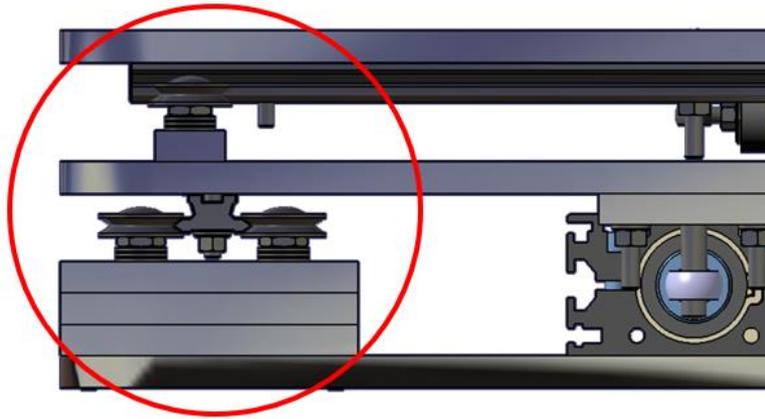


Figura 23. Detalle de la diferencia en el montaje de los zancos y los rodamientos entre ambos módulos

Con ambos módulos apilados y los motores correspondientes instalados y en la posición mínima de la carrera de cada uno de ellos, el diseño de la mesa sísmica de dos grados de libertad objeto de este Trabajo de Fin de Grado, con el diseño del montaje realizado, tiene el aspecto visible en la Figura 24:

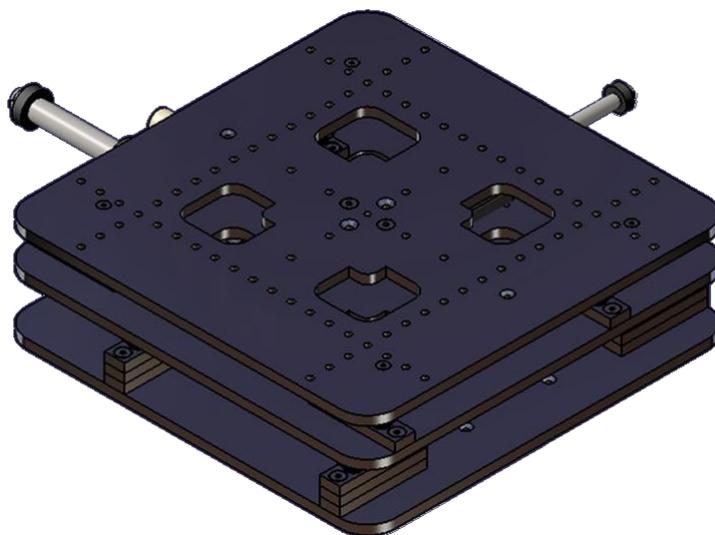


Figura 24. Diseño del montaje final de la mesa sísmica de dos grados de libertad

## 4.2. DISEÑO DEL MANDO

El diseño del mando se basa en elaborar una carcasa con una cierta forma ergonómica.

A partir de tener ya diseñada la carcasa con forma ergonómica, hay que ser consciente del número y el tamaño de los elementos que tiene que tener el mando para adaptar las dimensiones de estos a la carcasa ya existente. Para ello, hay que tener en cuenta los comandos que se quieren mandar al motor desde el mando.

Por último, hay que analizar el número de cables que va a haber en el interior del mando para idear un sistema de conexión u otro. Además, hay que adaptar también el tamaño del mando a la cantidad de cableado que se va a albergar en su interior.

Todo el mando se va a diseñar con un espesor de pared de 2 mm.

### 4.2.1. FORMA GENERAL DEL MANDO

El diseño del mando va a consistir en dos partes: la parte superior y la parte inferior. Ambas partes van a ir unidas a lo largo de todo el borde del mando y, para ello, se ha diseñado una ranura para que ambas partes encajen. Esta unión se diseña con una cierta holgura para solucionar las tolerancias de la impresora, como se puede ver en la Figura 25.

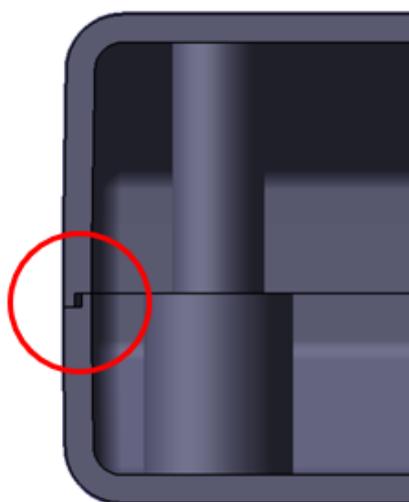


Figura 25. Detalle de la unión de la parte superior y la parte inferior del mando

Aunque la parte superior y la parte inferior del mando encajen mediante esta ranura diseñada para tal efecto, además hay que fijar ambas partes, y para ello se van a emplear cinco tornillos autorroscantes, en concreto ISO 7049 M3x12. Esta norma ISO 7049:2011 es la norma que regula los tornillos autorroscantes con cabeza cilíndrica redondeada y hueco en forma de cruz, tipo H [15].

A continuación, se van a describir brevemente las dos partes que forman el mando:

La parte superior es la parte en la que van a ir fijados todos los botones o elementos que tiene que llevar el mando. Estos van a ir instalados en la zona delantera, mientras que en la trasera se ha diseñado una zona inclinada para un mejor agarre (Figura 26). Una idea para esta parte superior era que la zona de la botonera estuviera ligeramente rebajada con respecto al resto, pero se descartó por la complejidad de conseguir un buen acabado a la hora de fabricarla.



*Figura 26. Diseño de la parte superior del mando*

La parte inferior contiene una zona curva para una mejor forma ergonómica a la hora de agarrar el mando en la zona delantera (al agarrar el mando, para alojar el dedo índice de la mano) y en la zona trasera otra inclinación que coincide con la zona inclinada de la parte superior (Figura 27). Este detalle pretende mejorar el agarre y también la estética del mando.

Salvando la zona inclinada y la zona curva para alojar el dedo, el resto de la parte inferior del mando contiene una gran zona plana, para poder apoyar el mando sobre una superficie cuando esté en desuso.



*Figura 27. Diseño de la parte inferior del mando*

Los tornillos que unen las dos partes del mando tienen que estar ocultos al exterior, tanto por estética como por motivos ergonómicos. Para ello se realiza en la parte inferior un taladro para ocultar la cabeza del tornillo. Además, estos tornillos serán pasantes a la parte inferior del mando e irán roscados en la parte superior del mismo, perforando el material en esta parte superior. Esto es posible debido a que el material utilizado en la impresora 3D es un material blando y puede perforarse fácilmente.

La posición de estos taladros está diseñada para un buen fijado de las dos partes (superior e inferior): dos en la parte delantera, dos en la parte trasera y un último tornillo en el centro del mando para evitar que la zona central se levante.

Todas las zonas inclinadas, tanto de la parte superior como de la parte inferior del mando se han diseñado teniendo en cuenta la fabricación. Es decir, al fabricar mediante impresión 3D hay que tener en cuenta que la impresión consiste en una sucesión de capas de material desde la base, de manera ascendente y que una capa tiene que “apoyar” en otra inmediatamente inferior, por lo que las zonas inclinadas son problemáticas. Para ello, los voladizos tendrán un mejor acabado cuanto más cortos y más verticales sean.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Todo el mando está redondeado, ya que su función es ser manejado con la mano y no se puede dejar ninguna arista viva que corte o sea incómoda.

### 4.2.2. COMPONENTES DEL MANDO

El mando va a disponer de (Figura 28):

- Un interruptor ON/OFF y un LED correspondiente que se encienda cuando el mando está encendido.
- Un pulsador, para cambiar el modo de señal: analógica o senoidal. Además, dos LEDs: uno que se encienda cuando está en modo analógico, y otro que se encienda cuando está en modo senoidal.
- Un conmutador, para variar entre dos rangos de frecuencia: 0–10 V ó  $\pm 10$  V.
- Un potenciómetro, para cambiar manualmente la frecuencia.
- Dos pulsadores para variar la amplitud del movimiento: uno para disminuir dicha amplitud, y otro para aumentarla.

Todos estos elementos, se han conseguido previamente, y medido su diámetro para el diseño de los taladros de la botonera.



*Figura 28. Algunos de los componentes del motor: selector, pulsador y LED*

En cuanto a la colocación de los componentes, se ha diseñado la botonera de manera que, con el mando cogido con la mano, se llegue fácilmente a todos ellos.

### 4.2.3. CONEXIÓN DEL MANDO

En el Departamento de Estructuras ya se contaba con un cableado eléctrico previo ideado para los componentes del mando.

Ese cableado eléctrico entre todos los componentes electrónicos se ha estudiado y se ha reducido a nueve cables. Con ese número de cables, la conexión elegida es un conector DB-9, un conector con nueve pines a los que se pueden soldar hasta nueve cables por su parte trasera (Figura 29). A partir de este elemento, la conexión se realiza con un único cable que contiene en su interior nueve hilos.



*Figura 29. Conector DB-9. En el anverso (izquierda) se observan los pines mientras que en el reverso (derecha) se ven las patillas a las que soldar los cables*

Elegido este conector, se rediseña la carcasa del mando para que pueda albergar un conector de este tipo en su parte delantera. Así, se realiza un agujero de las dimensiones de este elemento, así como dos pequeños taladros para poder fijar el conector a la carcasa.

#### 4.2.4. DISEÑO FINAL DEL MANDO

La conexión de un cable con un conector DB-9 es una conexión débil y puede desconectarse con facilidad, por lo que esta conexión suele ir, además de unidas ambas clavijas (conector “macho” y conector “hembra”), atornilladas con dos pequeños tornillos a ambos lados.

Por ello, al fijar una de las clavijas del conector a la carcasa del mando, hay que hacerlo con unos tornillos con cabeza hexagonal hueca y roscada en su interior. Este tipo de tornillos son típicos de estas uniones DB (DB-9, DB-15...).

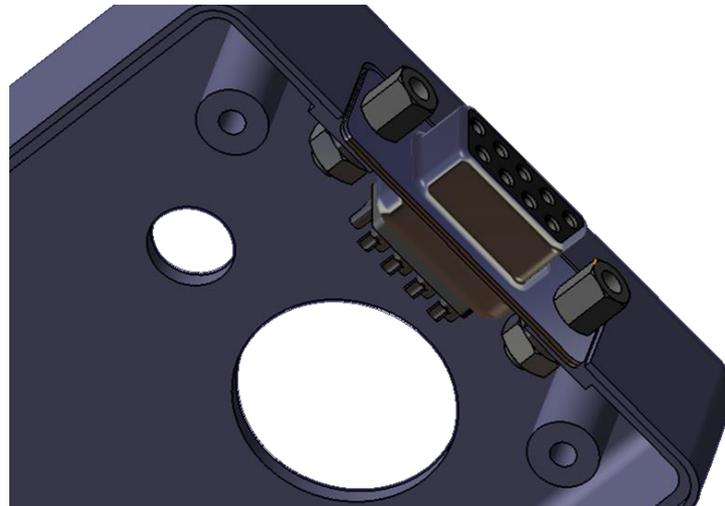
Su objetivo es que funcionen como pernos para sujetar el conector a una superficie (en este caso a la superficie de la carcasa) pero, a la vez, se pueda roscar en su interior unos tornillos para sujetar el otro extremo de la conexión (Figura 30).



*Figura 30. Tornillo de cabeza hexagonal hueca y roscada del conector DB-9*

Estos tornillos con cabeza roscada, en su función de perno, tienen el tratamiento de un tornillo normal, por lo que se fijan a la superficie deseada con arandela y tuerca, de la misma métrica (M3). El conector DB-9, con los tornillos que se han descrito, se fija de esta manera a la parte superior del mando (Figura 31).

La arandela que se utilice será una arandela ISO 8738 M3, que es una arandela plana, estrecha para elementos pequeños, que siguen la norma ISO 8738:1986 [16], y la tuerca ISO 4032 M3, que es una tuerca hexagonal normal [11].



*Figura 31. Detalle de la unión del conector DB-9 con la carcasa del mando*

Posterior al diseño de la carcasa, de los elementos de la botonera y de la conexión, se diseña un grabado en la superficie superior del mando que indique

la función de cada botón o elemento que alojado en la botonera. Así, el diseño del mando queda finalizado y tiene el aspecto que se puede observar en la Figura 32:



*Figura 32. Diseño final del mando*

### 4.3. DISEÑO DE LA CAJA

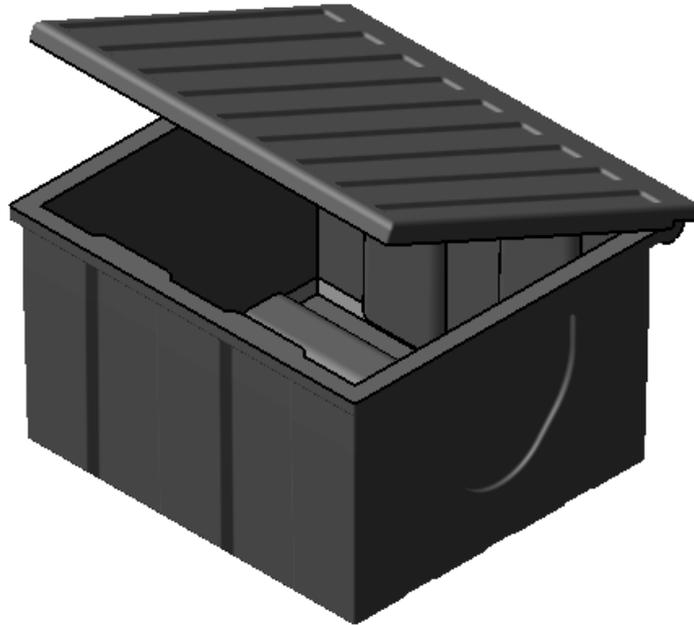
Se realizará el diseño de dos cajas, una para los elementos externos del motor pequeño (motor del módulo superior) y otra para los elementos externos del motor grande (motor del módulo inferior).

La razón de que se hagan dos cajas independientes para cada motor en vez de una para todos los elementos, se relaciona con que uno de los objetivos principales del proyecto sea que los motores puedan ser desembragados con facilidad para poder ser utilizados en otros fines.

En el caso de quitar un único motor de la mesa sísmica para utilizarlo en otros proyectos, también hay que quitar su correspondiente driver y fuentes de alimentación, por lo que, de estar en la misma caja todos los elementos, si se quita un motor, se estarían quitando los componentes de los dos motores.

El diseño de la caja se basa en un compartimento principal con una tapa que se abre y se cierra mediante el giro en torno a un eje. A este diseño hay que añadirle dos asas para poder levantar la caja, una en cada lado, en los rebajes

hechos para ese fin y un cierre para fijar la tapa cuando la caja esté completamente cerrada (Figura 33).



*Figura 33. Diseño de la caja*

Este primer diseño, que tiene las medidas necesarias para albergar el driver y las fuentes de alimentación de un motor, tiene 28 cm de longitud, 27 cm de anchura y 18 cm de altura. Estas medidas son mayores que las que puede llegar a fabricar una impresora 3D convencional, por lo que no se puede fabricar este diseño.

La siguiente idea es dividir cada caja en dos partes, y unir ambas partes mediante tornillería. Pero la caja sigue siendo demasiado grande para realizarla en impresora 3D y, aunque dividiéndola en dos partes sí es viable de fabricar, tardaría demasiado tiempo.

Además, una caja de plástico de esas medidas es sencilla de encontrar en el mercado y barata, por lo que fabricarla sería inviable en términos económicos y de tiempo.

Se opta, por lo tanto, por la alternativa de comprar una caja de herramientas ya fabricada de plástico, como la de la Figura 34.



Figura 34. Caja de herramientas Stanley

Estas cajas, que van a contener los drivers y fuentes de alimentación de los dos motores, tienen que ser capaces de realizar todas las conexiones necesarias desde el exterior, por lo que, a mayores, hay que realizarlas unos mecanizados:

- Hay que realizar una perforación del tamaño de un conector DB-9 para instalar la clavija contraria a la que se diseñó en el mando y realizar así la conexión desde el exterior.
- Hay que realizar un agujero para poder conectar desde el exterior el conector del driver, que es de grandes dimensiones (Figura 35).



Figura 35. Conector del cable proveniente del motor enchufado en el driver

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

- Hay que realizar un taladro por el que pueda salir de la caja un cable con un conector tipo BNC que se dejó para establecer la conexión con un ordenador y mandar señal analógica al motor (Figura 36). Este tipo de conector BNC es uno de los más utilizados para la rápida conexión o desconexión de cables coaxiales.



Figura 36. Conector tipo BNC "macho"

- Hay que realizar un agujero de las dimensiones de un conector C-14 (Figura 37) para poder conectar todo el conjunto a la corriente desde el exterior. Este conector es un tipo de enchufe para alimentación eléctrica. En el interior de la caja hay que conectar los cables correspondientes a los pines de este conector C-14 (tres pines para tres cables: neutro, fase y tierra); y en el exterior de la caja se introducirá un conector C-13 (el negativo) unido a un cable que se conecte directamente a la corriente eléctrica por el otro extremo.



Figura 37. Conector C-14

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Con todos estos mecanizados realizados a cada caja se pueden conectar ambos drivers a su motor correspondiente, el driver o los drivers necesarios al ordenador, ambos mandos a cada uno de los drivers, y todo el conjunto a la corriente sin necesidad de abrir las cajas, todo desde el exterior.

## **CAPÍTULO 5. PROTOTIPADO**

Este capítulo de prototipado se va a dividir en dos grandes apartados: el apartado de fabricación y el apartado de montaje.

Después, cada apartado se va a dividir en cada una de las tres partes del proyecto: la mesa sísmica, el mando que controla los motores y la caja para albergar sus componentes externos.

### **5.1. FABRICACIÓN**

Dentro de este apartado, hay que hablar de la fabricación de las piezas que componen la mesa y de la fabricación de las piezas que componen el mando. En este apartado de fabricación no se va a hablar de la caja porque se ha optado por comprarla ya fabricada, como se ha explicado en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*.

#### **5.1.1. FABRICACIÓN DE LA MESA**

Todas las piezas que van a componer la mesa sísmica se van a fabricar en aluminio, con un espesor de 10 mm y fabricadas mediante corte por láser.

La empresa encargada de esta tarea es Láser Ebro S.L., una empresa especializada en el corte de metal.

En total, para el conjunto de la mesa sísmica de dos grados de libertad, es necesario fabricar:

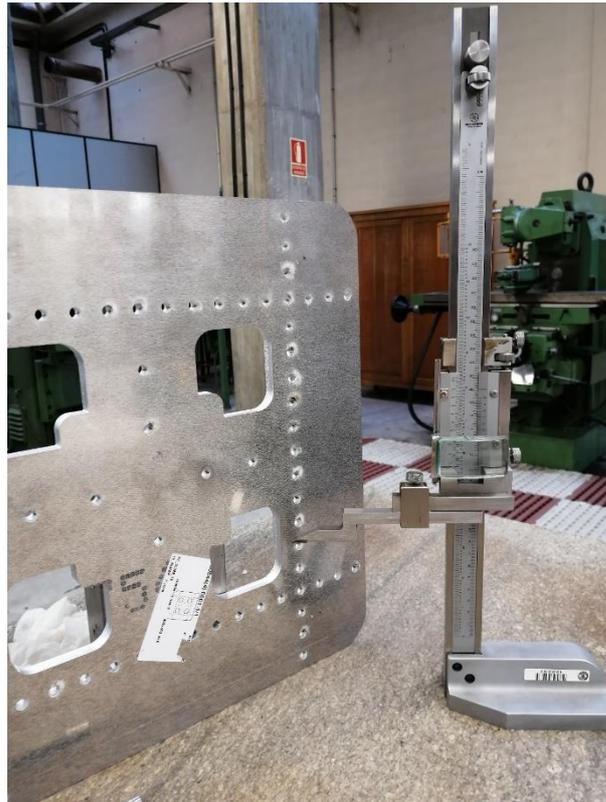
- 2x Placa inferior
- 1x Placa superior
- 2x Placa de refuerzo
- 16x Zanco

Una vez recibidas las piezas encargadas, hay que realizar manualmente todos los taladros que están en el diseño de esas piezas, así como otros mecanizados como por ejemplo operaciones de avellanado o roscado. Todas estas operaciones se van a realizar en el Taller de Fabricación de la Sede Francisco Mendizábal de la Escuela de Ingenieros Industriales.

Para el mecanizado de estos taladros, primeramente es necesario marcar su posición exacta mediante la utilización de un gramil, elemento que se observa

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

en la Figura 38. Este instrumento nos permite marcar la pieza de metal para posicionar cada uno de los taladros en las coordenadas exactas en las que estaban diseñados. Una vez realizada la marca en las coordenadas exactas, se golpea con una punta de marcado para dejar en la pieza metálica un pequeño agujero, que permitirá, posteriormente, que la broca del taladro perforo con mayor facilidad.



*Figura 38. Placa superior con gramil para marcar la posición de los taladros que faltan*

Una vez estén marcadas las posiciones exactas de todos los taladros que hay que realizar, se procede a su mecanizado, que se realizará en un taladro de columna convencional (Figura 39).

En el caso de los zancos y de las placas de refuerzo no hay ningún problema, todos los mecanizados se realizan con facilidad. Pero en las placas inferiores y en la placa superior, debido a sus grandes dimensiones, los taladros del centro, destinados a la unión de la placa con el *slider* del motor, hay que realizarlos en otro taladro de columna más grande (Figura 40), ya que, en este, la placa golpea con la columna y no llega la broca a los taladros centrales.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD



*Figura 39. Mecanizado de una de las placas mediante un taladro de columna*



*Figura 40. Taladro de columna de grandes dimensiones*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Con el taladro de columna, se realizarán también los avellanados necesarios. Esta operación se realiza empleando una broca para avellanar, en vez de una broca para taladrar. Estas brocas son más anchas, acabadas en una punta con el ángulo apropiado para el avellanado (90 grados en este caso).

