



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño y prototipado de excitador inercial
para caracterizar estructuras esbeltas
basado en un motor lineal**

Autor:

Carmona Martín, Víctor

Tutor:

**Lorenzana Iban, Antolín
Magdaleno González, Álvaro
C. A., I. T., M.M.C y Teoría de
Estructuras**

Valladolid, Octubre 2018.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Agradecimientos

Dar las gracias en primer lugar, a mis padres, mi hermano y mi hermana por todo el apoyo y serenidad que he recibido siempre de ellos.

La mayor gratitud se la debo a mi pareja, Ana, recordándome día a día a no rendirme frente a las adversidades, siendo la responsable de hacerme mejor persona a cada momento que paso junto a ella. Gracias por tu apoyo incondicional levantándome en las situaciones difíciles y por creer en mí.

También agradecer a mi amigo de la infancia y mejor amigo Miguel Ángel que siempre ha tenido la paciencia de saber aconsejarme en las diferentes situaciones que hemos vivido a lo largo de nuestra amistad.

Al departamento de estructuras por la oportunidad que me han dado y por todo lo que me habéis enseñado. En especial a Antolín y a Álvaro por su dedicación y asesoramiento.

Por último, no olvido a mis compañeros y compañeras de carrera, con los cuál he vivido momentos que nunca se borrarán de mi memoria.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Resumen

El Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Mecánica tiene como objetivo el diseño, fabricación y montaje de los distintos elementos que conforman el prototipo de excitador inercial para la realización de ensayos dinámicos en estructuras. También se incluye en el anexo el montaje eléctrico de una botonera para el manejo y el control. Las consignas que se mandan al excitador inercial se generan bien de forma predefinida en la propia botonera o bien mediante el software DEWESoftX3. Posteriormente se verifican los modos de funcionamiento dependiendo de los diversos ensayos que vayan a realizarse. El propósito final es obtener un conjunto formado por un excitador inercial práctico y un maletín de control que desempeñen su funcionalidad en el estudio de las acciones dinámicas.

Palabras claves

Excitador inercial
Motor lineal
Conjunto estructural
Ensayos dinámicos
Control

Abstract

The Mechanical Engineering end-of-degree project consists of the design, manufacture and assembly of the different elements that make up the prototype of inertial exciter for structural Dynamic testing. It also proceeds to the execution of the controller for the handling and control of the linear motor. The control commands are defined before hand in the controller or generated by function generator included in the DEWESoftX3 software. Subsequently, the different modes of operation are verified depending on the various tests to carried out. The final purpose is to obtain a set consisting on a practical inertial exciter and a control case to perform standard dynamics tests applied to lightweight structures.

Keywords

Inertial exciter
Linear motor
Structural set
Dynamic tests
Control



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice

1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivo.....	2
2. Alternativas de diseño	3
2.1. Motor Lineal	3
2.2. Diseño conceptual	4
2.3. Diseño de prototipos	6
2.3.1. Prototipo nº1:	6
2.3.2. Prototipo nº2:	10
2.3.3. Prototipo nº3:	15
2.4. Prototipo Final.....	22
3. Fabricación y montaje de componentes del excitador inercial	43
3.1. Fabricación de componentes del excitador inercial.....	43
3.1.1. Bases exteriores e interiores	43
3.1.2. Base intermedia o culata	46
3.1.3. Soporte intermedio de los rodamientos lineales de bolas	56
3.2. Montaje del excitador inercial.....	67
4. Fundamento conceptual	85
4.1. Posición vertical	85
4.2. Posición horizontal.....	90
5. Conclusiones y líneas futuras	95
5.1. Conclusiones	95
5.2. Líneas futuras	96
Bibliografía.....	97
Anexos.....	99
Anexo 1: Excitador inercial APS 400	99
Anexo 2: Guía de uso de Actuadores Linmot.....	105
Anexo 2.1: Modos de funcionamiento de la controladora - Drive	106
Anexo 2.2: Diagrama de bloques simplificado de los modos de funcionamiento del motor lineal.....	106
Anexo 2.3: Configuración básica de parámetros en Linmot-Talk.....	108
Anexo 2.4: Parámetros básicos	113



Anexo 2.5: Tabla de comandos (command table)	127
Anexo 2.6: Manejo del estator con Linmot-Talk.....	129
Anexo 2.7: Configuración por defecto para uso normal del actuador....	130
Anexo 3: Cambios de configuración del actuador	131
Anexo 4: Manejo del estator con botonera externa	133
Anexo 4.1: Botonera del motor lineal Linmot.....	133
Anexo 4.2: Precauciones de uso	136
Anexo 4.3: Mejoras futuras de diseño.....	137
Anexo 5: Guía de usuario del programa DEWESoftX3	139
Anexo 6: Conexión del excitador inercial al maletín de control	149
Anexo 6.1: Conexión del maletín de control y el excitador inercial a corta distancia.....	154
Anexo 6.2: Conexión del maletín de control y el excitador inercial a larga distancia.....	158
Anexo 7: Planos de fabricación.....	165

1. Introducción

1.1. Justificación

Desde los comienzos de las construcciones de ingeniería civil siempre ha preocupado su preservación a lo largo de los años. La gran mayoría de dichas construcciones son de gran tamaño y esbeltas, que se ven afectadas tanto por las acciones dinámicas del terreno y climatológicas de una zona en concreto, como por las cargas estáticas o dinámicas que afectan directamente a la sollicitación estructural.

En nuestro caso, se hace más referencia a las acciones dinámicas que se producen en las estructuras. En situaciones reales, las vibraciones que se manifiestan en la estructura son impredecibles sin tener conocimiento certero de las acciones actuantes que, en muchos casos, como viento o tráfico, son difíciles de modelar y cuantificar. Dichas vibraciones mecánicas dependen de la rigidez del amortiguamiento y de la masa de las estructuras. La masa de las estructuras es difícil de estimar, pero aún más difícil lo es el amortiguamiento. Por lo tanto, hay que tener un modelo que represente adecuadamente la dinámica de las estructuras y para ello se realizan ensayos de caracterización mediante shakers inerciales. La realización de un modelo concreto de estos dispositivos, basado en un motor lineal, es el objeto de este trabajo.

Para poder verificar la resistencia estructural de las construcciones frente a las vibraciones mecánicas se realizan ensayos con instrumentos de excitación e instrumentos de monitorización. Dichos instrumentos permiten realizar mediciones durante su experimentación en los diferentes ensayos de la actividad dinámica, en los diferentes puntos de la estructura de los diversos elementos constructivos [Ref. Web 2]. En dicha experimentación, es importante disponer de instrumentos de excitación a escala real capaces de inducir vibraciones a la estructura. Estos mecanismos reciben el nombre de excitadores inerciales o shakers, los cuales funcionan de manera electromagnética produciendo el movimiento de traslación del conjunto móvil en un grado de libertad. Dicho movimiento de traslación es el responsable de inducir las fuerzas inerciales con una carrera a una frecuencia determinada.

Como referencia comercial conviene tener en cuenta las dimensiones, pesos y características del excitador inercial APS 400 [Ref. Web 1] sintetizadas en el Anexo 1.

El conjunto móvil que compone el excitador inercial está asistido por gomas o resortes a lo largo de su movimiento de traslación, siendo su cometido el de impedir la caída repentina del conjunto móvil instalando el excitador en sentido vertical.



El diseño de nuestro excitador inercial permite al mecanismo situarse en posición vertical y horizontal, siendo una gran ventaja a la hora de realizar los ensayos dinámicos. En ambas posiciones, el excitador inercial tiene que encontrarse solidario a la estructura, siendo necesario el uso de masas adicionales fijadas al mecanismo, funcionando a modo de lastre.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es la fabricación de un prototipo de excitador inercial con un grado de libertad a escala real a partir de un motor lineal Linmot, semejante en cuanto a funcionamiento a un skaker APS 400, siendo la construcción de nuestro prototipo más económico y con mejores prestaciones.

En cuanto a funcionamiento, el movimiento de traslación lo ejecuta un motor lineal Linmot en el interior del mecanismo. Dicho movimiento es el responsable de generar las vibraciones para los correspondientes ensayos en las estructuras o en los elementos constructivos que las componen [Ref. Web 2].

El excitador inercial debe ser compacto y de fácil construcción junto con un transporte confortable para los usuarios. El excitador inercial debe disponerse tanto en posición vertical como en horizontal, con una adecuada fijación a la estructura para los distintos ensayos. Además, el funcionamiento del excitador inercial deberá ser en un régimen de frecuencias reducido (inferior a los 10 Hz aproximadamente) para producir elevadas fuerzas dinámicas y poder realizar la comprobación de las propiedades dinámicas de las construcciones de ingeniería civil [Ref. Web 4].