Para comprobar la profundidad del avellanado se tomará como referencia el tornillo que se vaya a usar posteriormente (ISO 10642 M5 o ISO 10642 M6, en cada caso) hasta ver que la profundidad del taladro oculta totalmente la cabeza de dicho tornillo.

Una vez realizada esta operación correctamente en una de las perforaciones, se toma esta como referencia y se bloquea el taladro en la profundidad del avellanado realizado. Así, con la profundidad fijada, el resto de taladros en los que sea necesario realizar también esta operación, van a tener la misma profundidad de avellanado.

Por último, después de realizar tanto los taladros como los avellanados de aquellos agujeros en que sean necesarios (ambas operaciones realizadas en el taladro de columna), hay que roscar aquellos taladros que se precise que sean roscados.

Para realizar esta operación, se fija la pieza cuyos taladros se quieren roscar a una mesa con la ayuda de un gato, y se procede al roscado de dichos taladros mediante machos de roscar, del diámetro de rosca apropiado para cada taladro (Figura 41).



*Figura 41. Placa fijada a la mesa mediante un gato para el roscado de algunos de sus taladros*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Los machos de roscar son herramientas que permiten realizar roscas interiores. Son de un material muy duro y, mediante su giro, realizan la forma de la rosca en un agujero de una pieza metálica, al ser este material más blando que el de la herramienta.

Las piezas de este proyecto son de aluminio, que es un material muy blando, por lo que no sería necesario, pero, por si acaso, se utiliza un aceite lubricante para evitar la fractura de los machos de roscar.

Además, para evitar que, al apretar el gato, este deje alguna marca en la pieza metálica, se coloca justo encima de la pieza una tabla de madera para que sea esta la que haga el contacto con el gato.

En el caso de las piezas pequeñas, estas no serán fijadas con un gato a la mesa, sino que se inmovilizarán por medio de una mordaza para poder roscar sus taladros, como es el caso de los zancos, tal y como puede observarse en la Figura 42.



*Figura 42. Zanco inmovilizado con una mordaza para el roscado de sus taladros*

### 5.1.2. FABRICACIÓN DEL MANDO

El mando al completo se va a fabricar en material PLA, mediante impresora 3D. Todas las piezas que van a formar parte del mando se van a realizar en una impresora 3D en el Centro Tecnológico CARTIF, en el Parque Tecnológico de Boecillo (Valladolid).

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Las piezas que se van a fabricar son las ya mencionadas en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*: la parte superior y la parte inferior. Ambas piezas se fabricarán por duplicado, ya que se van a montar en total dos mandos idénticos, uno para cada motor.

Una de las zonas críticas de la fabricación del mando es que encajen la parte superior con la parte inferior, en primer lugar. En segundo lugar, que los elementos que hay que instalar en el mando (botones, LEDs, pulsadores, potenciómetro y selector) encajen en sus respectivos agujeros sin dejar holguras. Y, por último, que ocurra lo mismo, que encaje en su lugar sin holguras ni errores, el conector DB-9 a la hora de su instalación.

Las tolerancias de fabricación de la impresora 3D en la que se han elaborado estas piezas son importantes, por lo que no se ha obtenido una versión definitiva del mando hasta el tercer intento de fabricación.

El resultado final es aceptable y cumple con todos los objetivos previstos (Figura 43):



Figura 43. Resultado de fabricación del mando: parte inferior (izquierda) y parte superior (derecha)

## 5.2. MONTAJE

Una vez fabricadas todas las piezas anteriormente diseñadas, tanto las de la mesa como las del mando, hay que proceder al montaje del conjunto. En total, van a existir tantos apartados de montaje, como apartados del proyecto existen:

- Montaje mecánico de la mesa.
- Montaje del mando: incluye el montaje de todos los componentes del mando y el montaje de todo su cableado.
- Montaje de la caja: incluye el montaje de sus componentes y todo el cableado interno.

### 5.2.1. MONTAJE MECÁNICO DE LA MESA

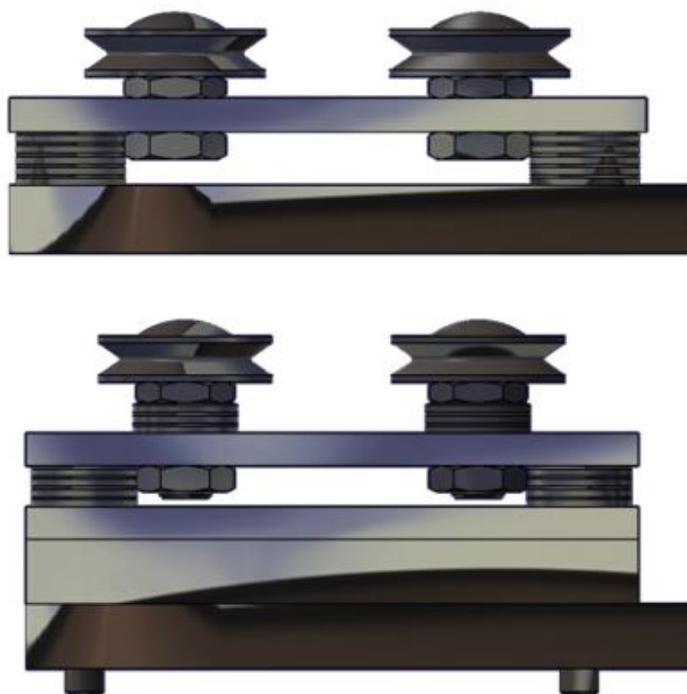
Previo al montaje de la mesa, se observa que es necesario tener acceso a los rodamientos excéntricos para poder variar dicha excentricidad y corregir holguras, hecho que no estaba contemplado en el diseño. Por ello, los rodamientos no pueden ir roscados en los zancos como se había diseñado, sino que tienen que ser pasantes para poder tener acceso a su tuerca y su contratuerca.

De esta manera, va a haber un cambio con respecto al diseño inicial, que es sustituir el último zanco por una pletina de aluminio de 5 mm de espesor y 20 mm de anchura, levantada por arandelas en sus dos apoyos hasta conseguir la altura que se necesitaba inicialmente con los zancos. Con esta alternativa se consigue que los rodamientos puedan ser pasantes a esta nueva pieza y así poder variar las excentricidades de los rodamientos oportunos mediante el giro de su tuerca. Aunque ligeras, entre el módulo inferior y el módulo superior va a haber algunas diferencias en cuanto al cambio de diseño mencionado (Figura 44).

En el caso del módulo inferior, como hay margen de altura, se puede permitir sustituir un segundo zanco por una pletina, para reducir dicha altura sobrante, que no deja de ser otro de los objetivos de este proyecto.

En el **CAPÍTULO 3. COMPONENTES COMERCIALES**, se mencionó la existencia de una serie de rodamientos de perno largo (los rodamientos existentes en el Departamento), y otra serie de perno corto (los rodamientos adquiridos con posterioridad). Dichos rodamientos de perno corto van a estar situados en el módulo superior por lo que, una diferencia con el módulo inferior es que no se pueden añadir arandelas a la base del rodamiento debido a que, si se añaden arandelas, no queda longitud del perno donde poder roscar la tuerca. La

función de estas arandelas era ganar altura para salvar los tornillos que sobresalen de la placa superior por lo que, para solucionarlo, se opta por cortar esos tornillos a la hora de realizar el montaje. En el caso del módulo inferior, esos tornillos se pueden cortar o no, pero no van a influir en el funcionamiento del conjunto.



*Figura 44. Diferencias en el cambio de diseño entre el módulo inferior (abajo) y el módulo superior (arriba)*

Una vez pensado el cambio en el diseño y viendo (sobre el diseño) que este cambio funciona, se corta la pletina de aluminio en piezas de longitud igual a 94 mm, que es la longitud de los zancos.

A estas pletinas se les realizarán los mismos mecanizados que tenían diseñados los zancos: dos taladros separados por 45 mm en el centro de la pieza, para albergar los rodamientos, que serán taladros de 8,5 mm (pasantes para una rosca métrica M8, según la norma ISO 273:1979 [12]) y dos taladros de diámetro 6,6 mm (pasantes para rosca métrica M6, según la norma ISO 273:1979 [12]) y avellanados para introducir los tornillos avellanados de la norma ISO 10642:2004 [9] con los que se fijarán a su respectiva placa inferior (placa inferior en el caso del módulo inferior y placa intermedia en el caso del módulo superior) (Figura 45).

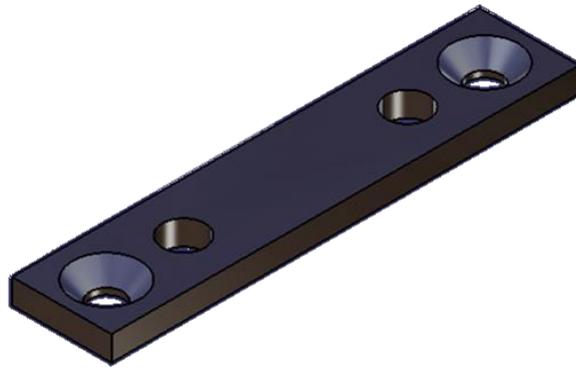


Figura 45. Diseño de la pletina para el cambio de diseño

Estos mecanizados posteriores a la fabricación de las piezas se van a realizar en el Taller de Maquetas de la Sede Paseo del Cauce de la Escuela de Ingenieros Industriales.

### 5.2.1.1. MONTAJE DE LOS MOTORES

El montaje de los motores consiste en la unión de todos sus componentes, sin realizar el montaje eléctrico con su driver y sus respectivas fuentes de alimentación.

Para el montaje de los motores, primero de todo se fija el estátor a la brida. Para ello se emplean dos de los taladros que lleva incorporada la brida, concretamente los dos taladros próximos a la abertura de esta. Para el apriete se emplean tornillos de cabeza cilíndrica para llave Allen. No es necesario el uso de tuercas ya que las bridas vienen con un inserto roscado.

Los tornillos utilizados para fijar el estátor y la brida serán de métrica M5 en el motor pequeño (módulo superior) y de métrica M6 para el motor grande (módulo inferior). Concretamente serán tornillos ISO 4762 M5x25 para el motor pequeño, e ISO 4762 M6x35 para el motor grande. La norma ISO 4762:2004 [17] es la que regula los tornillos de cabeza cilíndrica para llave Allen.

Además, ambos tornillos deben ser cortados previamente 2 mm para que no sobresalgan por la parte inferior de la brida, ya que esta va a ir sobre una placa de la mesa sísmica.

Durante todo el montaje de la mesa, serán utilizados únicamente tornillos para llave Allen. De esta manera, para todo el montaje solo será necesario el uso de un tipo de llave.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Análogamente al paso de fijar el estátor a la brida, se coloca una anilla de seguridad en uno de los extremos del vástago del motor y, a continuación, una de las piezas de goma que actuarán como final de carrera.

Posteriormente, se introduce el vástago en el motor por el extremo donde no están instalados ya la anilla de seguridad y la pieza de goma.

Una vez introducido el vástago en el motor se colocan, en el extremo contrario al de la anilla de seguridad, el resto de piezas de goma necesarias. Para que estas piezas de goma no se salgan por el extremo del *slider*, se instala una arandela suficientemente grande para que haga de tope, fijada por una tuerca, y roscada sobre el tornillo de ojo que va a formar parte de la unión del motor con la placa superior correspondiente en cada uno de los módulos (Figura 46).



Figura 46. Motor del módulo superior montado por completo a falta del tornillo de ojo

Ambos motores se montan exactamente igual, con alguna diferencia. La mayoría debido a su tamaño.

Ya se ha comentado la diferencia en los tornillos para fijar el estátor a la brida en ambos motores. Además, las arandelas de seguridad y las piezas de goma serán de diámetro 12 mm para el motor pequeño y de diámetro 20 mm para el motor grande. Las arandelas de seguridad seguirán la norma DIN 471:2011 [18], que es la norma para arandelas de seguridad en ejes. En concreto, los componentes serán: DIN 471 12x1 para el motor pequeño y DIN 471 20x1,2 para el motor grande.

Además, el motor pequeño necesita dos piezas de goma (una en cada extremo) mientras que el motor grande necesita cuatro piezas (una en el extremo exterior y tres en el interior).

El conjunto para la sujeción de los finales de carrera formado por un tornillo de ojo (DIN 444:2017 [13]), una tuerca (ISO 4032:2012 [11]) y una arandela (ISO 7093-1:2000 [19]) para cada motor será:

- Motor pequeño: tornillo de ojo DIN 444 M5x30, tuerca ISO 4032 M5, arandela plana ISO 7093 M6x18.
- Motor grande: tornillo de ojo DIN 444 M8x40, tuerca ISO 4032 M8, arandela plana ISO 7093 M8x24.

Para todo el montaje se han utilizado arandelas planas de la norma ISO 7089:2000 [10], que son arandelas planas normales. Para el montaje de los motores se han utilizado, excepcionalmente, dos arandelas planas de la norma ISO 7093-1:2000 [19], que son arandelas planas más grandes. Esto es debido a que se necesita una arandela más grande tanto para contener las piezas de goma cuando el motor funcione, como para tener superficie donde apoyar la tuerca roscada en el tornillo de ojo.

### 5.2.1.2. MONTAJE DEL MÓDULO INFERIOR

El montaje del módulo inferior consiste en armar, como paso intermedio al resultado final del proyecto, una mesa vibratoria de un grado de libertad, que se corresponde con el módulo inferior de la mesa sísmica de dos grados de libertad.

Para obtener esta mesa vibratoria de un grado de libertad hay que seguir ciertos pasos:

- 1) Hay que montar los conjuntos de zancos, pletinas, arandelas y rodamientos sobre la placa inferior.
- 2) Hay que instalar dos de las guías sobre la placa intermedia.
- 3) Hay que fijar el motor grande a la placa inferior.
- 4) Hay que realizar la unión de la parte móvil del motor con la placa intermedia.

Cada par de rodillos tiene que ir instalado sobre un conjunto formado por: un zanco, una pletina, cuatro arandelas (son las suficientes para salvar la altura de la tuerca del rodamiento) y de nuevo otra pletina, como se muestra en la Figura 47.

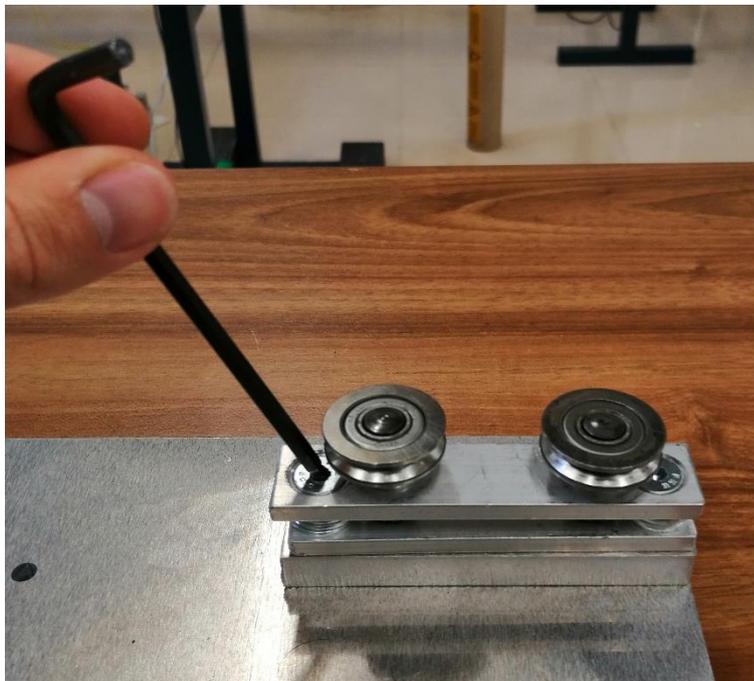
De esta manera, se consigue la misma altura que la del diseño (en este módulo se ha reducido porque se ha sustituido un segundo zanco por otra pletina), pero dejando al descubierto la tuerca del rodamiento para poder ajustar la excentricidad del mismo.



*Figura 47. Detalle del montaje de los rodamientos en el módulo inferior*

Después, el diseño prosigue igual: los rodamientos se colocan en sus respectivos taladros, sobre tres arandelas, que permiten salvar los tornillos que fijan las guías de la placa intermedia.

Para la instalación de cada uno de estos cuatro conjuntos se emplearán dos tornillos ISO 10642 M6x40 [9], que se atornillarán directamente en la placa inferior. Como el rodamiento oculta la vertical de la cabeza del tornillo, para su apriete se empleará una llave Allen de cabeza redonda, que permite apretar los tornillos lateralmente (Figura 48).



*Figura 48. Detalle de la fijación de los zancos a la placa inferior mediante una llave Allen de cabeza redonda*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

La colocación de los rodamientos se ha realizado de la siguiente manera: los rodamientos excéntricos en el interior de las guías y los rodamientos concéntricos en el exterior.

Por último, a esta placa, que es la que va a ir en la posición más inferior de toda la mesa sísmica se le colocan unos topes de goma en cada una de las cuatro esquinas, a modo de patas, de manera que toda la mesa apoye sobre ellos y que, cuando los motores estén en marcha, la mesa no resbale de la superficie sobre la que esté colocada. De esta manera, se finaliza el montaje de la placa inferior (a falta de colocar el motor) (Figura 49).



*Figura 49. Placa inferior totalmente montada (incluido el motor)*

Posteriormente al montaje de toda la placa inferior, se procede con la placa intermedia.

En ella, para completar el montaje del módulo inferior de la mesa sísmica hay que fijar el primer par de guías. Para cada una de las dos guías, se utilizarán cuatro tornillos ISO 10642 M5x30 [9], que irán pasantes en la placa intermedia y en la guía, aprovechando los taladros que vienen del fabricante. Estos se apretarán mediante la utilización de sus respectivas arandelas y tuercas. Como en todo el montaje de la mesa, se utilizará una arandela ISO 7089 6x12 con una tuerca ISO 4032 M5 [10], [11].

Al utilizar tornillos avellanados en taladros a los que previamente se les ha realizado un avellanado, la cabeza de estos tornillos no sobresale y la superficie de la placa intermedia queda totalmente plana.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Por último, en esta placa intermedia solo queda por montar la unión con el motor. Esta unión, en un principio, se había diseñado con un pasador cónico que atravesaba el tornillo de ojo fijado al *slider* del motor pero, al igual que ha pasado con los rodamientos, la unión de la placa móvil con el vástago del motor también va a sufrir ligeros cambios.

Inicialmente, la idea del pasador cónico en la unión, en cuanto a que el motor fuera fácilmente desembragable, era buena, pero, una vez el pasador está introducido, es difícil quitarlo. Por ello, era necesario variar el sistema de la unión.

El sistema que se ha ideado y, consecuentemente se ha montado consiste en un tornillo de cabeza cilíndrica introducido en el taladro central donde debía de ir el pasador cónico. Acoplado con ese tornillo está el tornillo de ojo. Así, cuando sea necesario embragar el motor, el tornillo de ojo ya está instalado y lo que hay que hacer es roscarlo en el vástago del motor, mediante el giro de este. Además, la tuerca y la arandela que se mencionaron en el montaje del motor, se colocarán aquí y se acoplarán al motor cuando se realice el embrague del mismo (Figura 50).



*Figura 50. Detalle de la parte de la unión central instalada en la placa intermedia*

En cuanto a la placa de refuerzo, sigue igual que el diseño, fijada a la placa intermedia con dos tornillos ISO 10642 M6x40 con sus respectivas arandelas ISO 7089 6x12 y sus respectivas tuercas ISO 4032 M6 [9]-[11].

Con el cambio de diseño, para introducir el tornillo de cabeza cilíndrica en el taladro central donde debía de ir el pasador cónico, hay que roscar este taladro de la misma manera que se realizó con el resto de piezas anteriormente, mediante la utilización de machos de roscar. A la hora de realizar la rosca en

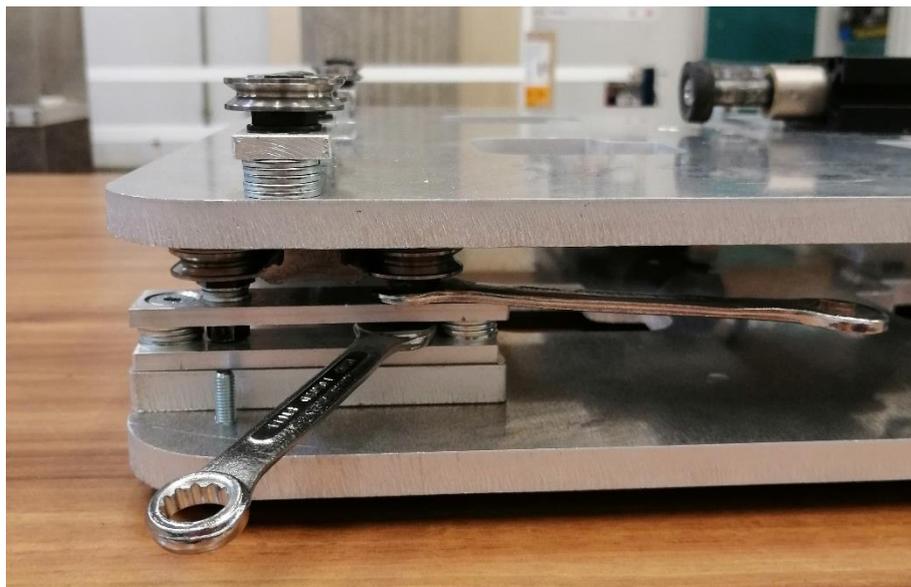
este taladro, para que esta tenga continuidad, se realizará con la placa de refuerzo ya atornillada y se roscarán las dos piezas (placa de refuerzo y placa intermedia) a la vez.

La rosca apropiada para este módulo inferior es métrica M8, que es el diámetro del taladro del extremo del vástago del motor, donde va a ir introducido el tornillo de ojo.

Con la placa inferior montada por completo (a falta de poner el motor) y la placa intermedia con todos los elementos del módulo inferior (las guías y los elementos de la unión con el motor), hay que proceder a realizar el ajuste de los rodamientos.

Se unen la placa inferior y la placa intermedia por medio de las guías y los rodamientos, que se acaban de montar y se comprueba que desliza bien, sin grandes rozamientos.