En el desarrollo del objetivo principal del proyecto, se aplicarán las distintas habilidades alcanzadas a lo largo del Grado de Ingeniería Mecánica, tales como diseñar, construir y documentar el prototipo de un excitador inercial para ensayos dinámicos en estructuras.

Este mecanismo se encontraría dispuesto en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales, permitiendo tanto a profesores como alumnos realizar ensayos dinámicos para el análisis modal, la búsqueda de la frecuencia de resonancia y ensayos a fatiga de las distintas estructuras que se desee estudiar [Ref. Web 3 y 5].

2. Alternativas de diseño

Los primeros bocetos y los diferentes diseños que se idearon para el excitador inercial se encuentran condicionados por el motor lineal LinMot.

2.1. Motor Lineal

El excitador inercial se compone de un motor lineal, es el responsable de realizar el movimiento de traslación de manera dinámica y con baja fricción entre componentes [Ref. Web 6].

El motor lineal se compone básicamente de un estator y un vástago. El estator contiene a lo largo de su interior el bobinado por el cual circula una corriente y que por medio del fenómeno de la autoinducción generan un flujo magnético. El vástago está formado por imanes de neodimio, que son introducidos en un tubo de acero inoxidable de alta precisión de 890mm de longitud. Otro componente añadido es la brida del motor lineal que recubre externamente al estator, cuyo objetivo es garantizar la óptima refrigeración del estator en todo momento [Ref. Web 11].

Por tanto, el movimiento que ejecuta el motor lineal se realiza de manera electromagnética a través del vástago, que se desplaza por el interior del estator. En nuestro prototipo de excitador inercial, el vástago permanece inmóvil y solidario a la estructura. Y el responsable de ejecutar el movimiento de traslación del conjunto móvil es el estator junto a la brida, como se podrá apreciar en el Trabajo de Fin Grado (Figura 2.1).

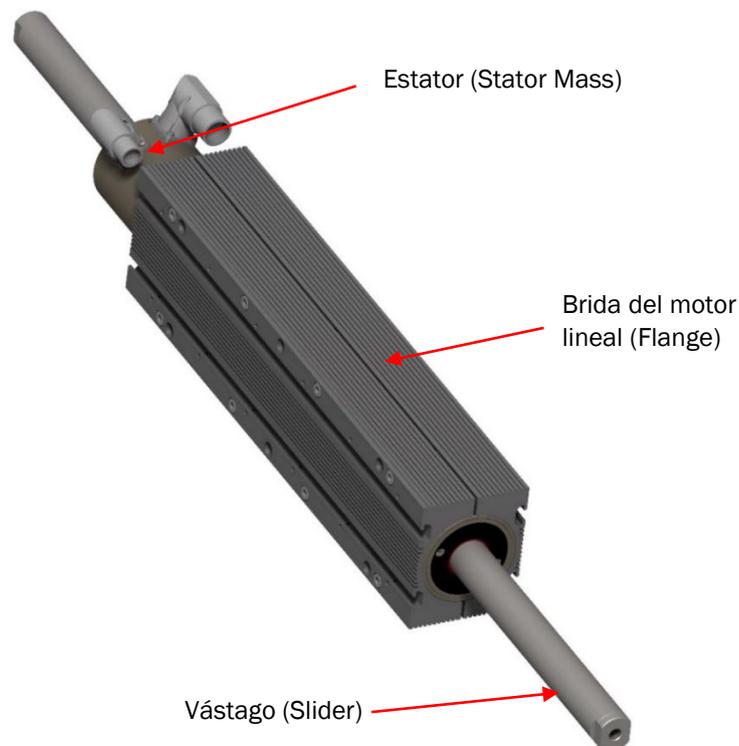


Figura 2.1: Unión de los componentes que forman el motor lineal.

2.2. Diseño conceptual

La idea conceptual para el diseño del excitador inercial surgió de los siguientes bocetos:

- A. En este primer diseño, se pensó en un conjunto estructural interior de forma cúbica, dentro de la propia estructura exterior, constituido por perfiles de acero soldados. El motor lineal tendría su anclaje al conjunto estructural mediante perfiles de más rigidez, para una consistencia adecuada. En este diseño, el responsable de realizar la excitación es el movimiento de traslación realizado por el vástago que constituye el motor lineal (Figura 2.2).

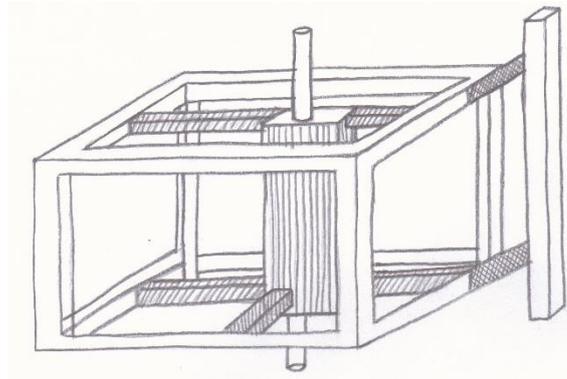


Figura 2.2: Primer boceto del excitador inercial, con anclaje a una estructura interna adicional.

- B. En un diseño posterior del excitador inercial, el conjunto estructural interior se elimina, y solamente sería la estructura externa que tendría forma de prisma cuadrangular, con una longitud igual a la del vástago del motor lineal. En la parte superior e inferior de la estructura se ubicarían unas crucetas unidas a la estructura, y en las que también se fijaría el vástago, quedando el motor lineal lo más centrado posible. El responsable de provocar la excitación sería el estator que forma parte del motor lineal (Figura 2.3).

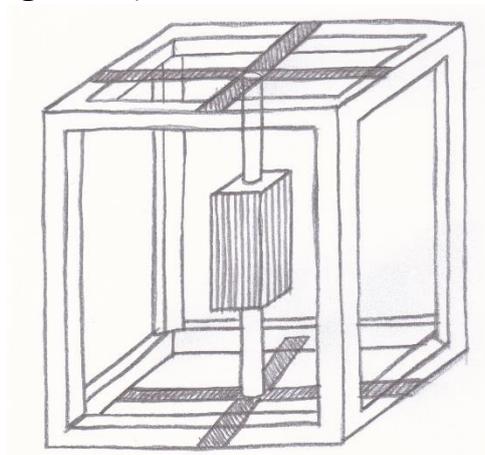


Figura 2.3: Segundo boceto del excitador inercial, unido a una estructura externa.

- C. En el siguiente diseño, se mantendría la estructura externa del caso anterior, pero en vez de unir unas crucetas a la estructura, se fijaría el motor lineal a unas chapas de acero que irían ancladas en la parte superior e inferior de la estructura exterior. Igual que en el caso anterior, el responsable de producir la excitación es el estator que constituye el motor lineal (Figura 2.4).

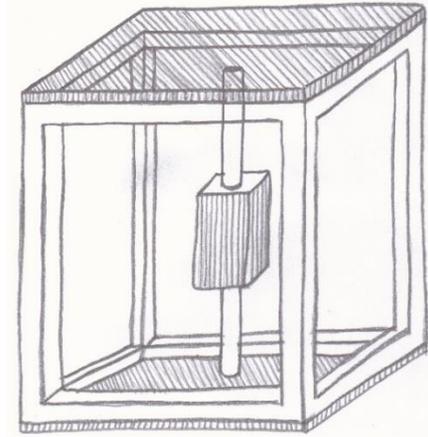


Figura 2.4: Tercer boceto del excitador inercial, con fijación de chapas de acero a la estructura exterior.

- D. Este diseño fue bastante innovador y en el que posteriormente se basaría los futuros diseños. El conjunto estructural del excitador inercial se cambiaría por completo ya que tendría forma de prisma triangular, y teniendo en cuenta que se necesitaría añadir peso adicional al movimiento de traslación para establecer distintas inercias con guiado adecuado de dicho peso (Figura 2.5).