Este rozamiento entre las guías y los rodamientos se corrige mediante el ajuste de las excentricidades de los rodamientos excéntricos. Para ello, con dos llaves combinadas, se giran la tuerca y la contratuerca de cada rodamiento, como se puede ver en la Figura 51. Las tuercas y contratuercas de los rodamientos concéntricos para fijar estos correctamente al conjunto y las de los rodamientos excéntricos para variar su excentricidad y colocar el rodamiento en la posición deseada hasta comprobar que no hay holguras en la unión de los rodamientos con las guías. De esta manera, se consigue que la placa intermedia deslice perfectamente sobre la placa inferior.



*Figura 51. Detalle del ajuste de los rodamientos del módulo inferior*

Una vez ajustados los rodamientos hay que colocar el motor. Es conveniente no apretar del todo los tornillos que fijan el motor a la placa inferior hasta realizar la unión con la placa intermedia. Así, se utilizan las holguras para realizar todas las uniones, y cuando estas estén realizadas es cuando se eliminan esas holguras.

Se coloca el motor y se aprietan ligeramente los dos tornillos preparados para unir la brida del motor a la placa inferior. Después se coloca la placa intermedia mediante la unión de las guías con los rodamientos. A continuación, se desliza la placa intermedia sobre los rodamientos hasta que el tornillo de ojo colocado en la unión encaje con el extremo del vástago del motor. En ese punto se comienza a girar el vástago hasta que este y el tornillo de ojo queden totalmente unidos por la rosca, tal y como se observa en la Figura 52.

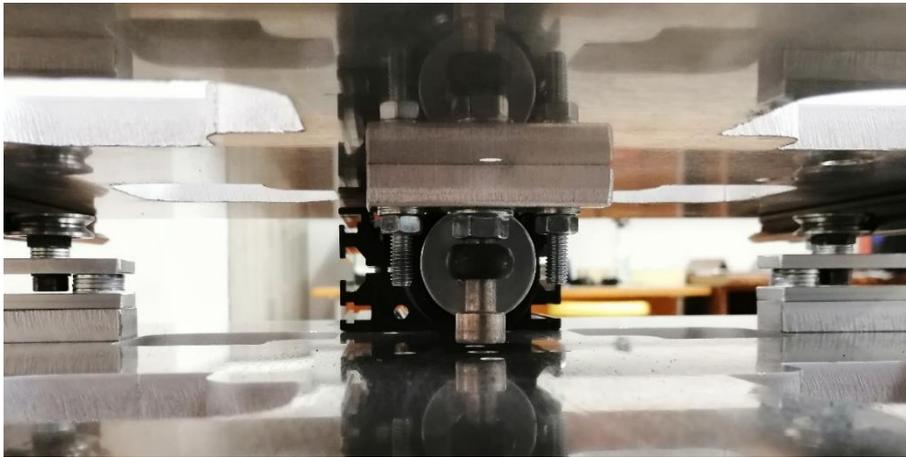


Figura 52. Detalle de la unión de la placa intermedia con el motor del módulo inferior

Con la unión del centro de la placa intermedia con el *slider* del motor totalmente realizada es cuando se aprietan definitivamente los tornillos que unen el motor a la placa inferior.

Finalmente, se obtiene una mesa sísmica funcional de un grado de libertad.

### 5.2.1.3. MONTAJE DEL MÓDULO SUPERIOR

El montaje del módulo superior es similar al montaje análogo del módulo inferior. Además, para realizar este montaje es necesario seguir el mismo orden que se ha seguido para el montaje del módulo inferior:

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

- 1) Montar los elementos que corresponden al módulo superior sobre la placa intermedia (zancos, pletinas, rodamientos, etc.).
- 2) Montar toda la placa superior (acoplar las guías a dicha placa).
- 3) Unir la placa superior con la placa intermedia introduciendo las guías montadas sobre la placa superior en los carriles formados por los rodamientos de la placa intermedia.
- 4) Ajustar los rodamientos excéntricos para un buen deslizamiento de la placa superior.
- 5) Colocar el motor sobre la placa intermedia, pero sin apretarlo definitivamente.
- 6) Realizar la unión central de la placa superior con el vástago del motor del módulo superior, colocado sobre la placa intermedia.
- 7) Fijar definitivamente el motor.

Aunque el montaje del módulo superior sea igual que el montaje del módulo inferior, va a haber alguna diferencia entre ambos montajes.

Cada par de rodamientos del módulo superior (cada rodamiento atornillado con su respectiva tuerca) se va a colocar sobre una pletina, levantada esta mediante cinco arandelas ISO 7089 8x16 y fijada a la placa intermedia por dos tornillos ISO 10642 M6x20, que son tornillos avellanados para dejar oculta la cabeza y de llave Allen [9], [10] (Figura 53).

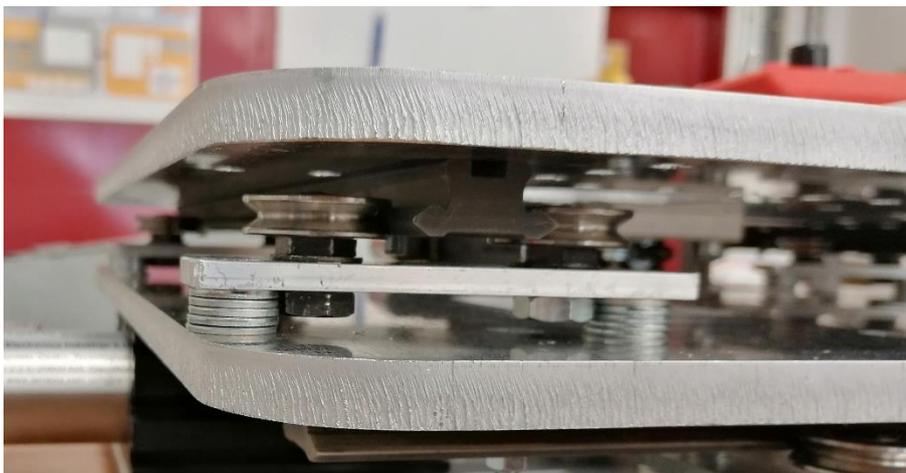


*Figura 53. Montaje de los rodamientos del módulo superior sobre la placa intermedia (incluida la colocación del motor)*

Como ya se ha explicado al comienzo de este capítulo, en este módulo los rodamientos son de perno corto, en vez de perno largo, por lo que no permite añadir arandelas en su perno. La función de estas arandelas, que en el módulo inferior sí se podían añadir, era levantar ligeramente los rodamientos para evitar el choque de la pletina con los tornillos que fijan las guías, que sobresalen de la placa superior.

Por lo tanto, estos rodamientos, se colocan sin arandelas en su perno.

Se pasa ahora a realizar el montaje de la placa superior, que consiste, al igual que en el otro módulo en fijar las dos guías, en este caso con dos tornillos ISO 10642 M5x30, dos arandelas ISO 7089 6x12 y dos tuercas ISO 4032 M5 por cada una de las dos guías [9]–[11]. La diferencia con el montaje del módulo inferior es que estos tornillos que fijan las guías, hay que cortarlos (el sobrante, 2 mm) para que no impacten con las pletinas de la placa intermedia a la hora de juntar las dos placas, como se ha explicado anteriormente. Así, se soluciona el problema de que no se puedan colocar arandelas en el rodamiento por ser rodamientos de perno corto y se evita el impacto del tornillo (Figura 54).



*Figura 54. Detalle del montaje de los rodamientos en el módulo superior (después del montaje completo). Se observa que no hay ningún tornillo que impacte con la pletina.*

Además, en esta placa hay que realizar también el montaje de la unión central, que será idéntica a la del módulo inferior, con la excepción de que tanto el tornillo de ojo como el tornillo roscado en el agujero central son de métrica M5, que es la métrica que coincide con el taladro roscado del vástago del motor (para que coincidan el taladro del vástago con el tornillo de ojo que se va a introducir).

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

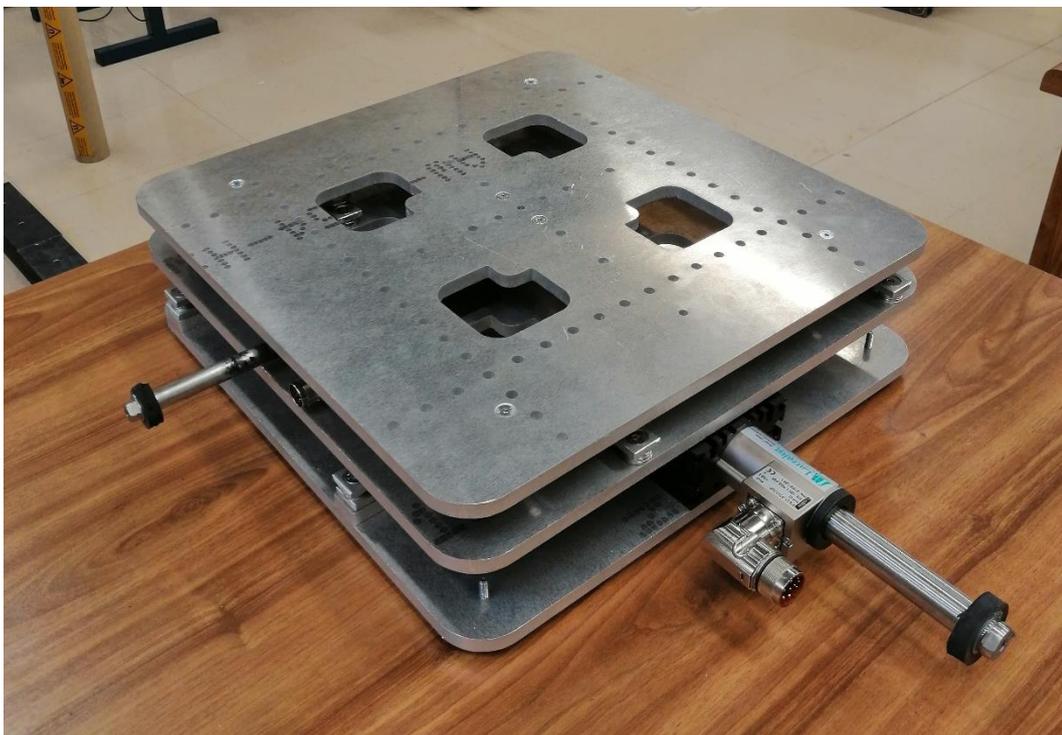
Al igual que en el módulo inferior, el roscado del agujero central se realizará con la unión del centro ya apretada y se roscarán la placa de refuerzo y la placa superior conjuntamente para que haya continuidad en la rosca.

Con la placa superior totalmente montada, se une esta al conjunto de la mesa sísmica deslizando las guías de la placa superior sobre los rodamientos. Mediante dos llaves combinadas, se aprietan los rodamientos concéntricos en su posición y se varían las excentricidades de los rodamientos excéntricos hasta comprobar que la placa superior desliza perfectamente sobre la placa intermedia (al igual que ya se hizo en el módulo inferior).

Una vez comprobado que la placa superior desliza perfectamente, se coloca el motor y se aprieta ligeramente por medio de dos tornillos ISO 10642 M5x30 que se introducen desde debajo de la placa intermedia y se fijan con dos tuercas ISO 4032 M5 encajadas en la brida del motor [9], [11].

Es entonces cuando se desliza la placa superior hacia el motor hasta que el tornillo de ojo encaje en el taladro roscado del vástago. Para realizar la unión, se gira el vástago hasta que el tornillo de ojo quede totalmente roscado. Con esta unión realizada, se aprieta definitivamente el motor.

Con este último paso, se obtiene el resultado final: una mesa sísmica funcional de dos grados de libertad, que se puede observar en la Figura 55:



*Figura 55. Montaje final de la mesa sísmica de dos grados de libertad*

### 5.2.2. MONTAJE ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

En este siguiente apartado se van a describir, por un lado, las conexiones entre todos los componentes de cada montaje motor (conexiones entre el motor y el driver, entre el driver y las fuentes de alimentación y entre todos esos elementos para conectar a la corriente) y, por otro lado, las conexiones, hechas posteriormente para poder manejar cada uno de los motores de manera externa mediante el mando fabricado para tal función. Estas conexiones van a unir los diferentes componentes electrónicos entre ellos y con los terminales del controlador de cada motor.

#### 5.2.2.1. CABLEADO ENTRE ELEMENTOS DEL MOTOR

En primer lugar, se va a describir brevemente el driver de ambos motores, que es idéntico en ambos, y va a ser el componente del motor en el que se van a conectar la mayoría de cables y se van a realizar la mayor parte de las conexiones. Al driver se van a conectar el motor, las fuentes de alimentación y los componentes electrónicos del mando.

Este controlador tiene cuatro zonas principales en las que conectar cables:

- X1: MOT SUPPLY
- X2: MOT PHASES
- X3: MOT SENSOR
- X4: LOGIC SUPPLY / CONTROL

En ambos motores, las zonas X2 MOT PHASES y X3 MOT SENSOR están destinadas para la conexión con el motor directamente mediante el cable propio de cada motor: LINK05-Y/R-2 en el caso del motor del módulo superior, y LINKS05-Y/C-4 en el caso del motor del módulo inferior. Estos dos cables se diferencian en que el cable del motor pequeño es un cable normal mientras que el cable del motor grande es un cable de alta flexibilidad. Además, no pueden ser intercambiados debido a que el motor pequeño tiene un conector tipo R y el motor grande tiene un conector tipo C. Por ello, cada motor precisa de su propio cable.

La zona del driver X1 MOT SUPPLY sirve para suministrar energía al motor, por lo que es aquí donde hay que conectar una fuente de alimentación. Esta zona del driver tiene dos terminales, uno negativo y otro positivo, que hay que conectar con los terminales negativo y positivo de la fuente de alimentación de 72 V de cada motor: la del motor pequeño, de 500 W y la del motor grande, de 1000 W.

Para ello, se utilizará un cable bipolar, recubierto con material aislante. Los dos conductores en su interior se conectarán uno al borne negativo (cable marrón) y otro al borne positivo (cable azul).

La zona del driver X4 LOGIC SUPPLY / CONTROL sirve para poder controlar el motor de manera externa y, por lo tanto, también hay que dotarla de alimentación. Está compuesta por once terminales, de los cuales dos son entradas de alimentación, dos son salidas digitales, otras cuatro son entradas digitales y tres entradas analógicas.

En ambos motores, en la entrada 9. *AnIn (Analogical Input)*, se va a insertar un cable, acabado en un conector BNC para, como se ha explicado en capítulos anteriores, introducir al motor una señal analógica.

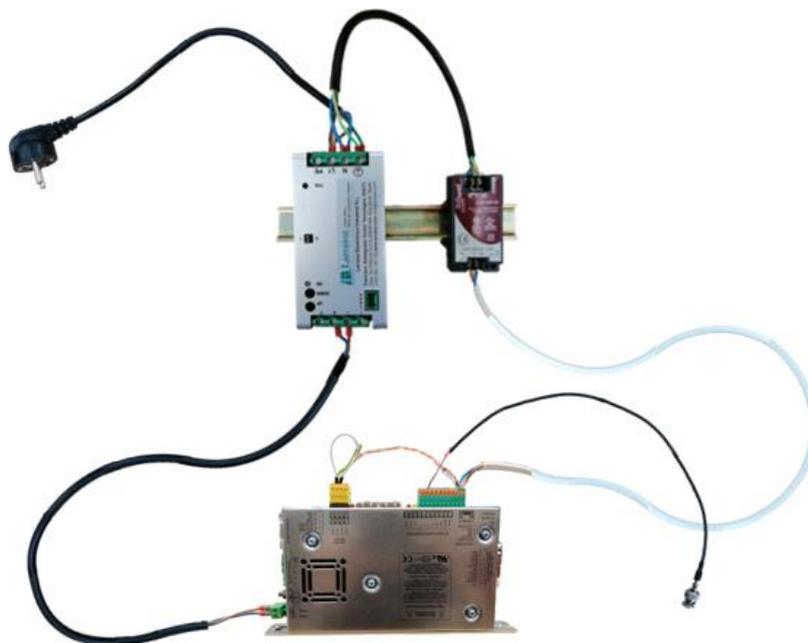
También en ambos motores, los dos primeros terminales de estos once que posee el driver se van a emplear para conectar la fuente de alimentación adicional, que va a suministrar energía a todos los elementos que van a controlar el motor de manera externa. Así, se utiliza la entrada 1. *DGND* y la entrada 2. *24VDC* del driver para conectar los cables que irán a los bornes negativo y positivo, respectivamente, de la fuente de alimentación adicional de cada uno de los dos motores. En el caso del motor del módulo superior, la fuente de alimentación adicional es de 24 VDC y 25 W, mientras que la del módulo inferior será de 24 VDC y 100 W.

Para esta conexión se utiliza un cable recubierto con aislante, bipolar (con dos cables en su interior). Se utilizará el cable marrón para el polo negativo y el cable azul para el polo positivo.

Con la fuente de alimentación de 72 V conectada al driver en la zona que suministra energía al motor, y la fuente de 24 VDC conectada al driver para suministrar energía a los componentes electrónicos, además de con el cable de entrada analógica instalado ya en los drivers de ambos motores, los montajes de los componentes del motor del módulo superior y del módulo inferior van a tener algunas diferencias.

En el caso del motor pequeño, la fuente de alimentación adicional de 24 VDC se va a conectar con la fuente de alimentación principal de 72 V – 500W. Para ello se utilizará un cable monofásico tripolar (tres conductores en su interior), donde se conectará el cable marrón a la fase, el cable azul al neutro y el cable amarillo-verde a tierra, en un extremo en una fuente de alimentación y en el otro extremo, en la otra. Se utilizará otro cable monofásico tripolar donde se conectarán de igual manera (cable marrón a fase, cable azul a neutro y cable amarillo-verde a tierra) los cables en la fuente de alimentación principal, y con un cabezal de enchufe tipo F en el otro extremo del cable, para conectar directamente a la corriente monofásica. En la Figura 56 está detallado el

esquema del montaje eléctrico de todos los componentes del motor del módulo superior (motor pequeño).



*Figura 56. Esquema del montaje de todos los componentes del motor del módulo superior*

De este modo, con un único enchufe conectado a la corriente monofásica, se alimenta a todos los elementos del motor.

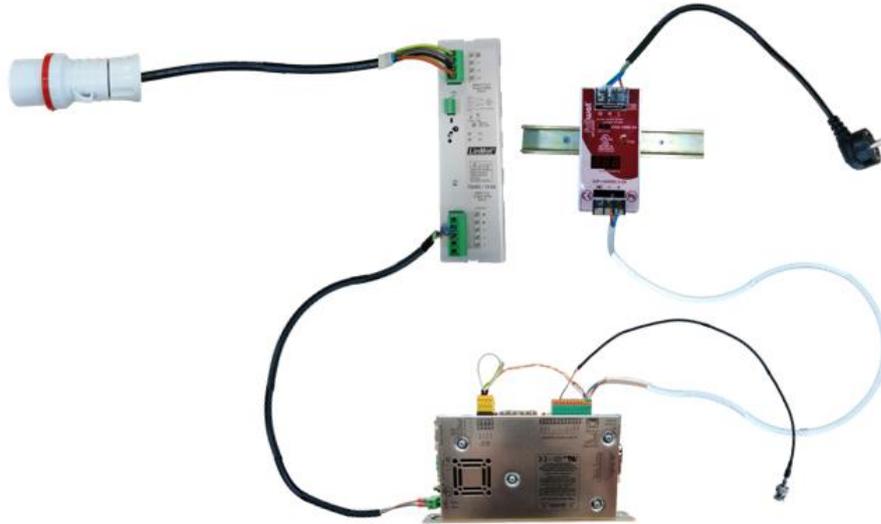
En el caso del motor grande, en cambio, las dos fuentes de alimentación no están unidas, sino que la fuente de alimentación principal de 72V – 1000 W solo suministra energía al motor, y la fuente de alimentación adicional de 24 VDC – 100 W solo suministra energía al controlador y a los componentes electrónicos.

De esta manera, hay que conectar las dos fuentes de manera independiente para un correcto funcionamiento del motor:

La fuente de alimentación de 72 V- 1000 W se alimenta directamente de la corriente trifásica. Para ello, se utilizará un cable tetrapolar acabado en un cabezal de enchufe trifásico. Dentro del cable, el cable amarillo-verde se conecta a tierra y los cables gris, negro y marrón a cada una de las tres fases (L1, L2 y L3, respectivamente).

La segunda fuente de alimentación se conecta directamente a la corriente monofásica con un cable monofásico tripolar acabado en un cabezal de

enchufe tipo F. Al igual que en todo el montaje eléctrico, hay que conectar el cable marrón a la fase, el cable azul al neutro y el cable amarillo-verde a tierra. En la Figura 57 se puede observar el esquema del montaje eléctrico de los componentes del motor del módulo inferior (motor grande).



*Figura 57. Esquema del montaje de todos los componentes del motor del módulo inferior*

Tal y como se ha detallado en este apartado, para el funcionamiento del motor pequeño, o motor del módulo superior, es necesario conectar un único enchufe a la corriente monofásica para suministrar energía a todo el montaje.

Sin embargo, en el caso del motor grande, o motor del módulo inferior, es necesario conectar simultáneamente dos enchufes: un enchufe a la corriente monofásica (para suministrar energía al controlador y a los componentes electrónicos), y un enchufe a la corriente trifásica (para suministrar energía directamente al motor).

Así, en el caso de que se quieran realizar análisis a estructuras excitando dichas estructuras en una única dirección del espacio, solo será necesario conectar un enchufe a la corriente monofásica, ya que el movimiento lo producirá únicamente el motor del módulo superior. En el caso de querer hacer análisis a estructuras excitando estas con un movimiento combinado en dos direcciones, será necesario activar los dos motores, y, por lo tanto, será imprescindible conectar dos enchufes a la corriente monofásica y uno a la

corriente trifásica para dotar de energía a todos los componentes motores necesarios para tal fin.