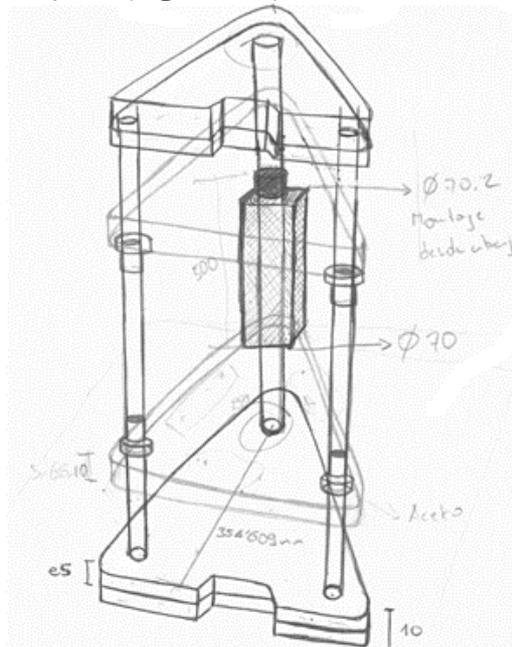


Figura 2.5: Cuarto boceto del excitador, con forma de prisma triangular y un nuevo sistema de guiado.

2.3. Diseño de prototipos

Para el diseño del excitador inercial se han efectuado varios prototipados, buscando la manera más eficiente de que consiga el movimiento deseado sin que ningún tipo de obstáculo interfiera en dicho movimiento y menos en los resultados de los ensayos de excitación estructural.

A continuación, se muestran los distintos diseños que se han llevado a cabo, comentando las razones por las que no han sido considerados el prototipo final.