### 5.2.2.2. CABLEADO ENTRE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS DEL MANDO

Todos los elementos que se ha previsto instalar en el mando, como son el interruptor, el selector, el potenciómetro y todos los pulsadores y LEDs van a estar conectados con la fuente de alimentación adicional de 24 VDC y con el driver del motor, concretamente con la zona X4 LOGIC SUPPLY / CONTROL para el control externo del motor. Esta unión se va a realizar por medio de un cableado que se va a describir a continuación.

Además, este circuito eléctrico-electrónico va a ser idéntico en ambos motores.

En primer lugar, el interruptor va a ir conectado por un extremo a la fuente de alimentación, concretamente al borne positivo, y por el otro extremo al terminal 5. *In* del driver.

Asimismo, en el LED que indica si el mando está encendido o no, el ánodo va conectado al terminal 5. *In* del driver, mientras que el cátodo va conectado al borne negativo de la fuente de alimentación.

El pulsador que se usa para cambiar de modo analógico a modo senoidal va conectado por un lado al terminal 5. *In* del driver y por el otro al terminal 6. *In*.

Los LEDs que indican el modo de funcionamiento, analógico o senoidal, van conectados de la siguiente manera: ambos cátodos van conectados al borne negativo de la fuente de alimentación, y los ánodos van introducidos en los terminales 3. *Out* y 4. *Out* del driver, respectivamente.

Los pulsadores que se usan para disminuir y aumentar la amplitud del movimiento del motor van unidos por un extremo al terminal 5. *In* del driver y, por el otro extremo, a los terminales 8. *In* y 7. *In*, respectivamente.

El selector del rango de frecuencia y el potenciómetro para regular dicha frecuencia están unidos de un modo particular:

El potenciómetro posee tres patas a las que unir cables. De ellas, las dos externas se deben conectar a los dos polos de una fuente de alimentación. Entre esas dos patas, por lo tanto, habrá una diferencia de potencial igual al voltaje que suministre dicha fuente. Este voltaje se modifica mediante el giro del potenciómetro y el resultado de esta modificación será un voltaje diferente que saldrá por la pata central de este elemento.

Así, las dos patas externas del potenciómetro irán conectadas a los bornes negativo y positivo de la fuente de alimentación de 24VDC, mientras que la central, por la que saldrá el voltaje modificado, irá conectada con el terminal 9. *AnIn* del driver, que será la entrada de señal analógica. El conmutador para cambiar el rango de frecuencia va conectado en serie entre la pata del potenciómetro que va al polo positivo de la fuente de alimentación y dicha fuente de alimentación.

El potenciómetro del que se dispone soporta, como máximo, 10 V, por lo que, además de las conexiones ya explicadas, hay que formar un circuito reductor de voltaje, mediante el acoplamiento de resistencias en serie y en paralelo [20]. La formación de este circuito reductor permite transformar esos 24 V que salen de la fuente de alimentación en los 10 V que puede soportar el potenciómetro utilizado (Figura 58).

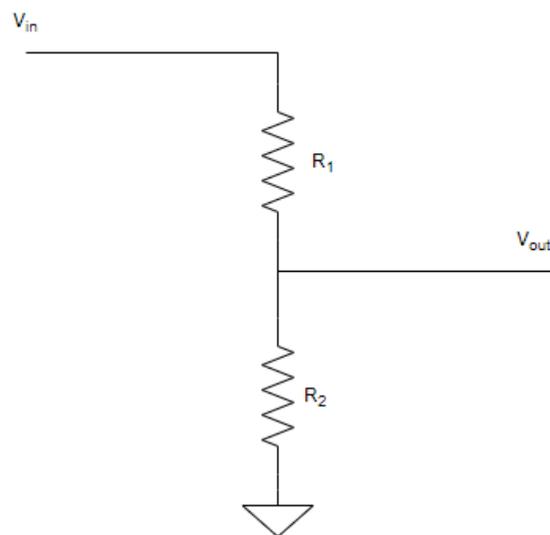


Figura 58. Esquema del reductor de voltaje

Con este esquema de la reductora de voltaje, y aplicando el Primer Lema de Kirchhoff, más conocido como la Ley de corrientes, a dicho circuito, se obtiene la Ecuación (1). Para completar el circuito eléctrico de la reductora basta con buscar dos valores de resistencias  $R_1$  y  $R_2$  que cumplan dicha ecuación, siendo el voltaje entrante de 24 V y el voltaje saliente de 10 V. El desarrollo hasta llegar a esta ecuación está descrito en el ANEXO III. *CÁLCULO DE LA REDUCTORA DE VOLTAJE*.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (1)$$

Así,  $R_2$  será de  $22.000 \Omega$ , mientras que  $R_1$  será de  $30.200 \Omega$  que, al no disponer de una resistencia de este valor, se compondrá de la suma de dos resistencias en serie, una de  $22.000 \Omega$  idéntica a  $R_2$  y otra de  $8.200 \Omega$ .

Con todo lo que se ha explicado, incluido el conjunto de resistencias para reducir el voltaje entrante al potenciómetro, el circuito completo queda como se observa en la Figura 59, con las conexiones realizadas entre todos los elementos electrónicos y estos conectados a cada una de las entradas o salidas del driver del motor.

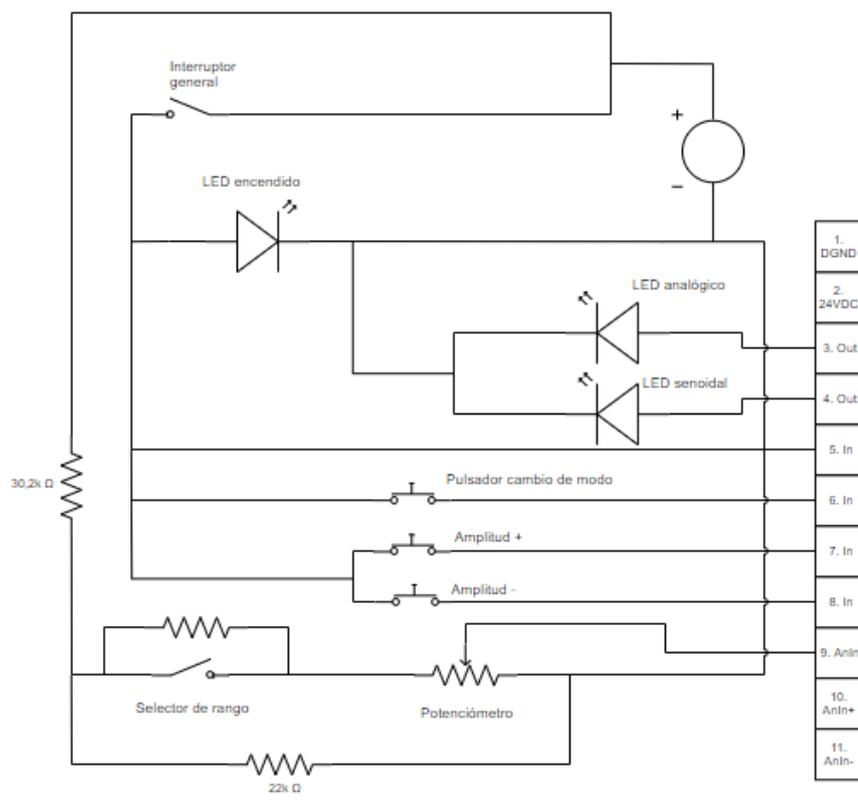


Figura 59. Esquema del circuito electrónico

Este circuito funciona de la siguiente manera:

Cuando se conecta la fuente de alimentación a la corriente, esta suministra energía al driver porque ya está conectada a él previamente (en los terminales

1. *DGND* y 2. *24VDC*, pero no al conjunto de elementos electrónicos porque el interruptor general está apagado.

En el momento en el que se activa el interruptor, el circuito se cierra y, por un lado, se enciende el LED que indica que el conjunto está activado y, por otra parte, al driver le llega una señal por la entrada 5. *In*, que va a estar configurada como la receptora de señal de encendido (*Switch ON*).

El driver recibe esta señal y conecta la salida 3. *Out*, encendiendo así el LED que indica que se está en un modo analógico, hasta que el driver reciba señal por la entrada 6. *In* porque se ha accionado el pulsador de cambio de modo. Momento en el cual el driver “cierra” la salida 3. *Out*, para abrir la salida 4. *Out*, encendiendo el LED que indica que se está en un modo senoidal.

Cabe decir, que va a haber dos modos analógicos y dos modos senoidales, por lo que el motor iniciará en el primer modo analógico y pasará por el segundo analógico y cada uno de los dos senoidales cada vez que se accione el pulsador de cambio de modo.

En el caso del resto de elementos, cuando se pulsen los botones o se gire el potenciómetro, el driver recibirá señal de que se han accionado dichos elementos por cada una de las entradas y mandará al motor la respuesta correspondiente: variar la frecuencia o aumentar o disminuir la amplitud del movimiento del motor.

Además, dichos componentes electrónicos van a ir instalados en el mando, ya diseñado y fabricado para este fin. Este mando va a alojar todo el cableado de los componentes electrónicos, y la unión del mando con el resto del conjunto de la mesa sísmica se va a realizar mediante la conexión o desconexión de un único cable.

Por ello, el mando ya lleva incorporado un agujero para instalar una parte (“parte hembra”) de un conector DB-9. La otra parte de este conector se instalará en la caja donde se van a colocar el driver y las fuentes de alimentación. Por lo tanto, el circuito descrito en la Figura 59, se va a dividir en dos partes, colocando justo antes y justo después de esa división un conector DB-9. Estos dos conectores serán uno el negativo del otro, de tal manera que encajen entre sí las dos clavijas. En el lado del circuito del mando, se colocará el conector “hembra”, mientras que en la parte del circuito del driver se montará el conector “macho”.

Tal y como se puede observar en la Figura 60, el circuito eléctrico-electrónico se divide en dos y se coloca una parte del conector DB-9 a cada extremo de la partición.

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

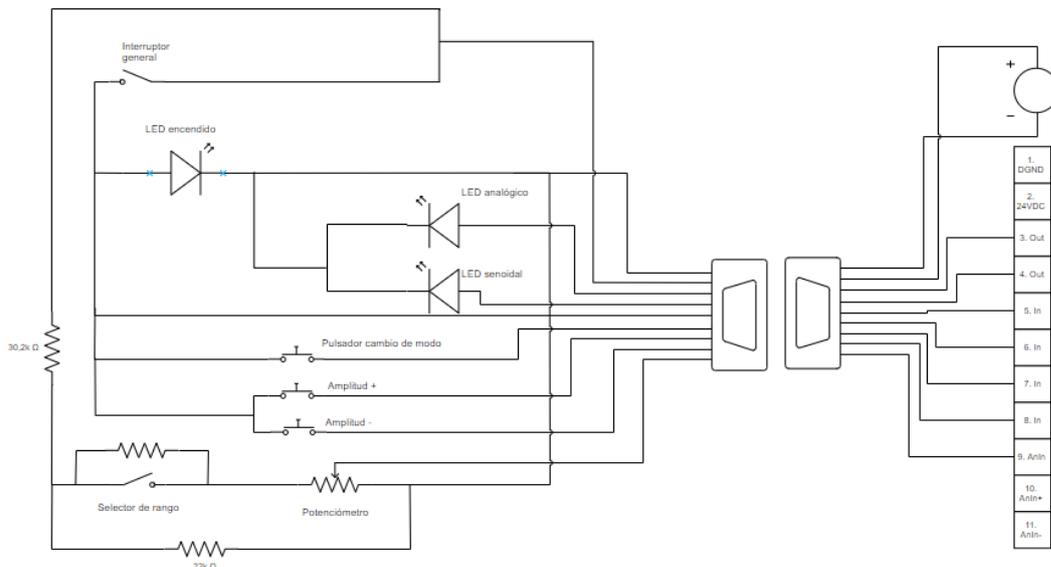


Figura 60. Esquema del circuito electrónico con el conector DB-9

El conector DB-9 tiene nueve pines a los que soldar cables. Para que no haya confusión, los cables se van a unir a los respectivos pines de la siguiente manera:

- Pin uno: todos los cables que van al borne negativo de la fuente de alimentación.
- Pin dos: todos los cables que van al borne positivo de la fuente de alimentación.
- Pin tres: todos los cables dirigidos al terminal 3. *Out* del driver.
- Pin cuatro: todos los cables que van al terminal 4. *Out* del driver.
- Pin cinco: todos los cables que van a la entrada 5. *In* del driver.
- Pin seis: todos los cables que a la entrada 6. *In* del driver.
- Pin siete: todos los cables que a la entrada 7. *In* del driver.
- Pin ocho: todos los cables que a la entrada 8. *In* del driver.
- Pin nueve: todos los cables que van a la entrada 9. *AnIn* del driver.

Las conexiones de los cables a los pines del conector DB-9 tienen que estar realizadas correctamente y de manera idéntica en las dos partes del circuito, ya que, si en un lado del circuito se conecta un cable a un pin y en el otro, la continuación de ese cable está conectada a un pin diferente, el sistema no va a funcionar, e incluso va a dar problemas.

Así, se sueldan dichos cables a las patillas de la parte trasera correspondientes del conector DB-9, tanto en la parte “hembra”, ubicada en el mando fabricado,

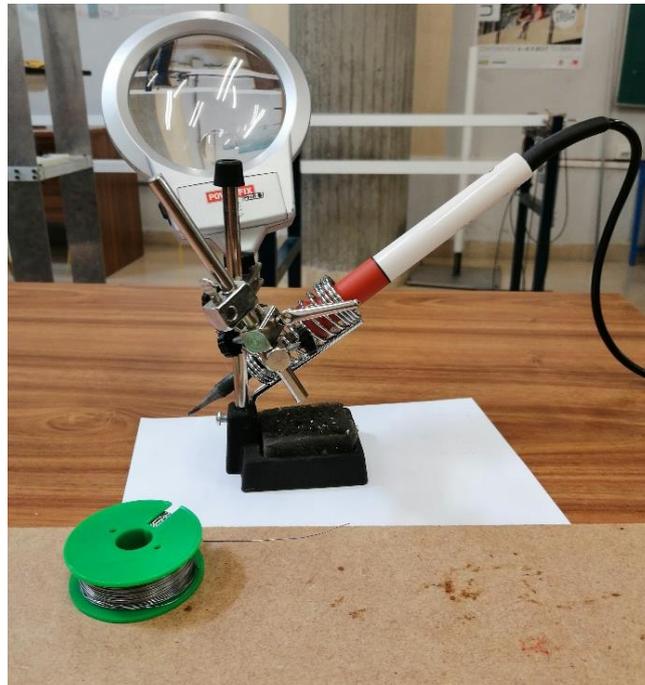
## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

como en la parte “macho” que va a ir ubicada en la caja del driver y las fuentes de alimentación (Figura 61).



*Figura 61. Detalle de la soldadura del conector DB-9 "macho" en el extremo del driver*

Estas uniones se realizan con un equipo de soldadura para electrónica, concretamente el que se puede observar en la Figura 62. Con este equipo y con un carrete de hilo de estaño se realizan las soldaduras de los cables a sus correspondientes pines en el conector.

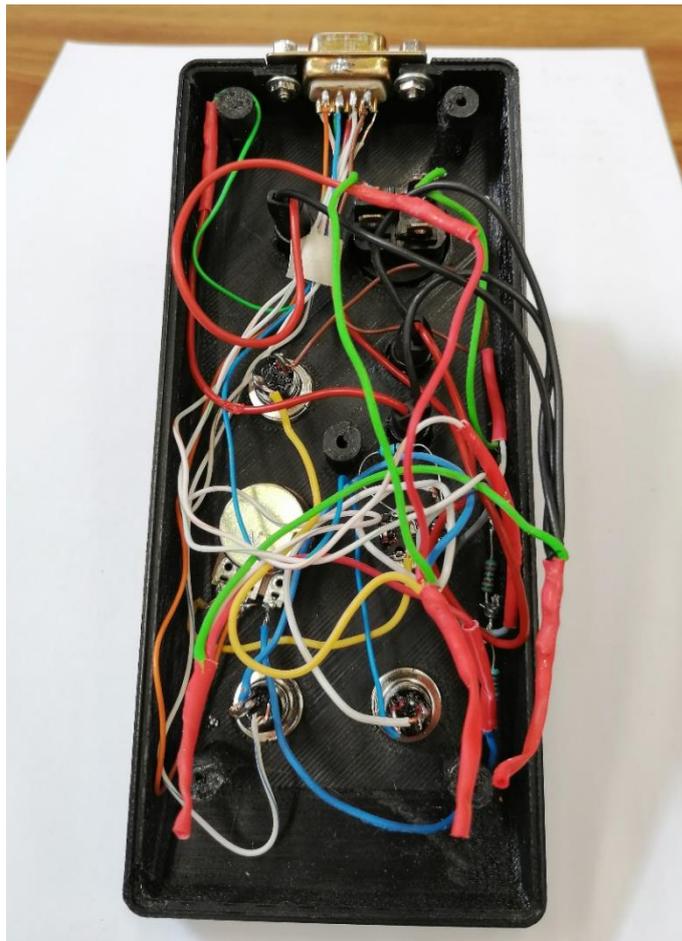


*Figura 62. Soldador de electrónica con estaño*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Posteriormente a la soldadura de los nueve cables del conector DB-9, se va a utilizar esta herramienta también, para soldar los cables necesarios a la hora de realizar las uniones entre los componentes electrónicos. Además, también será preciso realizar soldaduras de dos o más cables o de un cable con las resistencias que hay que añadir en el circuito. Para esta tarea, se utilizará material termosensible con el objetivo de dejar ocultas las soldaduras y el interior de los cables y evitar contactos indeseados.

Para realizar las uniones entre los componentes electrónicos, anteriormente hay que haber colocado cada uno de ellos en su lugar correspondiente. Los pulsadores, el conmutador y el potenciómetro se introducen por la parte interna del mando y se fijan con una tuerca desde el exterior, por lo que, una vez soldados los cables correspondientes, estos elementos pueden ser retirados. En el caso del interruptor y de los LEDs, se colocan a presión en el taladro correspondiente, por lo que una vez sus cables estén soldados, no pueden ser retirados.



*Figura 63. Mando con todo el cableado en su interior finalizado*

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Cuando todos los cables y resistencias estén soldados y todos los componentes electrónicos estén unidos correctamente, el resultado final es el que se puede observar en la Figura 63, en la que se también se puede apreciar que ya se ha fijado el conector DB-9 en sus taladros correspondientes, con los tornillos especiales para este tipo de conectores, como se explicó anteriormente en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*.

Con todo el cableado terminado, ya solo queda cerrar el mando, por lo que se unirán las dos partes del mando fabricadas, la parte inferior y la parte superior, con todo el cableado en su interior y los componentes electrónicos (interruptor, LEDs, botones, conmutador y potenciómetro) ya instalados.

Para fijar estas dos partes, se emplean los tornillos autorroscantes que se mencionaron en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*, de la norma ISO 7049:2011 [15], concretamente cinco por cada mando, de métrica M3. Estos se introducen desde el exterior de la parte inferior en sus respectivos taladros, realizados para que se pueda ocultar la cabeza de cada tornillo, y se roscan en el material de la parte superior.

Con este último proceso, se finaliza el montaje del mando. El resultado final es el que se puede apreciar en la Figura 64.



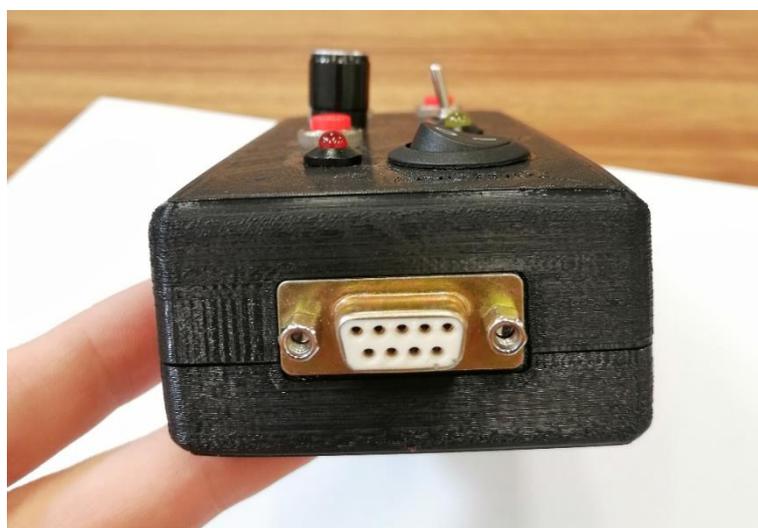
Figura 64. Mando finalizado

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

El resultado es un mando funcional, de un buen agarre debido a un diseño ergonómico, y con acceso a todos los componentes instalados cuando el mando está agarrado con la mano.

Además, gracias a la instalación de un conector del tipo del conector DB-9, el acoplamiento de este mando con el resto del equipo, se realiza mediante la conexión de un único cable, y no mediante la conexión de nueve cables, que son los que se unen al conector.

Tras el montaje del mando completo, este conector queda instalado en el mando tal y como se observa en la Figura 65.



*Figura 65. Detalle del conector DB-9 instalado en el mando finalizado*

Para poder utilizar el mando para controlar el motor de manera externa basta con unir este conector DB-9 “hembra” al conector DB-9 “macho” que se dejó unido al controlador del motor.

O bien, emplear un cable con los dos cabezales a ambos extremos del cable, a modo de alargadera, para una mayor comodidad.

### 5.2.3. MONTAJE DE LA CAJA

Dentro de este capítulo de montaje se han descrito los montajes de todos los apartados del proyecto: en primer lugar, el montaje de la mesa sísmica; en segundo lugar, el montaje del mando y los componentes electrónicos; y, por

último, en este apartado se va a describir el montaje de la caja de cada uno de los motores.

El montaje de estas cajas no se ha realizado ya que, al comprar la caja fabricada en vez de fabricarla mediante impresión 3D, queda pendiente su adquisición. Además, no hay inconveniente en dejar todos los componentes de los motores encima de una mesa o anclados a una tabla en lugar de introducirlos en una caja. Aun así, se especifica el montaje que hay que realizar en ella.

En primer lugar, cada una de estas cajas va a contener el driver y las fuentes de alimentación de cada motor. En el caso del driver, este va a ir atornillado al fondo de la caja. Para ello, se harán dos agujeros con un taladro de mano convencional para hacer pasar unos tornillos, que atravesarán la caja de plástico, y que serán fijados mediante dos arandelas y dos tuercas desde el exterior.

En el caso de las fuentes de alimentación, en vez de atornillar cada una de ellas al fondo de la caja, estas van a ir encajadas sobre un carril convencional de 30 mm de anchura. Para ello, previamente se habrá fijado el carril, de manera idéntica a como se ha hecho con el driver, por medio de dos taladros que vienen practicados en dicho carril. Una vez colocado en el fondo de la caja, se encajarán sobre él las fuentes de alimentación de manera que estas podrán ser retiradas fácilmente deslizando cada una de ellas hasta el final del carril.

Como ya se explicó en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*, a cada una de estas cajas, además, hay que practicarle cuatro agujeros.

El primero de ellos es un agujero de grandes dimensiones por donde se va a poder introducir, desde el exterior, el conector que va desde el motor hasta el driver. Este conector es muy grande por lo que, si no se conecta desde el exterior a través de un agujero en la caja, esta caja debería de tener unas dimensiones excesivamente grandes.

El segundo de los agujeros es un taladro, circular y pequeño, por donde va a salir un cable desde el controlador para poder conectar el sistema a un ordenador y mandar señal analógica al motor. Este cable es el que sale del terminal 9. *AnIn* del driver y termina en un cabezal con conector BNC, detallado en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*.

El tercero de los orificios es uno de las dimensiones de un conector C-14, para poder instalar dicho conector en las paredes de la caja. Este conector sirve para enchufar todo el conjunto a la corriente eléctrica desde el exterior mediante un

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

cable con un cabezal C-13 en uno de sus extremos y un enchufe tipo F en el extremo contrario.

El cuarto y último taladro de la caja es uno de las dimensiones de un conector DB-9. En este agujero se va a instalar el conector DB-9 del circuito detallado del lado del driver, con sus respectivos cables soldados unidos a todos los terminales del controlador.

Todas las conexiones entre los elementos contenidos en la caja ya están realizadas, salvo soldar los tres cables provenientes de la fuente de alimentación principal (cable marrón para la fase, cable azul para el neutro y cable amarillo-verde para la tierra) al conector C-14 que estará instalado en la pared de la caja.

Todos estos mecanizados están ideados para ser realizados en un futuro en ambas cajas, de manera que ambas sean idénticas. De esta manera, se consigue que todo el sistema se ponga en funcionamiento sin necesidad de abrir la caja, todas las conexiones se realizan desde el exterior.

Sin embargo, en el caso de la caja destinada a los componentes del motor grande del módulo inferior surge un inconveniente, ya que precisa, además de un enchufe para corriente monofásica (que se puede conectar a través del conector C-14), de un enchufe para corriente trifásica.

Este cabezal de enchufe para corriente trifásica es muy grande, por lo que va a ser excesivo realizar un taladro de esas dimensiones en la caja.

Por lo tanto, en la caja de este motor se dejará como provisional el realizar este taladro, o bien, se admite la excepcionalidad de abrir la caja para conectar el enchufe a la corriente trifásica.

## CAPÍTULO 6. PUESTA EN MARCHA

Para la puesta en marcha de todo el conjunto de la mesa sísmica es necesario que todos los elementos estén conectados.

En el *CAPÍTULO 5. PROTOTIPADO*, y más concretamente en el apartado 5.2. *MONTAJE*, se han descrito paso a paso las conexiones eléctricas que hay que realizar entre todos los componentes adicionales de los motores para que estos funcionen.

Además, ya se han fabricado y montado sendos mandos para el control externo del movimiento de los motores.

Por lo tanto, para la puesta en marcha de la mesa sísmica objeto de este proyecto hay que realizar tres tipos de conexiones.

En primer lugar, hay que conectar cada motor con su driver. Esto se llevará a cabo mediante el cable apropiado para cada uno de los motores: el cable *LINK05-Y/R-2* para el motor del módulo superior, y el cable *LINKS05-Y/C-4* para el motor del módulo inferior. La unión de estos cables con sus respectivos drivers es idéntica (hay que ocupar las zonas X2 MOT PHASES y X3 MOT SENSOR del driver con sus respectivos conectores), pero la unión con el motor es diferente en cada uno de ellos, por lo que estos cables no pueden ser intercambiados.

En segundo lugar, hay que conectar todo el sistema eléctrico a la corriente. Este proceso también se ha explicado con anterioridad. Si se van a realizar análisis sobre una estructura, excitando esta en una única dirección de movimiento, solo se va a utilizar el motor del módulo superior, por lo que sólo será necesario conectar un enchufe a la corriente monofásica. Si por el contrario la estructura sobre la que se quiere realizar el análisis debe ser excitada con un movimiento compuesto en dos direcciones, es necesario conectar ambos motores, por lo que será necesario conectar dos enchufes a la corriente monofásica y un tercer enchufe a la corriente trifásica. Esto es debido a que el motor del módulo superior necesita una única conexión a corriente monofásica mientras que el motor del módulo inferior necesita una conexión a corriente monofásica y otra a corriente trifásica.

Por último, si se quiere tomar el control del motor de manera externa, es necesario conectar cada uno de los mandos a su driver correspondiente. Esta operación se realiza mediante un cable con dos conectores DB-9 a cada uno de sus extremos, un conector “macho” y un conector “hembra”. Estos dos conectores de los extremos del cable se acoplarán a los conectores DB-9 complementarios, situados, uno en el mando, y el otro en la zona del driver y las fuentes de alimentación.

La unión del conector DB-9 del mando con su correspondiente conector situado en el cable, al igual que la unión similar en el extremo opuesto del cable, no solo se va a realizar mediante el acoplamiento de las dos clavijas, sino que se va a fijar mediante el apriete de dos tornillos que vienen incorporados en el cable sobre los tornillos especiales con el interior de la cabeza roscada que se instalaron en la parte delantera del mando.

Si se van a utilizar los dos motores, es necesario conectar ambos mandos mediante dos cables similares al que se acaba de mencionar.

De manera adicional, el cable que sale del terminal 9. AnIn de cada driver se puede conectar, mediante el conector BNC instalado en su extremo, a un ordenador para introducir señal analógica en el motor.

Esta operación se lleva a cabo mediante una tarjeta de adquisición de datos conectada al ordenador, disponible en el laboratorio, el hardware SIRIUS.

Mediante este equipo y el software DEWESoft, se puede enviar cualquier tipo de señal al motor.

De igual manera, este software va a servir, posteriormente, para analizar el comportamiento de las estructuras que se quieren estudiar sobre la mesa sísmica ya que, en vez de producir una señal en el ordenador y enviarla al motor, también se puede hacer la operación contraria, introducir datos al ordenador procedentes de otro instrumento, como pueden ser las aceleraciones captadas por una serie de acelerómetros o desplazamientos medidos con un láser.

Estos datos obtenidos se pueden interpretar, medir, analizar o exportar.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La mesa sísmica de dos grados de libertad diseñada y fabricada en este Trabajo de Fin de Grado cumple con todos los objetivos planteados.

En primer lugar, y el más importante, el fabricar una mesa sísmica de dos grados de libertad, totalmente funcional, para disponer de ella en el Departamento de Estructuras ya que, anteriormente, solo se disponía de una mesa sísmica de un grado de libertad compuesta mediante un motor paso a paso, diseñada y fabricada en un Trabajo de Fin de Grado anterior [3].

En segundo lugar, esta mesa sísmica diseñada y fabricada cumple con todos los objetivos planteados inicialmente, que son tener la menor altura posible, ser lo más ligera posible y desembragar los motores con facilidad.

Además, se han elaborado unos mandos con los que manejar los motores sin necesidad de conectarlos a un ordenador y se ha compactado todo el cableado de manera que quede expuesto al exterior el menor número de cables posible, ya que todo el cableado de los mandos está en su interior y la conexión con el resto del conjunto se realiza mediante un único cable.

Durante este proyecto, también se han adquirido o mejorado ciertas competencias:

- Se han utilizado programas de diseño por ordenador, como CATIA V5, tanto para el diseño de las piezas en tres dimensiones, como para la elaboración de planos de esas piezas a partir del diseño. Asimismo, se han diseñado todas las piezas pensando en su posterior fabricación: en el caso de las piezas de aluminio, para corte por láser y en el caso del mando, para fabricación con impresora 3D.
- Se ha realizado trabajo de taller, tanto a nivel de maquinaria pesada, como puede ser realizar taladros en un taladro de columna o cortar aluminio en una sierra industrial, como a nivel de herramientas ligeras, como puede ser roscar taladros mediante machos de roscar.
- Se han realizado trabajos en materia de electricidad y electrónica, gracias al montaje de todos los circuitos eléctricos y la instalación de todos los componentes electrónicos, así como soldar todos los cables mediante un equipo de soldadura de electrónica con estaño.
- Por último, se han adquirido competencias sobre elementos normalizados durante todo el montaje de la mesa vibratoria.

En cuanto a líneas futuras, la principal será aligerar todo el conjunto para obtener unos datos de aceleraciones mayores. Esta operación se va a llevar a cabo mediante dos vías: aligerar las placas y aligerar el sistema de guías y rodamientos.

- Aligerar las placas. Las placas no van a poderse aligerar mucho más. La única medida va a ser realizar las mismas placas, pero con espesores menores.  
La siguiente alternativa es sustituir esas placas de aluminio por unas placas de diferente material, como puede ser un panel sándwich, infinitamente más ligero que el aluminio.
- Aligerar el conjunto de guías y rodamientos. Al igual que la vía anterior, estos elementos no van a poder aligerarse, por lo que se va a optar por ser sustituidos por otro tipo de mecanismo más ligero, que permita el deslizamiento de las placas. La alternativa podría ser emplear guías de cajón.

Por otro lado, como línea futura, hay que finalizar, tal y como se ha especificado, la instalación de los drivers y las fuentes de alimentación en sus respectivas cajas de plástico tras su adquisición, realizando los taladros que se precisen oportunos para la conexión de los máximos elementos posibles desde el exterior.

En el apartado del mando, la línea futura posible podría ser agrupar todo el cableado de su interior en un circuito impreso, de manera que el interior del mando esté lo más ordenado posible. Además, al realizar el circuito impreso podría verse la posibilidad de reducir la altura del mando.

Finalmente, como última línea futura queda pendiente la caracterización de cada uno de los motores utilizados en este Trabajo de Fin de Grado.

## CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Wallemacq, R. Below, and D. McLean, “Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017,” Brussels, BELGIUM, 2018.
- [2] Quanser, “Shake Table II.” [Online]. Available: <https://www.quanser.com/products/shake-table-ii/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [3] J. Reyes Morales, “Diseño, prototipaje y caracterización de una mesa sísmica de 1 grado de libertad a escala,” Universidad de Valladolid, 2017.
- [4] A. Tabar, G. Russ, and B. Mason, “Design of a Two-Axis Shaking Table to Simulate Earthquakes in an Educational Setting,” in *2018 ASEE North Central Section Conference*, 2018.
- [5] Quanser, “Shake Table III XY.” [Online]. Available: <https://www.quanser.com/products/shake-table-iii-xy/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [6] “Linear Motion Technology Leader | LinMot.” [Online]. Available: <https://linmot.com/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [7] “HepcoMotion.” [Online]. Available: <https://www.hepcotion.com/es/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [8] J. L. García García, “Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones,” Universidad de Valladolid, 2016.
- [9] International Organization for Standardization, “ISO 10642:2004 - Hexagon socket countersunk head screws,” 2004.
- [10] International Organization for Standardization, “ISO 7089:2000 - Plain washers – Normal series – Product grade A,” 2000.
- [11] International Organization for Standardization, “ISO 4032:2012 - Hexagon regular nuts (style 1) – Product grades A and B,” 2012.
- [12] International Organization for Standardization, “ISO 273:1979 - Fasteners – Clearance holes for bolts and screws,” 1979.
- [13] Deutsches Institut für Normung, “DIN 444:2017-04 - Fasteners - Eye bolts,” 2017.
- [14] International Organization for Standardization, “ISO 2339:1986 - Taper pins, unhardened,” 1986.
- [15] International Organization for Standardization, “ISO 7049:2011 - Cross-recessed pan head tapping screws,” 2011.
- [16] International Organization for Standardization, “ISO 8738:1986 - Plain

washers for clevis pins -- Product grade A," 1986.

- [17] International Organization for Standardization, "ISO 4762:2004 - Hexagon socket head cap screws," 2004.
- [18] Deutsches Institut für Normung, "DIN 471:2011-04 - Retaining rings for shafts - Normal type and heavy type," 2011.
- [19] International Organization for Standardization, "ISO 7093-1:2000 - Plain washers -- Large series -- Part 1: Product grade A," 2000.
- [20] J. Fraile Mora, *Circuitos eléctricos*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2012.

ANEXO I. FACTURAS DE LOS COMPONENTES COMERCIALES

1. COMPONENTES DEL MOTOR DEL MÓDULO SUPERIOR



<b>FACTURA</b>	NÚMERO 14890	FECHA 12/06/2017	COG. PROVEEDOR	PEDIDO N.º UVA 18968 B
N.º CUENTE 4300001124	C.I.F. CUENTE ESQ4718001C			

Francisco Aristeguieta Centro Tecnológico (F.A.C.T.)  
Carrtera GI-3162 (Zarautz-Urdaneta) Km 2,2  
E-20809 Aia Gipuzkoa (Sp)  
Te: (+34) 943 140 139 Fax: (+34) 943 140 327  
www.larraioz.com com@larraioz.com

Universidad de Valladolid  
José Luis González Sánchez  
Plaza de Santa Cruz, 8  
Valladolid  
47002 - VALLADOLID ,

LARRAIOZ E. Ind., S.L. - Pk. 190 - E 20800 Zarautz (GIPUZKOA)

ALIBARAN P	CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
	27513-10	Conjunto material LinMot para centro educacional y con fines educativos.	1		
	27513-20	LINMOT LINEAR MOTOR, Stator motor lineal 23x80 high performance, conector IP67 M179	1	283,15 €	283,15 €
	27513-30	LINMOT SLIDEZ, Vástago high performance motor lineal, 270mm longitud 12mm diámetro.	1	168,36 €	168,36 €
	27513-40	LINMOT ACCESORIES, Brida motor lineal, para P01-23x80, 90mm	1	20,01 €	20,01 €
	27513-50	LINMOT ACCESORIES, Cujinete rígido para vástago 12mm	1	4,60 €	4,60 €
	27513-60	LINMOT CABLES, Cable standard motor lineal E05, conectores Y/R, 2m	1	98,74 €	98,74 €
	27513-70	LINMOT LINEAR MOTOR, Controlador motor lineal C1200, EtherCAT, 72V/25A, STO internal safety, pedido bonas por separado	1	592,69 €	592,69 €
	27513-80	LINMOT ACCESORIES, Set de conectores para controlador C1200-15	1	14,74 €	14,74 €
	27513-90	LINMOT POWER SUPPLIES, Fuente alimentación controlada 113/230VAC, 22Vdc 300W	1	373,83 €	373,83 €
	27513-100	LINMOT ACCESORIES, Conversor USB-RS232 para cables controladores LinMot, aislado	1	83,22 €	83,22 €

FORMA DE PAGO	VENCIMIENTO	BASE IMPONIBLE	1.639,34 €
Transferencia Anticipada	12/06/2017	IVA 4%	344,26 €
Realizar transferencia por 1.983,60 € a la cuenta: ES58 3035 0029 67 029 0050929		<b>TOTAL</b>	<b>1.983,60 €</b>

2. COMPONENTES DEL MOTOR DEL MÓDULO INFERIOR



<b>FACTURA</b>	NUMERO/NUMBER 16748	FECHA/DATE 27/11/2018	COD.PROV/PROVIDER.COD	PEDIDO Nº/ORDER NBR Of. 20255
CLIENTE Nº/CLIENT NBR. 4300001124	C.I.F./CLIENTE/CLIENT V.A.T. ESQ4718001C			

**Universidad de Valladolid**  
 Administración, pagos proveedores  
 Plaza de Santa Cruz, 8  
 Valladolid  
 47002 - VALLADOLID ,  
 Francisco Aristeguleta Centro Tecnológico (F.A.C.T.)  
 Carretera GI-3162 (Zarautz-Urdaneta) Km 2,2  
 E-20809 Aia Gipuzkoa (Sp)  
 Te: (+34) 943 140 139 Fax: (+34) 943 140 327  
 www.larraioz.com com@larraioz.com

LARRAIOZ E. Ind., S.L. - Pk. 193 - E 20900 Zarautz (GIPUZKOA)

ALBARANP	CODIGO/COE	DESCRIPCION/DESCRIPTION	CD./QTY	P.UN./UN.PRICE	IMPORTE/AMOUNT
-20	LINPS01-37x120F-HP-C	Conjunto material LinMot para centro educativo y con fines educativos. LINMOT LINEAR MOTOR, Stator motor lineal 37x120 high performance, conector IP67 M23/9	1	362,92 €	362,92 €
-30	LINPL01-20x360/300-HP	LINMOT SLIDER, Vástago high performance motor lineal, 360mm longitud 20mm diámetro.	1	340,86 €	340,86 €
-40	LINPF02-37x100	LINMOT ACCESORIES, Brida motor lineal, para P01-37x120	1	29,18 €	29,18 €
-50	LINPLF01-20	LINMOT ACCESORIES, Cojinete rígido para vástago 20mm	1	4,20 €	4,20 €
-60	LINKS05-Y/C-4	LINMOT CABLES, Cable ultraflexible motor lineal KS05, conectores Y/C, 4m	1	156,07 €	156,07 €
-70	LINC1250-EC-XC-1S-000	LINMOT LINEAR MOTOR, Controlador motor lineal C1200, EtherCAT, 72W/25A, STO internal safety, pedido bombas por separado	1	592,69 €	592,69 €
-80	LINDC01-C1X00-1S/X1/X4/X33	LINMOT ACCESORIES, Set de conectores para controlador C1x00-1S	1	14,74 €	14,74 €
-90	LINS01-72/1000	LINMOT POWER SUPPLIES, Puenle alimentación conmutada 3 x 340-550VAC, 72Vdc 1000W	1	472,80 €	472,80 €
-100	LINCapacitor 10'000uF/100V	LINMOT LINEAR MOTOR, Condensador auxiliar regeneración 10'000uF/100V	1	74,00 €	74,00 €
-110	LINLU02-50	LINMOT ACCESORIES, Lubricante para motores lineales estándar, 50ml	1	21,30 €	21,30 €

FORMA DE PAGO/PAYMENT TERMS Transferencia Anticipada	VENCIMIENTO/PAYMENT DUE DATA 27/11/2018	BASE IMP. TAX BASE 2.068,76 €
		I.V.A./V.A.T. 21% 434,44 €
Realizar transferencia por 2.503,20 € a la cuenta: ES58 3035 0029 67 029 0050929 enviar comprobante por fax		TOTAL AMOUNT 2.503,20 €

### 3. COMPONENTES DE LAS GUÍAS



#### OFERTA

Su Pedido :

Cliente 901  
 UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
 PLAZA DE SANTA CRUZ N°8  
 47002 VALLADOLID  
 VALLADOLID  
 Tel. 983423000 Fax.

Pedido	Fecha	Pag
158154	13/02/19	1

Dirigido a : ANTOLIN

Vendedor : 14 ANA GONZALEZ

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio	Dto	Importe	Plazo Entrega
0031	SISTEMA GV3 GUIA ESPACIADOR DOBLE CANTO GV 35084 REF: 882593	2,000u	83,9900		167,98	4 SEMANAS
0031	RODAMIENTO CONCENTRICO REF: 68J265C	4,000u	27,0300		108,12	4 SEMANAS
0031	RODAMIENTO EXCENTRICO REF: 68J265E	4,000u	27,8800		111,52	4 SEMANAS

Firmado : Total Pedido ... 387,62 Euro

Plazo de entrega salvo venta o imprevisto. >> IVA NO INCLUIDO <<



#### OFERTA



## ANEXO II. PLANOS

En este anexo se van a adjuntar los planos de todas las piezas diseñadas que se han descrito en el *CAPÍTULO 4. DISEÑO*, con la salvedad de que en los planos están contemplados los cambios de diseño explicados en el comienzo del *CAPÍTULO 5. PROTOTIPADO*.