2.3.1. Prototipo nº1:

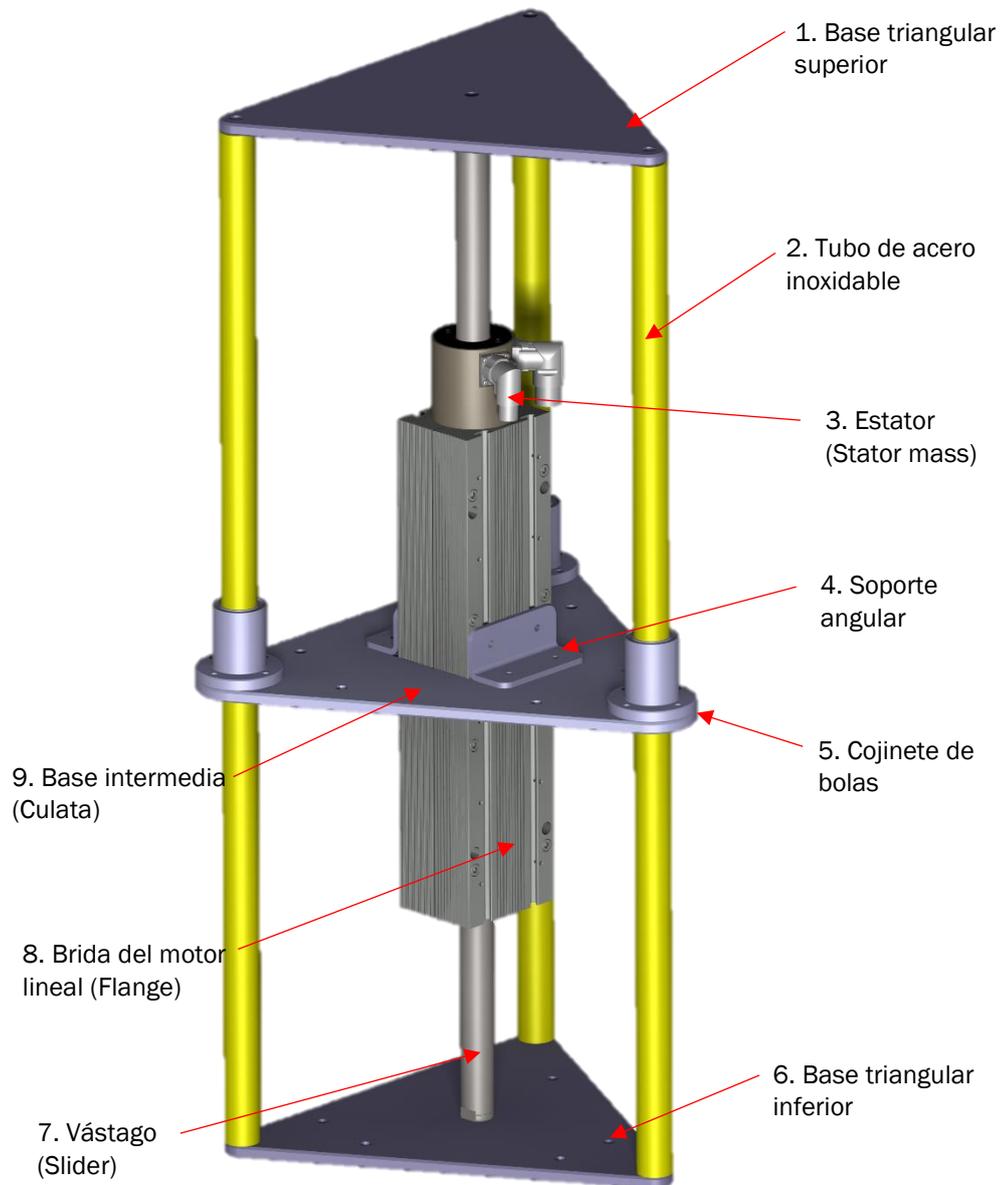


Figura 2.6: Diseño de prototipo nº1.

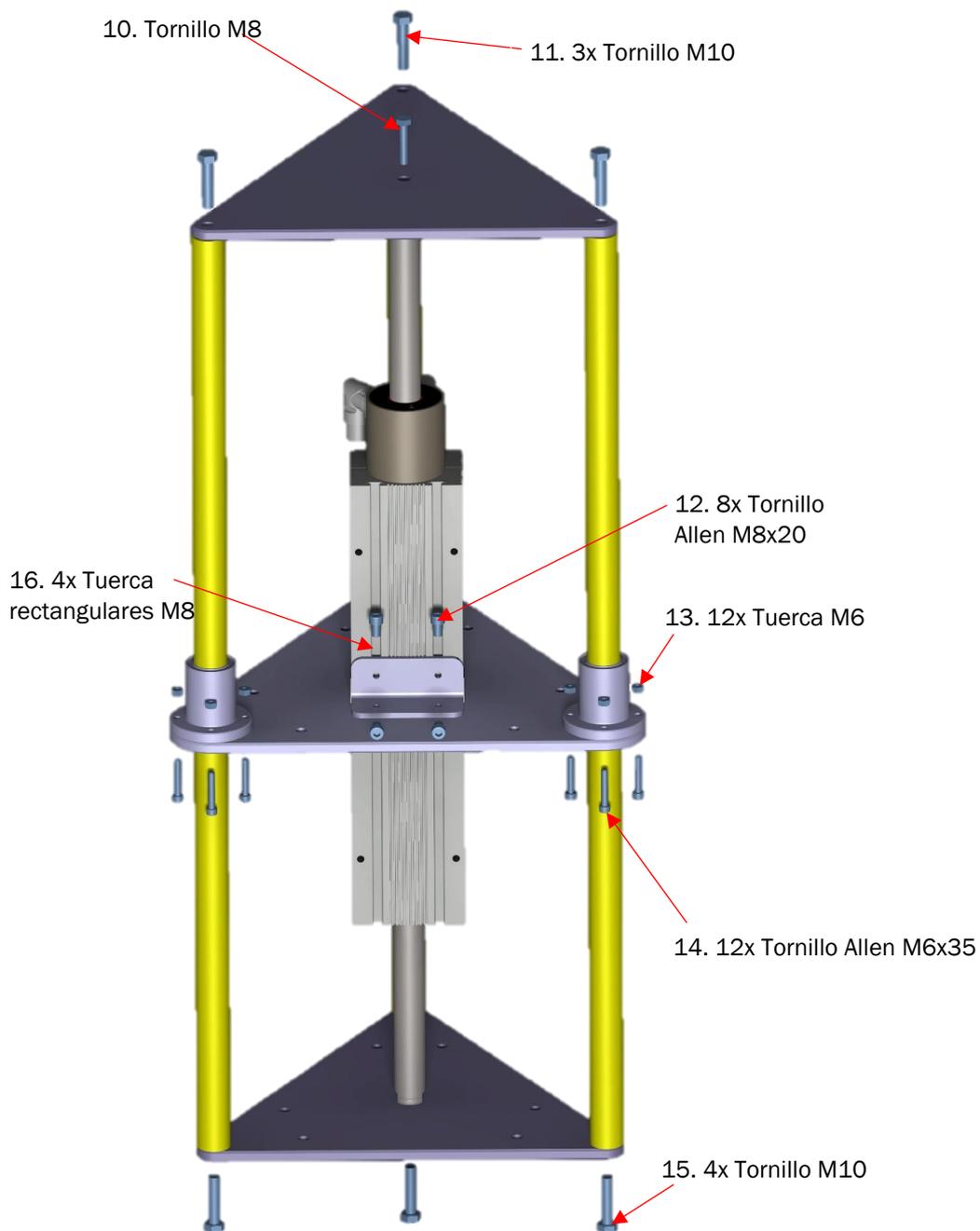


Figura 2.7: Diseño de prototipo n°1, incluyendo tornillería.