A continuación, se presentan los planos de todas las piezas diseñadas que forman parte del conjunto de la mesa sísmica:

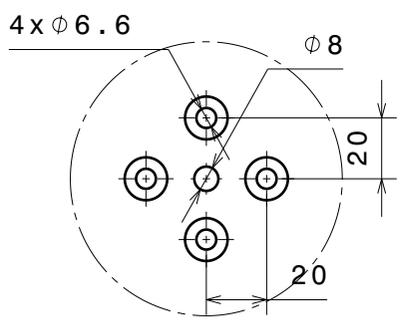
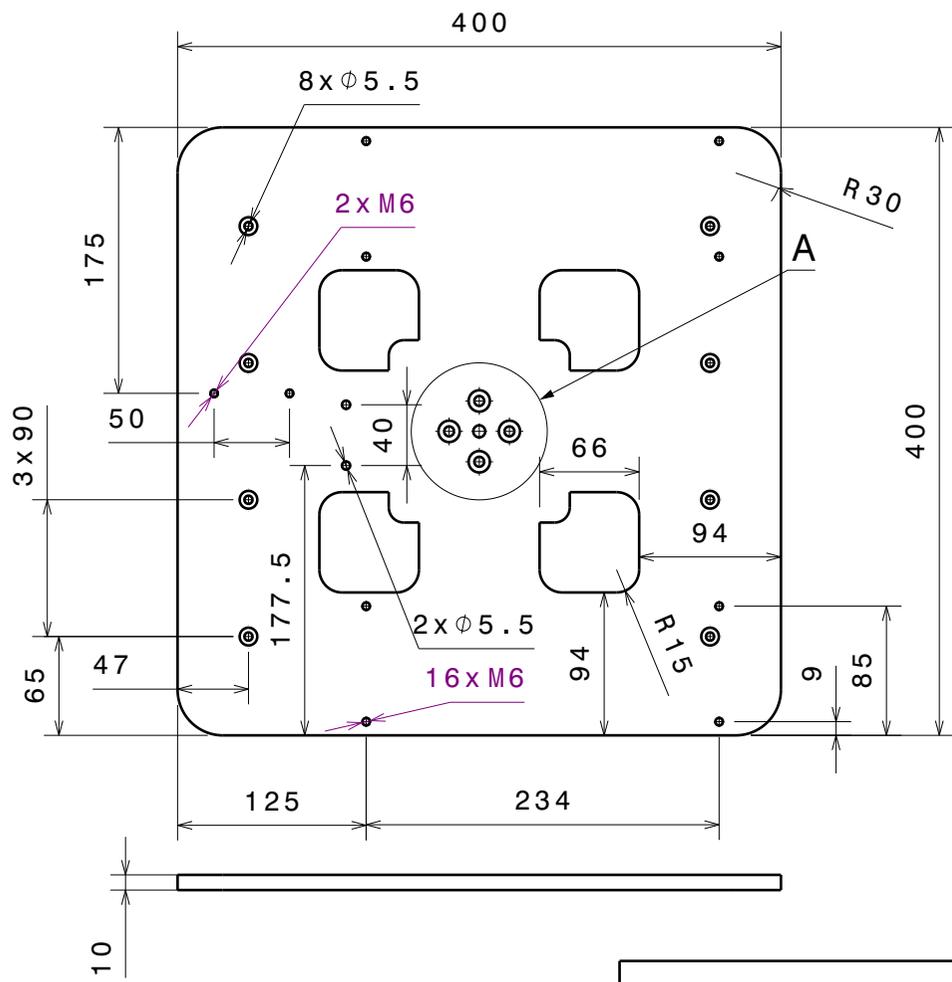
- Placa inferior
- Placa superior
- Zanco
- Placa de refuerzo
- Pletina

Además, también se van a presentar los planos de las piezas que forman el mando, con la inclusión de algunas de las cotas más representativas, aunque estas no son relevantes en cuanto a fabricación debido a que, para la fabricación mediante impresión 3D no son necesarios los planos, solo el diseño en tres dimensiones:

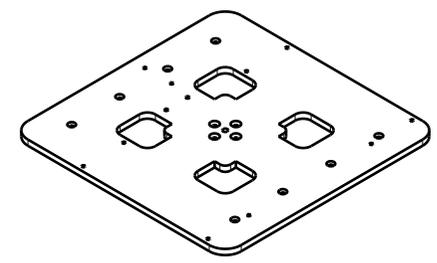
- Parte inferior del mando
- Parte superior del mando

Por último, se van a mostrar los planos de las dos partes que forman la caja, con las cotas principales.

- Caja principal
- Tapa



Detail A  
Scale: 2:5



Escala: 1:10

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 28/05/2019		<b>PLACA INFERIOR</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE XXX			
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SIZE <b>A4</b>	DRAWING NUMBER
		SCALE 1:5		WEIGHT(kg) 3,88	Ud. <b>2</b>
				SHEET 1/5	

4  
3  
2  
1

4  
3  
2  
1

D

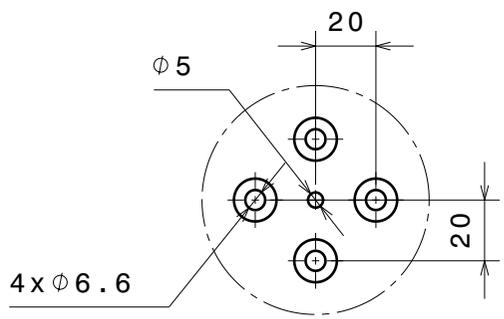
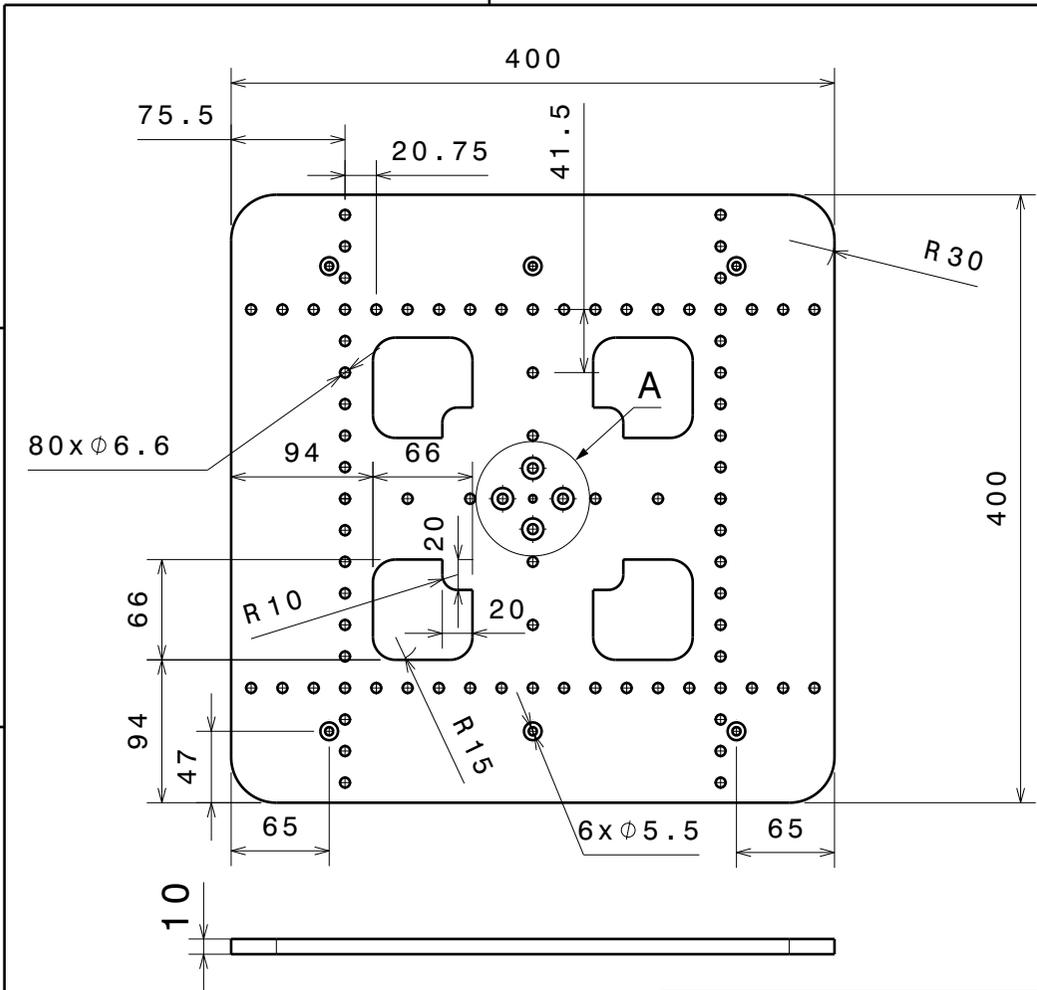
C

B

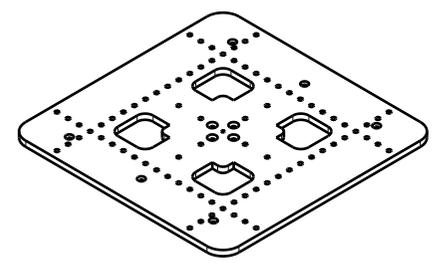
A

D

A



Detail A  
Scale: 2:5



Escala: 1:10

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 28/05/2019		<b>PLACA SUPERIOR</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE XXX			
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SIZE <b>A4</b>	DRAWING NUMBER
		SCALE 1:5		WEIGHT(kg) 3,81	Ud. <b>1</b>
				SHEET 2/5	

4

D

C

B

A

3

400

75.5

20.75

41.5

R 30

80 x Ø 6.6

94

66

A

400

R 10

20

20

R 15

66

94

47

65

6 x Ø 5.5

65

10

Detail A

Scale: 2:5

Escala: 1:10

4

3

2

1

1

D

A

D

C

B

A

4

4

3

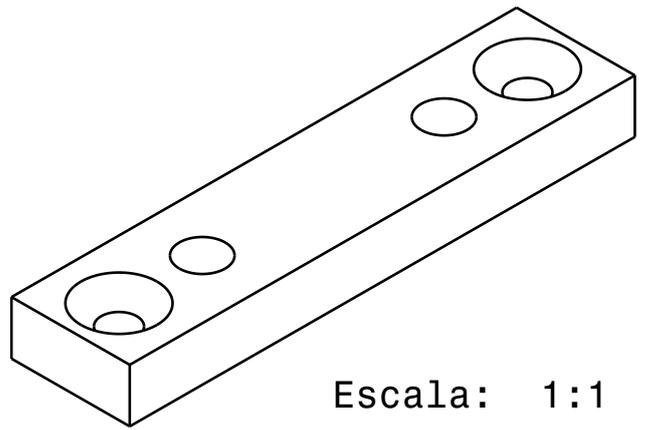
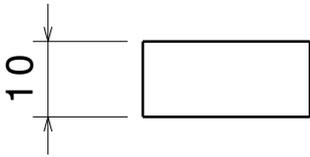
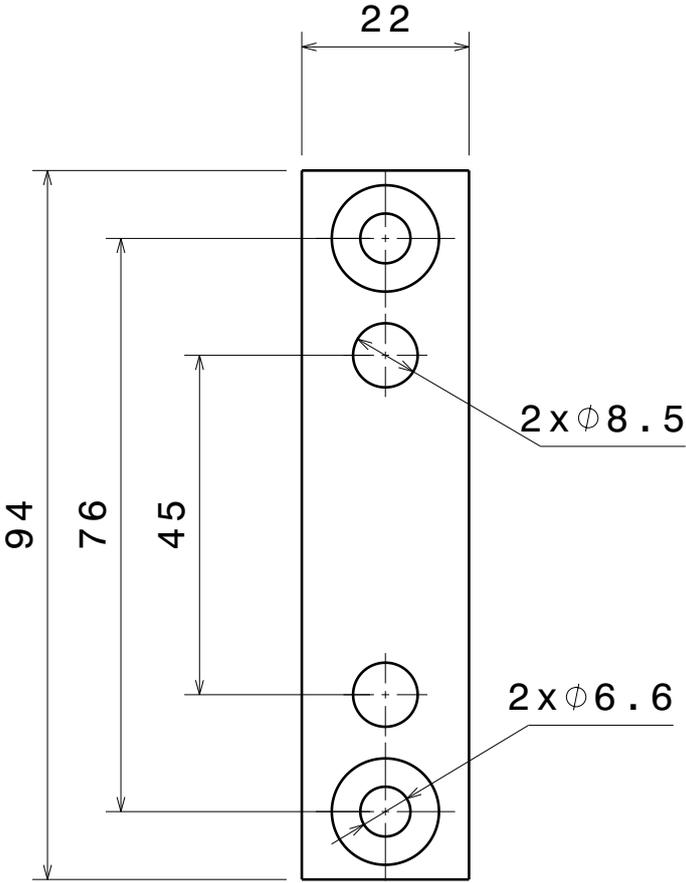
3

2

2

1

1



Escala: 1:1

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

**DASSAULT SYSTEMES**

DRAWING TITLE

**ZANCO**

DRAWN BY  
**Puertas, R.**

DATE  
28/05/2019

CHECKED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SIZE  
**A4**

DRAWING NUMBER

Ud.  
**4**

DESIGNED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SCALE

**1:1**

WEIGHT (kg)

**0,05**

SHEET

**3/5**

D

A

D

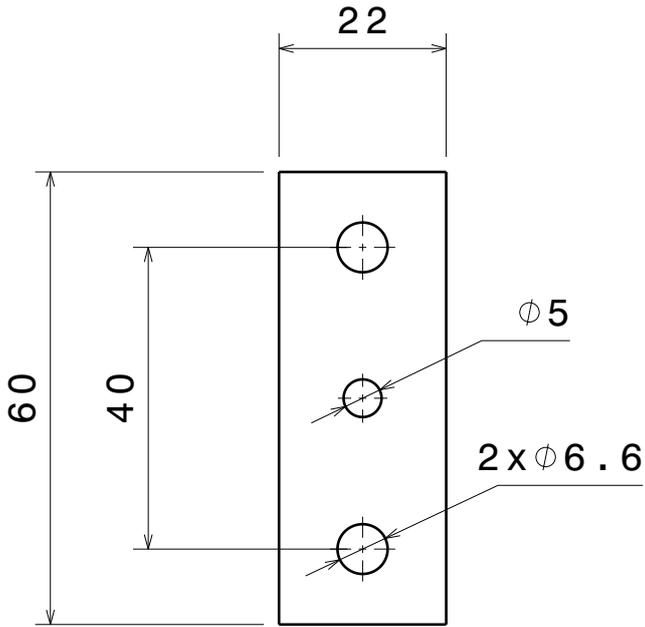
C

B

A

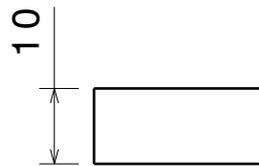
4

4



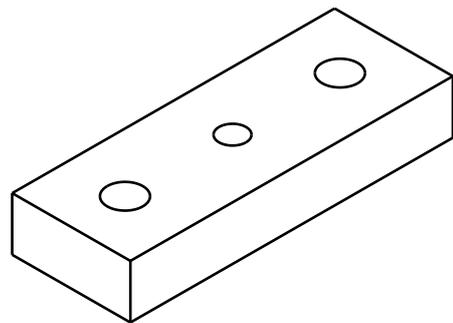
3

3



2

2



Escala: 1:1

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

**DASSAULT SYSTEMES**

DRAWING TITLE

**PLACA DE REFUERZO**

DRAWN BY  
**Puertas, R.**

DATE  
28/05/2019

CHECKED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SIZE  
**A4**

DRAWING NUMBER

Ud.  
**2**

DESIGNED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

0,03

SHEET

4/5

1

1

D

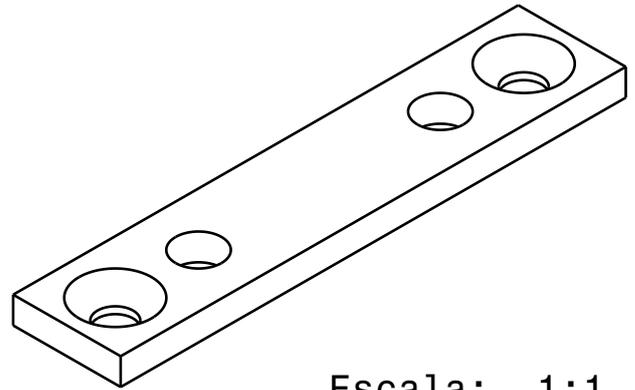
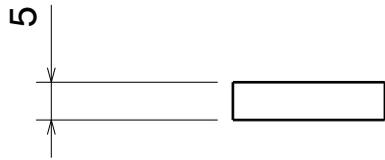
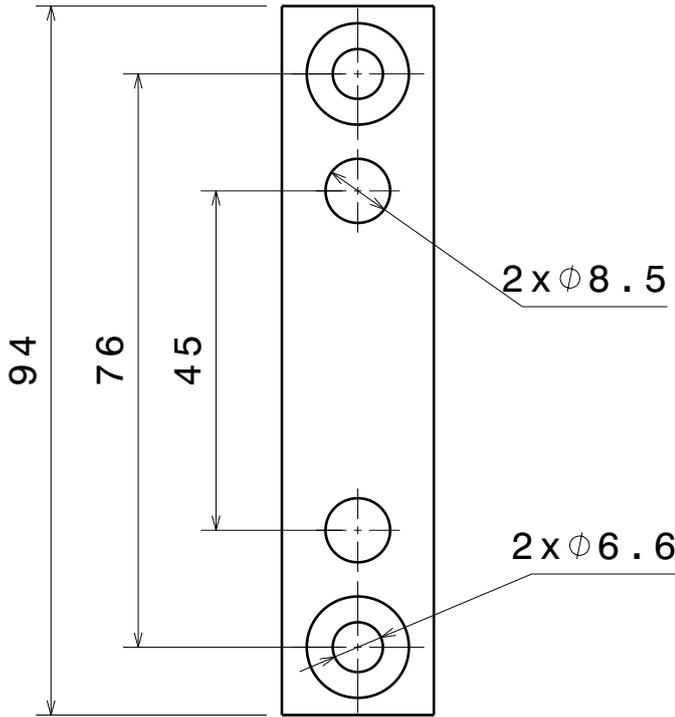
A

D

C

B

A



Escala: 1:1

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

**DASSAULT SYSTEMES**

DRAWING TITLE

**PLETINA**

DRAWN BY  
**Puertas, R.**

DATE  
28/05/2019

CHECKED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SIZE  
**A4**

DRAWING NUMBER

Ud.  
**12**

DESIGNED BY  
**XXX**

DATE  
XXX

SCALE

**1:1**

WEIGHT (kg)

**0,02**

SHEET

**5/5**

D

A

4

4

3

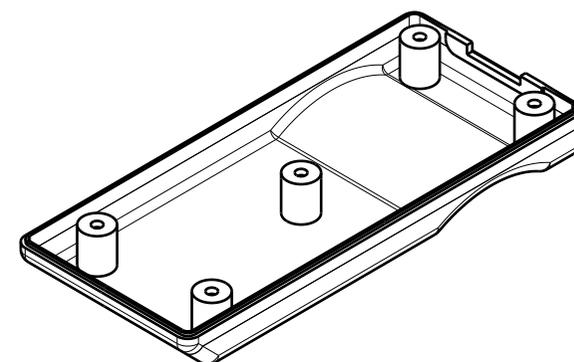
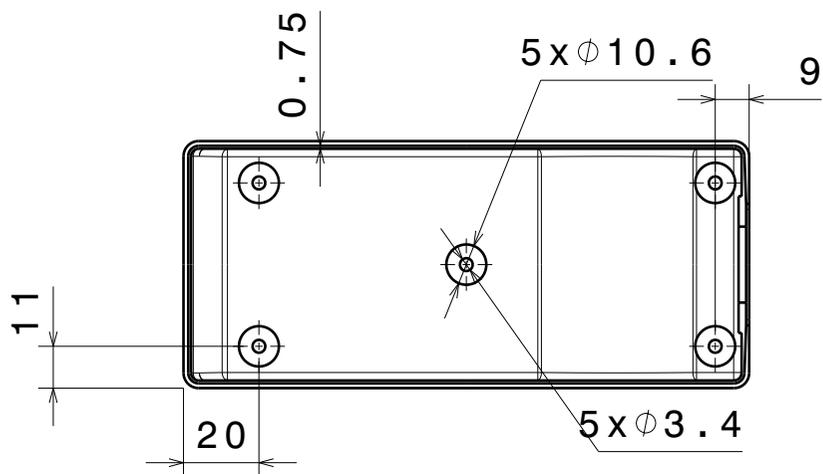
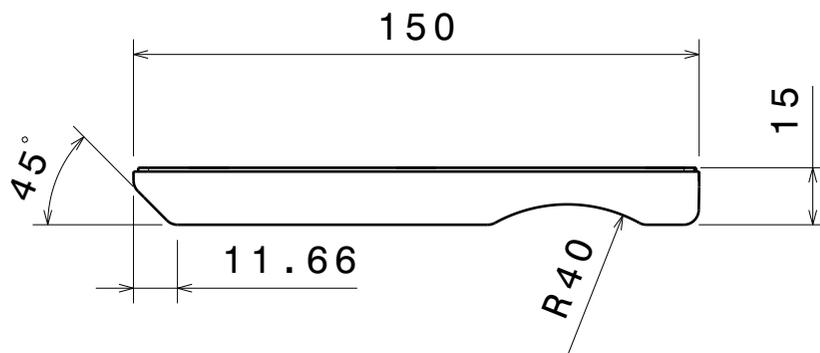
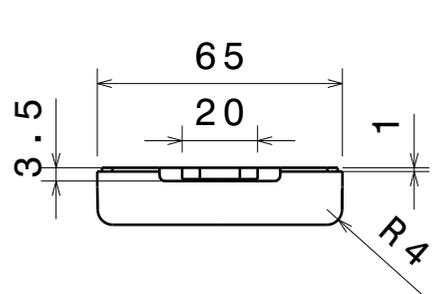
3

2

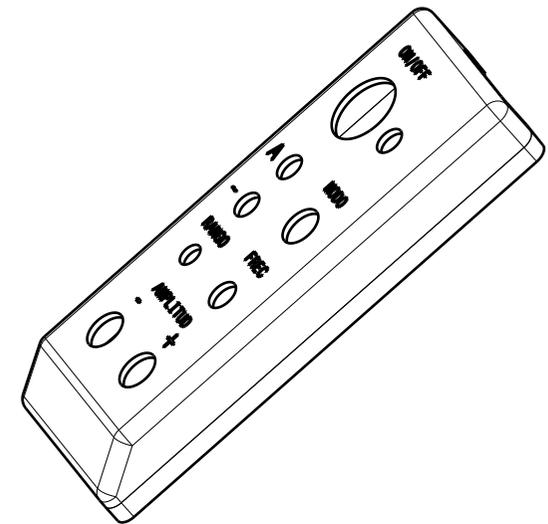
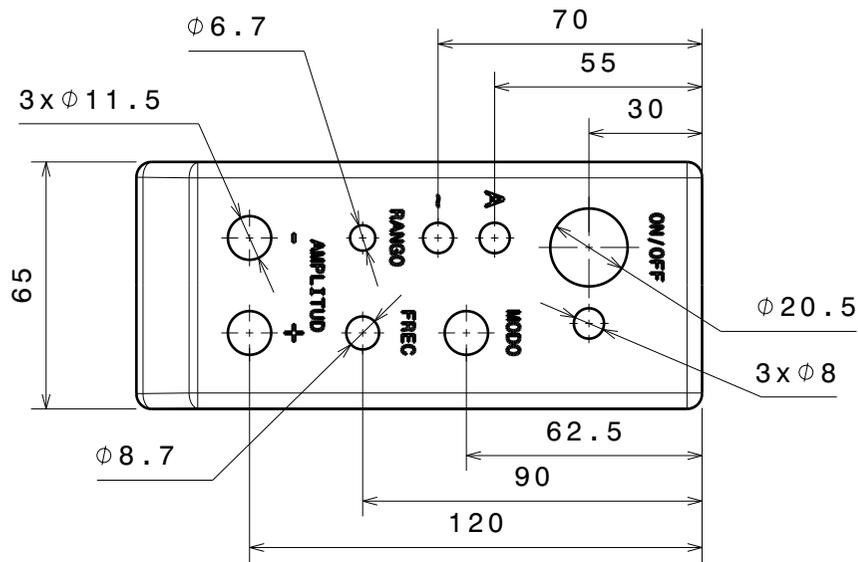
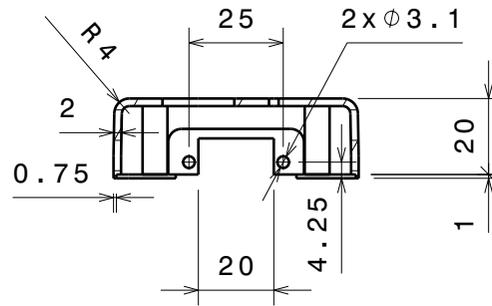
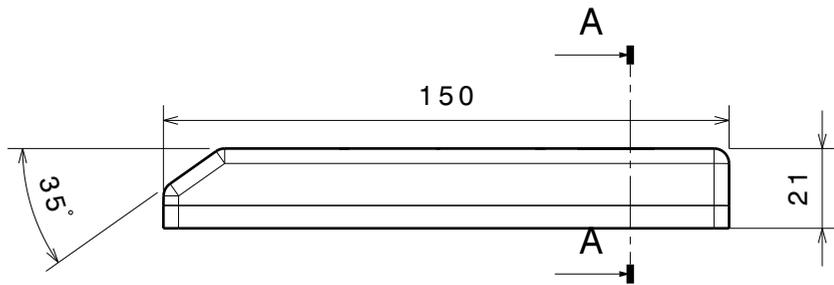
2

1

1



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 29/05/2019		<b>PARTE INFERIOR DEL MANDO</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE xxx		DRAWING NUMBER	
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE xxx		Ud. <b>2</b>	
		SCALE 1:2		WEIGHT(kg) 0,04	
				SHEET 1/2	



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 29/05/2019		<b>PARTE SUPERIOR DEL MANDO</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE XXX			
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SIZE <b>A4</b>	DRAWING NUMBER
		SCALE 1:2	WEIGHT(kg) 0,05	Ud. <b>2</b>	SHEET 2/2

D C B A

4

3

2

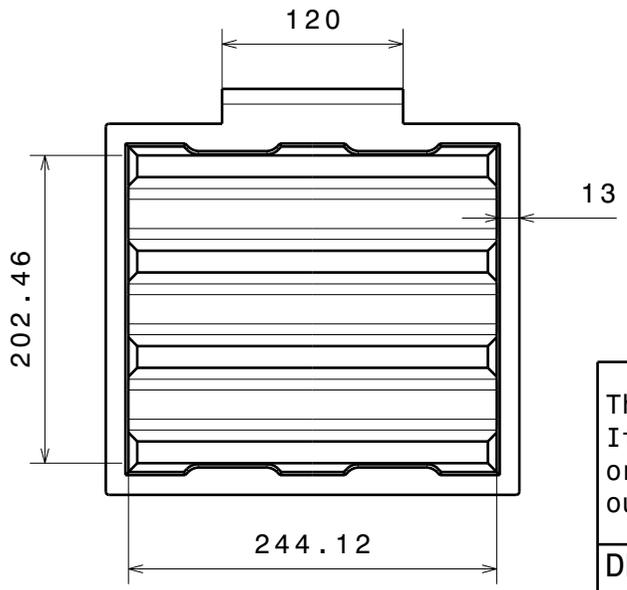
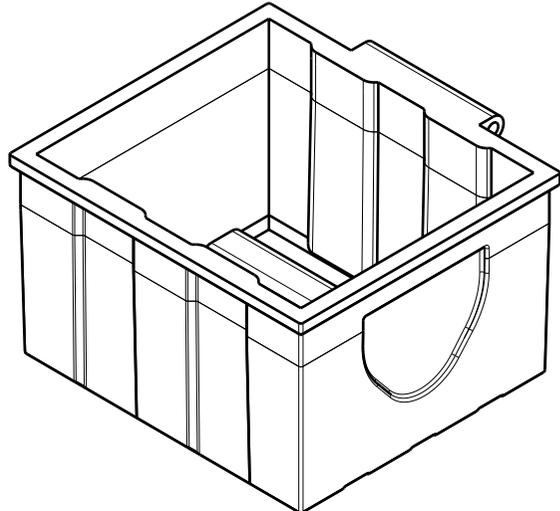
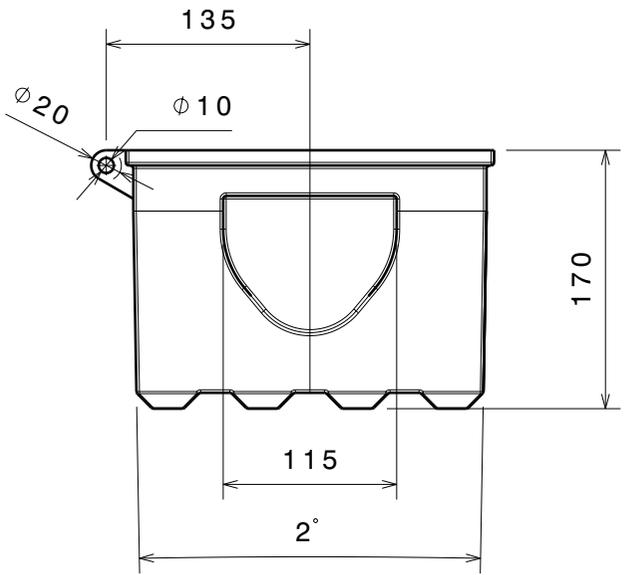
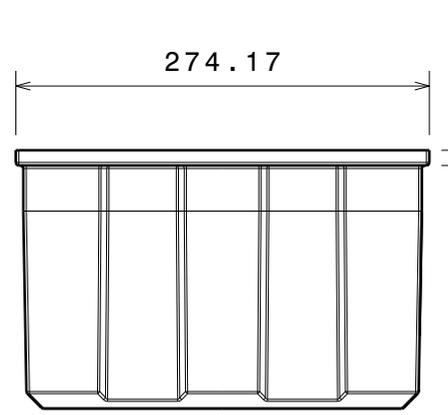
1

4

3

2

1



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 28/05/2019		DRAWING TITLE <b>CAJA PRINCIPAL</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SIZE <b>A4</b>	
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		DRAWING NUMBER Ud. <b>2</b>	
		SCALE <b>1:5</b>		WEIGHT(kg) <b>2,14</b>	
				SHEET <b>1/2</b>	

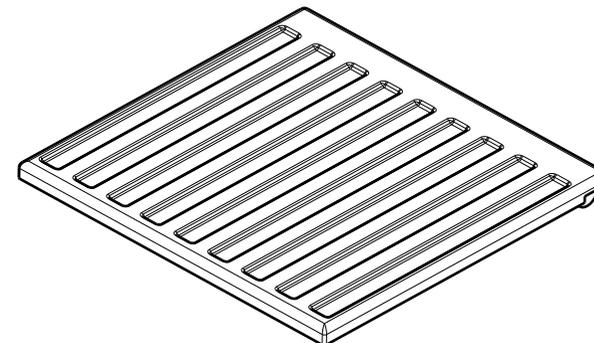
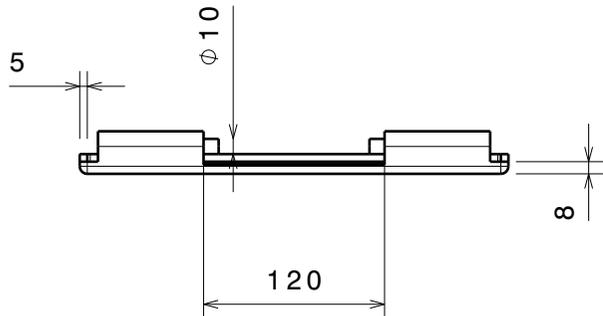
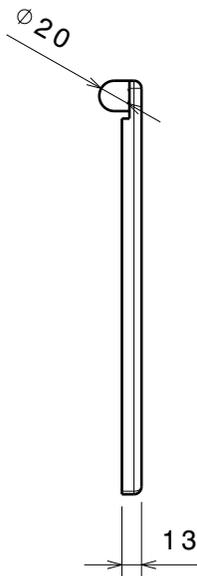
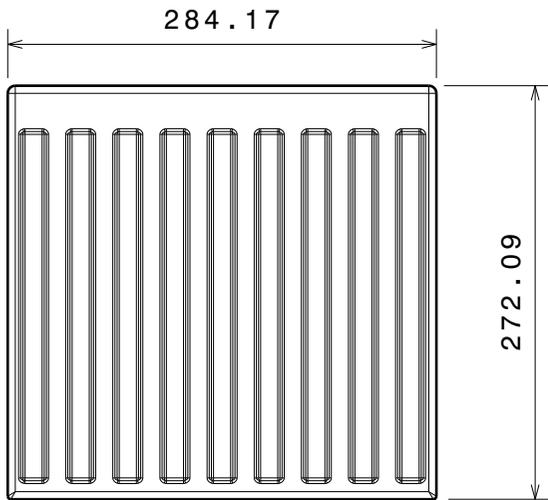
D C B A

D

C

B

A



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>			
DRAWN BY <b>Puertas, R.</b>		DATE 28/05/2019		DRAWING TITLE <b>TAPA</b>	
CHECKED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SIZE <b>A4</b>	DRAWING NUMBER <b>Ud. 2</b>
DESIGNED BY <b>XXX</b>		DATE XXX		SCALE <b>1:5</b>	WEIGHT(kg) <b>0,71</b>
				SHEET	<b>2/2</b>

D

A

4

3

2

1

### ANEXO III. CÁLCULO DE LA REDUCTORA DE VOLTAJE

En este anexo se va a detallar el cálculo para la reductora de voltaje que es necesaria en el potenciómetro instalado en el mando (Figura 66).

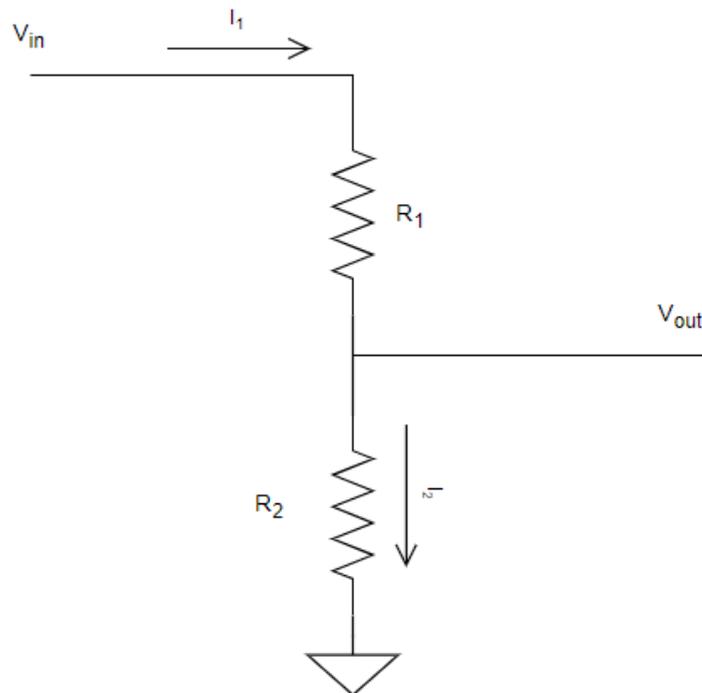


Figura 66. Esquema de la reductora de voltaje con las corrientes indicadas

Para el cálculo de la reductora de voltaje, se aplican tanto la Ley de corrientes de Kirchhoff como la Ley de Ohm.

Según la Ley de corrientes de Kirchhoff, o Primer Lema de Kirchhoff, en cualquier instante de tiempo, la suma algebraica de todas las corrientes que entran en un nudo es igual a cero [20]:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (2)$$

Por lo tanto, observando el esquema del circuito eléctrico se tiene que:

$$I_1 - I_2 = 0 \quad (3)$$

A partir de aquí, se descomponen las corrientes en función de la diferencia de potencial y de la resistencia, según la ley de Ohm, que dice que:

$$I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

Por lo tanto, la ecuación de las corrientes queda como:

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{R_1} - \frac{V_{out} - 0}{R_2} = 0 \quad (5)$$

Operando y simplificando, se llega a la ecuación definitiva:

$$R_2 \cdot (V_{in} - V_{out}) - R_1 \cdot V_{out} = 0 \quad (6)$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (7)$$

## ANEXO IV. CONFIGURACIÓN DE LOS DRIVERS

En este anexo se va a explicar cómo se configuran ambos drivers de los motores.

En primer lugar, el driver tiene que estar conectado a la corriente eléctrica. Por lo tanto, antes de comenzar con su configuración hay que realizar las conexiones de todos los cables tal y como se ha detallado a lo largo de este documento, así como conectar a la corriente todos los enchufes necesarios.

En segundo lugar, hay que conectar el controlador al ordenador. Esto se hará mediante un cable Ethernet. En el driver se conectará el cable Ethernet en su única entrada de este tipo, mientras que, en el otro extremo, al no tener el ordenador un conector Ethernet en la parte delantera, se conecta el cable a un adaptador que permite introducir este cable en una entrada USB (Figura 67).

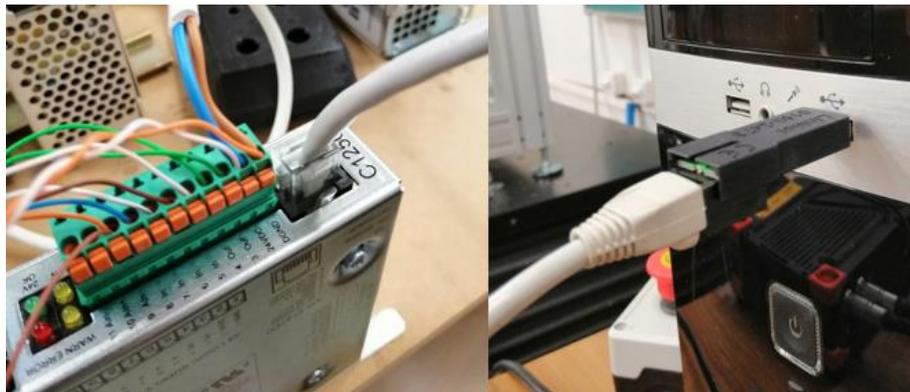


Figura 67. Detalle de las conexiones del cable Ethernet en ambos extremos

Una vez conectado todo el conjunto, se pasará a la configuración. Cabe decir que hay que repetir esta operación para ambos drivers, configurando todos los parámetros del driver de igual manera, pero cambiando las características que dependen del tipo de motor.

Lo primero de todo es ejecutar el software *LinMot-Talk* (propio de la marca de motores LinMot) y, para que el programa detecte el driver conectado se pulsa en la pestaña *File* y, después en *Login* (Ctrl+L).

Una vez pulsado *Login*, se abrirá una ventana de configuración (Figura 68). En *Configuration Interface* se deja la opción marcada RS232, mientras que en el puerto se selecciona la opción COM3 (para los ordenadores del laboratorio).



Figura 68. Asistente Login para detectar el driver

El siguiente paso es asignar un motor al driver que acaba de detectar el programa. Para ello, hay que iniciar el asistente *Motor Wizard*, pulsando el icono en la barra superior, o bien pulsando Ctrl+W. Este asistente se compone de nueve ventanas en las que se van a establecer las características del motor asociado al controlador.

- La primera ventana (Figura 69) es para seleccionar el modelo de estátor y el modelo de slider del motor, así como en qué dirección está montado el vástago.

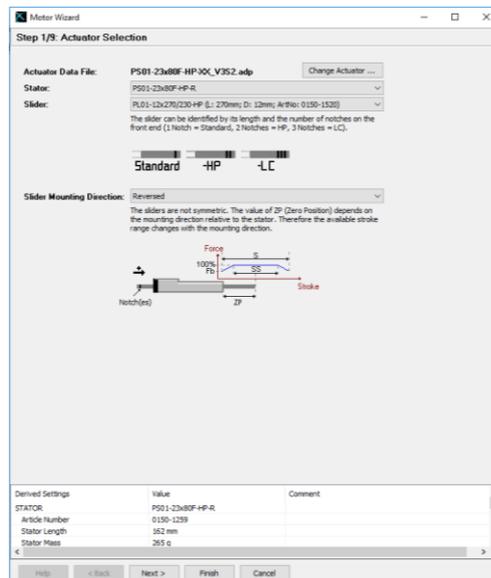


Figura 69. Motor Wizard 1/9

- La segunda ventana es únicamente para poner un nombre al driver.

- La tercera (Figura 70) para configurar el tipo de cable del motor y su longitud.

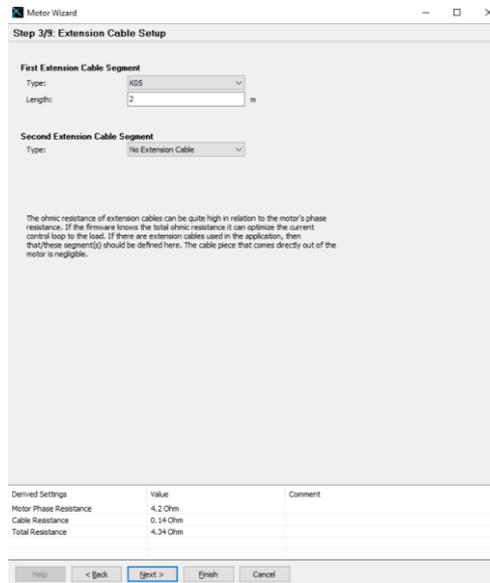


Figura 70. Motor Wizard 3/9

- El cuarto menú es para configurar, en el caso de que exista, un sensor de posición externo. De momento, se deja en *No Sensor*.
- La quinta ventana es importante (Figura 71). En ella hay que establecer cuál de las dos partes del motor es la que se mueve: estátor o vástago. También el ángulo de posición de trabajo ( $-90^\circ - 90^\circ$ ), la masa adicional que tiene que soportar el motor y los valores de fuerzas de fricción conocidas (que se dejan a cero).

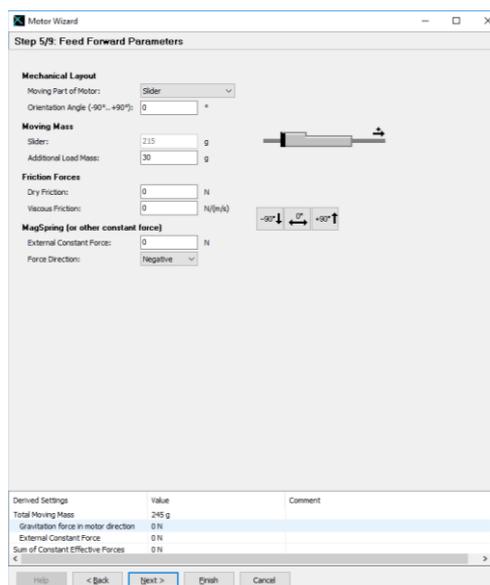


Figura 71. Motor Wizard 5/9

## DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

- La sexta ventana permite cambiar los ajustes del PID interno, que se dejan los valores que vienen por defecto.
- Por último, las ventanas siete, ocho y nueve sirven para configurar el *Homing*, la inicialización del motor. El *Homing* del motor consiste en hacer un barrido de toda la longitud del vástago hasta que se encuentre con un tope para reconocer la longitud de la carrera. En ese momento, el motor va a la posición inicial, que por defecto viene configurada como el punto medio. Se dejan los valores de todas las pestañas por defecto, ya que, si se quieren modificar estos valores, se puede hacer más tarde.

Una vez completadas estas pestañas, aparecerá en pantalla la ventana principal del panel de control, que se puede ver en la Figura 72. En esta ventana, se seleccionan las dos casillas del apartado *0. Switch On* para que el motor comience a recibir alimentación; y se seleccionan las dos casillas del apartado *11. Home* y el motor realiza el *Homing* descrito anteriormente y se desplaza hasta la posición inicial. El motor ya está listo para comenzar a funcionar.

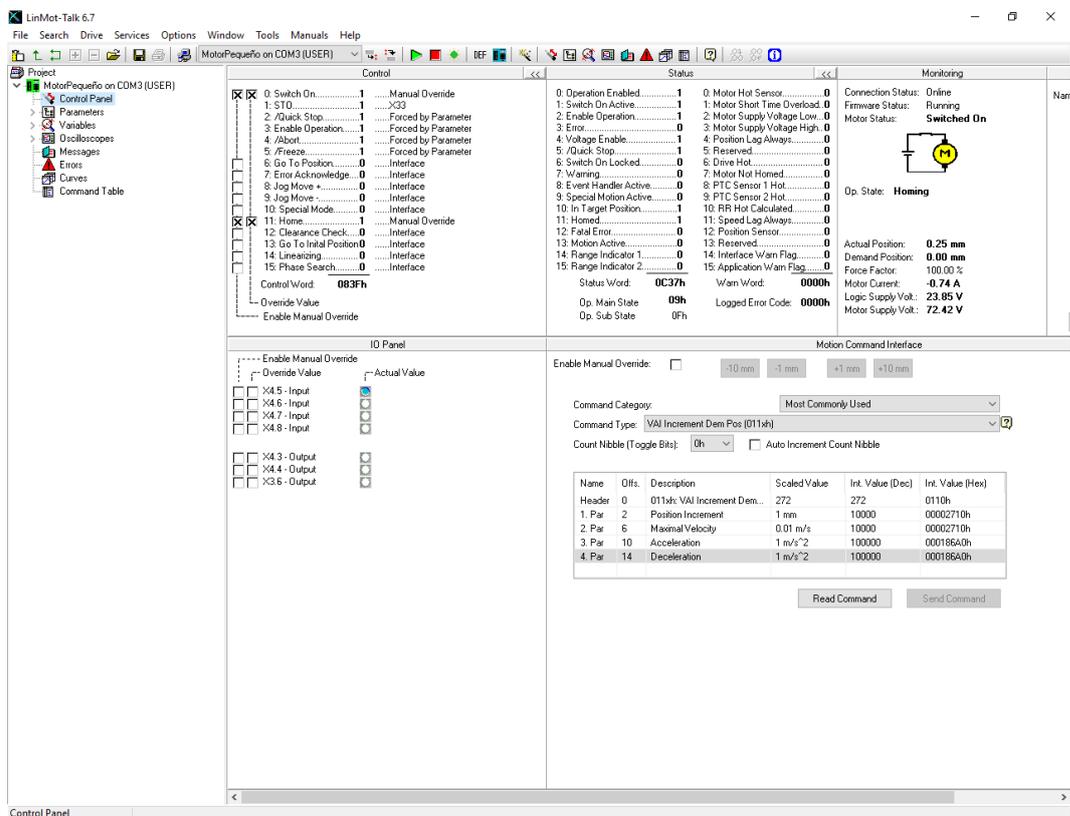


Figura 72. Panel de control de LinMot-Talk

Una vez inicializado el motor, se puede observar el proceso de Homing. Tanto la posición inicial (por si el motor no está bien centrado en la posición 0 mm establecida por defecto) como la velocidad o brusquedad con que el motor realiza ese proceso de Homing pueden ser modificadas.

Estas configuraciones se encuentran, dentro del árbol de configuración de parámetros, en el apartado *Parameters/Motion Control SW/State Machine Setup/Homing/Homing Position Config* (Figura 73). La posición inicial se modifica variando el valor de *Home position*, mientras que la brusquedad del proceso se cambia reduciendo el porcentaje del parámetro *Current Limit* (del 100% que viene por defecto, a un 20%, por ejemplo).

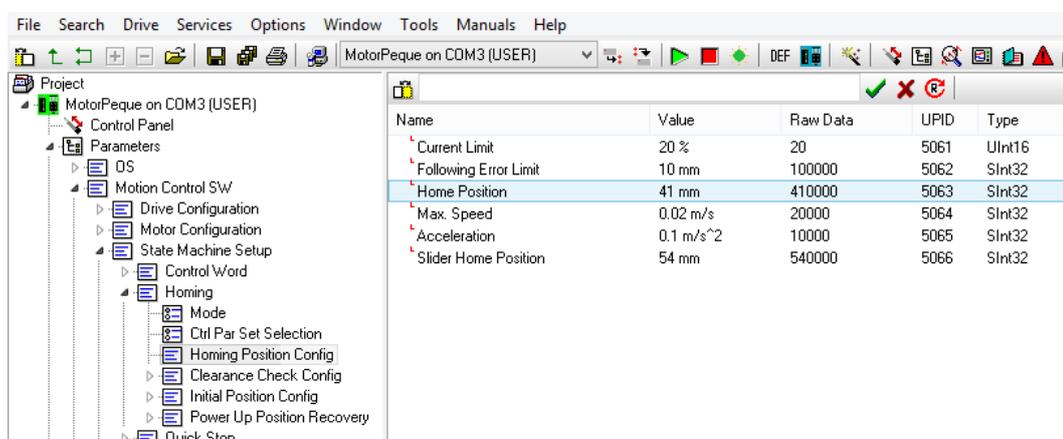


Figura 73. Configuración del Homing

Dentro de este árbol de configuración de parámetros es importante también configurar los terminales de la zona X4: LOGIC SUPPLY / CONTROL. Estas configuraciones están en el apartado: *Motion Control SW / Drive Configuration / I/O Definitions* (Figura 74).

Dentro de este apartado, se configura de la siguiente manera:

- *Dig Out X4.3 Function: Range Indicator 1.* Se activa esta salida (LED del mando externo) cuando se cumple la *Range Indicator 1*.
- *Dig Out X4.4 Function: Range Indicator 2.* Se activa esta salida (LED del mando externo) cuando se cumple la *Range Indicator 2*.
- *Dig In X4.5 Function: Ctrl Word Switch On.* Se activa el *Switch On* cuando recibe señal por esta entrada (a través del mando externo).
- *Analogic In 0..10V:* se selecciona el offset de la señal introducida por el terminal 9. *AnIn* del driver (entrada analógica). Admite valores entre 0 y 10 V respecto al común (1. DGND)

- *Diff Analog In -10V...10V*: lo mismo que lo anterior pero referido a la entrada analógica diferencial 10. *AnIn+* y 11. *AnIn-*. Admite valores de tensión diferencial entre -10V y 10 V entre ambas entradas.

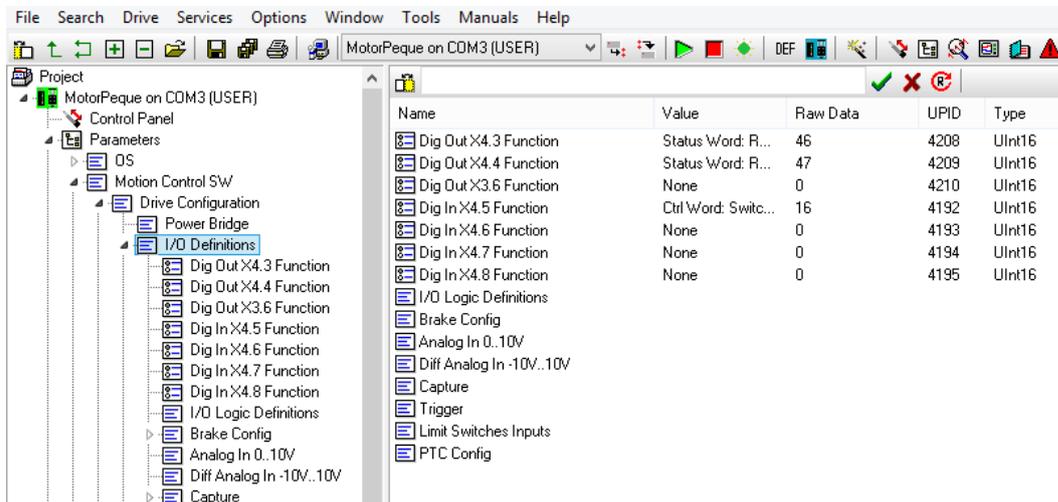


Figura 74. Configuración de los terminales de la zona X4 del driver

Los *Range Indicators* son condiciones que se tienen que cumplir para activar las salidas. Estos se van a definir en *State Machine Setup*.

Otra carpeta de configuraciones que hay que modificar se encuentra en: *Motion Control SW/Motor Config./Monitoring/Position Monitoring/Position Lag Always*. En este apartado se configuran las desviaciones máximas permitidas entre la posición real y la requerida. Hay dos valores a configurar: el *Warn Limit* y el *Error Limit*.

- *Warn Limit*: cuando se supera este valor de desviación, el sistema envía un mensaje de aviso. Se deja este valor en 10 mm.
- *Error Limit*: cuando se supera este valor de desviación, el sistema envía un mensaje de error ("*Error: Position Lag Always Too Big*") y corta la alimentación del motor. Se establece este valor en 20 mm.

La siguiente carpeta a configurar es: *Motion Control SW/State Machine Setup / StatusWord* (Figura 75). Aquí es donde se definen los *Range Indicator 1* y 2 mencionados anteriormente para las salidas X4.3 y X4.4. Un *Range Indicator* es una condición que indica si un valor (definido como la diferencia entre dos

parámetros *Minuend UPID-Subtrahend UPID*) está comprendido entre dos límites (*Low Limit* y *High Limit*). Tal y como está siendo configurado, si se cumple el *Range Indicator 1* o *2*, se activan cada una de las salidas digitales X4.3 y X4.4.

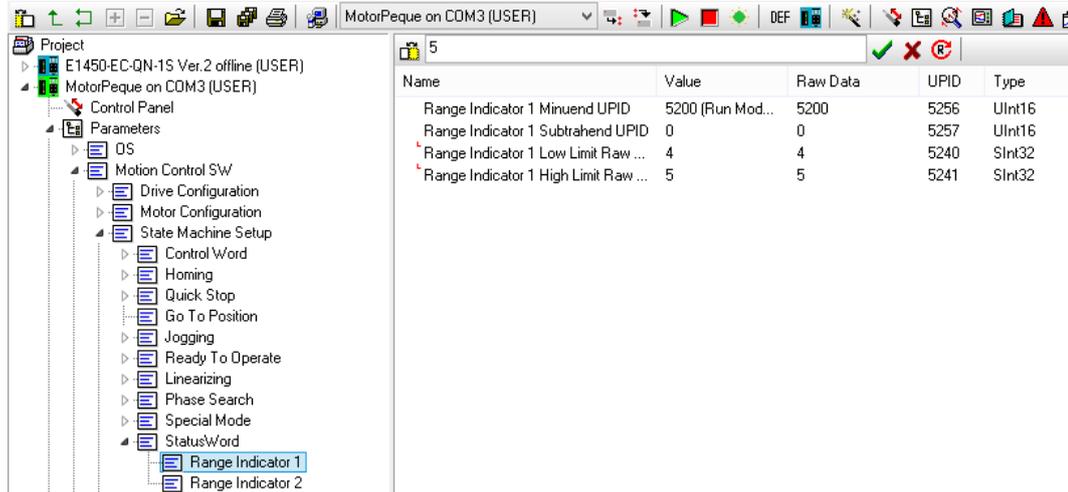


Figura 75. Configuración de los Range Indicator

En este caso, el *Range Indicator 1* se configurará como:

- *Minuend UPID*: 5200 (Run Mode)
- *Subtrahend UPID*: 0
- *Low Limit*: 4
- *High Limit*: 5

A continuación, se configurará la carpeta *Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings*. Esta carpeta contiene parámetros importantes para el funcionamiento del controlador.

- *Run Mode Selection*: Permite elegir entre distintas formas de comando en posición. Sólo se han empleado las siguientes:
  - *Motion Command Interface*: el comando de posición se realiza desde una interfaz genérica. Se utiliza como posición de reposo del actuador cuando se emplea el mando externo.
  - *Analog*: la posición se comanda mediante la señal de consigna analógica (0-10V o -10V-10V).
  - *Continuous curve*: el comando en posición es definido mediante una curva, la cual se ejecuta continuamente. En la carpeta

Curves se pueden crear diferentes curvas, y la escogida se selecciona en *Motion Control SW/Motion Interface/Time Curve Settings*.

- *Analog Mode Settings*. En este apartado hay que configurar la entrada de señal analógica que se quiere utilizar:
  - X4.9 con respecto a *DGND* (X4.1) para 0-10V
  - X4.10 y X4.11 para -10V-10V.

En la carpeta *Motion Control SW/Motion Interface/Predef VA/VAJ Interpolator* (Figura 76) se configuran los valores de velocidad, aceleración y deceleración máximas de cada motor. Para el motor grande se van a establecer unos valores menores que para el motor pequeño debido a que en las especificaciones técnicas del motor se puede observar que permite unas velocidades máximas menores. En consecuencia, se establecen los siguientes valores:

- Motor pequeño: velocidad máxima de 10 m/s y aceleración y deceleración máximas de 50 m/s<sup>2</sup>.
- Motor grande: velocidad máxima de 2 m/s y aceleración y deceleración máximas de 15 m/s<sup>2</sup>

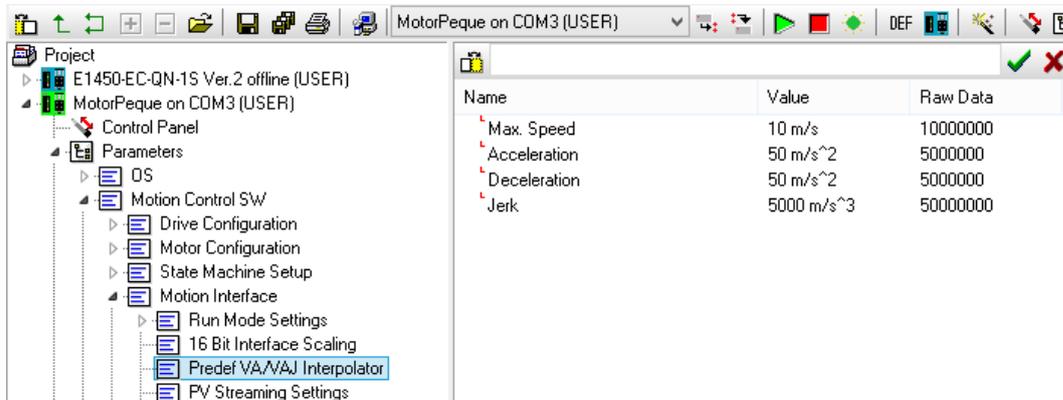


Figura 76. Configuración de las velocidades y aceleraciones máximas de los motores

En la carpeta *Motion Control SW/Motion Interface/Time Curve Settings* se selecciona una de las curvas creadas para que sea ejecutada cuando se seleccione el *Run Mode: Continuous Curve*. Además, se puede establecer un *offset*, se puede hacer un ajuste de su amplitud (como máximo un 2000%) y se puede hacer un ajuste de la frecuencia de la curva (como máximo un 200%, el doble de frecuencia que la original).

Posteriormente, en la carpeta *Motion Control SW/Position Controller* se establece la configuración al PID interno.

- *Ctrl Par Set Selection*: se selecciona el *Set B*, ya que el *Set A* se ha demostrado en ocasiones anteriores que ofrece una respuesta más rápida, pero genera demasiado ruido.
- *Control Parameter Set* (tanto *Set A* como *Set B*): se configuran diferentes parámetros del lazo de control interno del PID. Los valores de los parámetros *P Gain*, *D Gain* y *I Gain* (ganancias del controlador proporcional, derivativo e integral, respectivamente) se pueden modificar hasta encontrar una mejor respuesta del actuador. Se aconseja, por usos anteriores, configurar los valores del *Set B* como intermedios entre los que vienen por defecto en las configuraciones *Set A* y *Set B*.

Por último, hay que realizar algunas configuraciones en la carpeta *Easy Steps* (Figura 77):

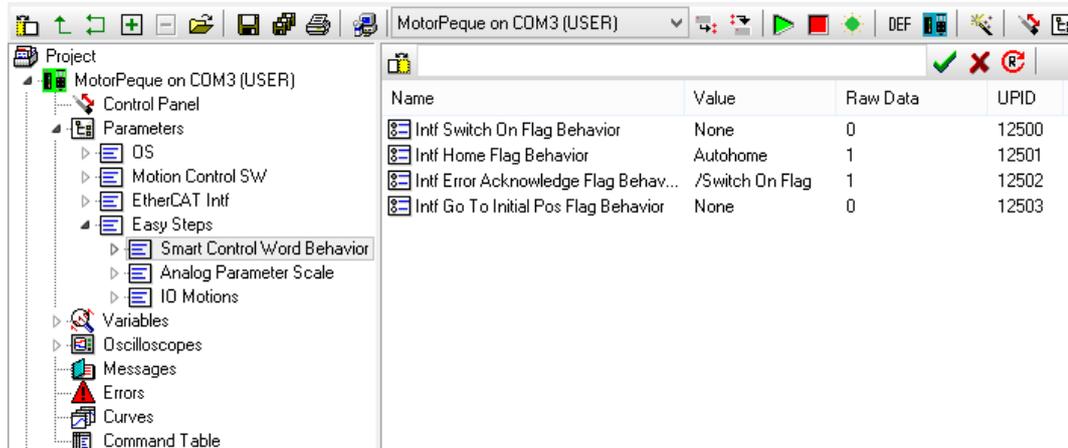


Figura 77. Configuración de Easy Steps

- *Smart Control Word Behaviour*: permite automatizar algunas funciones básicas. Dentro de esta:
  - *Intf Home Flag Behaviour*: con esta opción habilitada, al activar el *Switch On*, se realiza el proceso de *Homing* automáticamente y el motor queda operativo con el modo que estuviera seleccionado.

- *Intf Error Acknowledge Flag Behaviour*: al activar el *Switch On* se reconocen, de manera automática, los errores que puedan existir.
- *Analog Parameter Scale*: permite ajustar parámetros de configuración mediante las entradas analógicas. En el apartado *Analog Input On X4.9*, que es la entrada analógica para ambos motores, se establece el apartado *OV Scale* en 0% y la opción *10V Scale* en 200%. De esta manera, cuando por la entrada analógica entren 0v se traducirá en 0V y cuando entren 10V, se traducirá en un 200%.
- *IO Motions*: sirve para asignar ciertas funciones a las entradas digitales. Esta función se utiliza para poder ejecutar la tabla de comandos (*Command Table*), que se explicará más adelante) Así, se establece, en la entrada X4.5:
  - En *X4.5 Rising Edge Function*, se activa *Eval Command Table Command*.
  - En *X4.5 IO Motion Config*, se define la línea de la tabla de comandos a ejecutar en el parámetro *Curve/Cmd ID*.

La tabla de comandos (*Command Table*) está compuesta por una serie de líneas de órdenes que permiten programar movimientos secuenciales. En cada línea de esta tabla de comandos se define una acción a realizar por el actuador, como pueden ser comandos de movimiento (*Go to Pos.*, *Go to Analog Pos.*, etc.), comandos de asignación de parámetros o variables temporales (*Write Live Parameter*, *Write UPID RAM value to CMD Table Var1*, etc.), o comandos de condiciones (*If...*, *Less Than...*, *Wait Time*, etc.).

Esta tabla de comandos se ha utilizado para programar secuencias de acciones cuando se manejan los motores a través del mando externo. Así, desde el mando, cuando se activa, se produce el *Switch On* y el *Homing* a continuación, automáticamente. Después, por cada vez que se pulse el botón de cambio de modo, se va a pasar por los siguientes:

- Modo analógico dirigido por la señal de consigna a través de la entrada X4.9 (0-10V).
- Modo analógico con señal de consigna a través de las entradas X4.10 y X4.11 (-10V-10V).
- Modo senoidal.
- Vuelta al primer modo.

En el modo senoidal de curva continua, cada pulsación de los botones para modificar la amplitud de la curva, incrementará o disminuirá en un 10% la amplitud de dicha curva. Estos valores se modificarán hasta llegar a un mínimo del 10% y un máximo del 2000% de la curva original.

# DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

A continuación, se adjunta la tabla de comandos para el uso de los motores de manera externa mediante un mando, completa (Figura 78):

ID	Name	Type	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8	Sequenced Entry
1	Espera	Wait Time (210sh)	Time: 400 ms								2 (Leo Run Mo
2	Leo Run Mode	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 1450h (R...								3 (Leo 5333)
3	Leo 5333	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 14D5h (S...								4 (Condicion
4	Condition	IF Cmd Table Var 1 Less Than (250sh)	Val: 2		True Cmd ID: 5...	False Cmd ID: 7...					None
5	Modo Analógico	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 1450h (R...		Value: 000000...						6 (0.10V)
6	0.10V	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 14D5h (S...		Value: 000000...						None
7	Condition	IF Cmd Table Var 1 Less Than (250sh)	Val: 5		True Cmd ID: 3...	False Cmd ID: 8...					None
8	Modo Reposo	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 1450h (R...		Value: 000000...						None
9											
10	Leo Run Mode	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 1450h (R...								11 (Condicion h
11	Condition Man...	IF Cmd Table Var 1 Less Than (250sh)	Val: 2		True Cmd ID: 2...	False Cmd ID: 1...					None
12	Condition Curva	IF Cmd Table Var 1 Greater Than (25...	Val: 4		True Cmd ID: 1...	False Cmd ID: 2...					None
13	Leo Amplitud	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 14CAh (C...								14 (Amplitud +1
14	Amplitud +10%	Add To Cmd Table Var 2 (243sh)	Add Val: 1000								15 (Condicion >
15	Condition > 20...	IF Cmd Table Var 2 Greater Than (25...	Val: 20000		True Cmd ID: 2...	False Cmd ID: 1...					None
16	Paso por cero	Wait until Actual Position Less Than (...	Pos: 0.1 mm								17 (Paso por cr
17	Paso por cero	Wait until Actual Position Greater Tha...	Pos: 0.1 mm								18 (Escribo Am
18	Escribo Ampl	Write Cmd Table Var 2 To UPID RAM...	UPID: 14CAh (C...								None
19											
20	Leo Run Mode	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 1450h (R...								21 (Condicion h
21	Condition Man...	IF Cmd Table Var 1 Less Than (250sh)	Val: 2		True Cmd ID: 2...	False Cmd ID: 2...					None
22	Condition Curva	IF Cmd Table Var 1 Greater Than (25...	Val: 4		True Cmd ID: 2...	False Cmd ID: 2...					None
23	Leo Amplitud	Write UPID RAM value To Cmd T abl...	UPID: 14CAh (C...								24 (Amplitud -1
24	Amplitud -10%	Add To Cmd Table Var 2 (243sh)	Add Val: -1000								25 (Condicion <
25	Condition < 0%	IF Cmd Table Var 2 Less Than (252sh)	Val: 500		True Cmd ID: 2...	False Cmd ID: 2...					None
26	Paso por cero	Wait until Actual Position Less Than (...	Pos: 0.1 mm								27 (Paso por cr
27	Paso por cero	Wait until Actual Position Greater Tha...	Pos: 0.1 mm								28 (Escribo Am
28	Escribo Ampl	Write Cmd Table Var 2 To UPID RAM...	UPID: 14CAh (C...								None
29	Fin	No Operation (000sh)									None
30											
31	Continuac Line...	IF Cmd Table Var 2 Less Than (252sh)	Val: 2		True Cmd ID: 3...	False Cmd ID: 3...					None
32	Modo Curva	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 1450h (R...		Value: 000000...						None
33	-10V +10V	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 14D5h (S...		Value: 000000...						34 (Modo Repr
34	Modo Reposo	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 1450h (R...		Value: 000000...						35 (Modo Anal
35	Modo Analógico	Write Live Parameter (002sh)	UPID: 1450h (R...		Value: 000000...						None
36											

Figura 78. Tabla de comandos completa