En el primer prototipo, se observa que tanto la fabricación y el montaje es simple, pero todavía se puede mejorar el diseño del mismo. Este prototipo está formado por todos los elementos que se pueden observar en la Figura 2.6.

Los tubos de acero inoxidable (2) sirven de guías, para proporcionar el movimiento que ejerce el motor lineal. Dichos tubos constan de un diámetro exterior de 30mm con espesor de 1.5mm y 890mm de longitud. La razón de dicha longitud se debe al vástago que también tiene una longitud de 890mm, y en ambos extremos tiene fabricadas roscas de M8 y M10. A ambos extremos de los tubos de acero inoxidable van soldadas tuercas de M10, que sirven para fijar la base triangular superior (1) y la base triangular inferior (6) mediante tornillos de M10 (11 y 15), proporcionando rigidez a la estructura. Las bases triangulares, tanto inferiores como superiores son de gran tamaño y, por ende, de gran peso, ya que se trataría de piezas de acero al carbono de espesor 10mm. Por esta razón, dificultaría mucho el transporte. El vástago (7) [Ref. Web 12] del estator (3) [Ref. Web 7] se encuentra fijado a la base triangular superior mediante un tornillo de M8 (10), y a la base triangular inferior por medio de un tornillo de M10 (15) [Ref. Web 13] (Figura 2.7).

La base intermedia del excitador inercial (9), denominada culata, es de mayor tamaño que las bases triangulares inferior y exterior. Esto es debido a que los cojinetes de bolas (5) que se encuentran introducidos en los tubos de acero inoxidable, permiten el movimiento. Los cojinetes deben ser anclados a la culata mediante tornillos (14) y tuercas (13) de M6, lo que requiere de más superficie en los vértices de la base intermedia para que abarque toda la superficie del rodamiento, y así conseguir una correcta fijación de ambos componentes (Figura 2.7).

Otra dificultad de este diseño es a la hora de introducir masas móviles de acero en la base intermedia del conjunto, siendo sus medidas 90x30x290mm. La culata (9) estaría anclada a la brida (8) [Ref. Web 10], que envuelve al motor lineal (3), por medio de dos soportes angulares (4) de espesor 5mm a ambos lados de la brida, en la que una superficie de dicho soporte va ensamblada a la culata y la superficie perpendicular, a la brida (Figura 2.6). Todo ello con tornillos Allen de M8 (12) junto con tuercas rectangulares (16) introducidas en las canalizaciones de la brida [Ref. Web 11], con posibilidad de regular la posición de la culata. Al finalizar el montaje (Figura 2.8), las masas móviles entrarían en contacto con los soportes angulares y las cabezas de los tornillos de M8 (12) dificultando su posicionamiento y fijación. Como resultado, no se colocaría directamente sobre la base intermedia, quedando desnivelada la masa móvil, dificultando aún más la fijación y con riesgo de una posible vibración en la estructura por el choque continuado. Hay que añadir, que los extremos de las masas móviles quedan por fuera de la culata entrando en contacto, ya que tienen unas dimensiones de 90x30x290mm. La razón de

colocar las masas fijas se explica detalladamente en el epígrafe 4, que en este caso se han de colocar en la base triangular inferior interfiriendo unas con otras haciendo que su montaje sea complicado. Las masas fijas posicionadas en la base triangular inferior también entrarían en contacto unas masas con otras, debido a sus dimensiones, 90x30x580mm. En estas masas se necesitaría la fijación de una tercera masa fija para un mejor equilibrado cuando se inicie el funcionamiento del excitador inercial, pero no se dispone de espacio en la base triangular inferior para su anclaje (Figura 2.8).

A continuación, se muestra como resultaría el montaje con masas móviles y masas fijas, para más aclaración de los problemas que suscita este diseño.

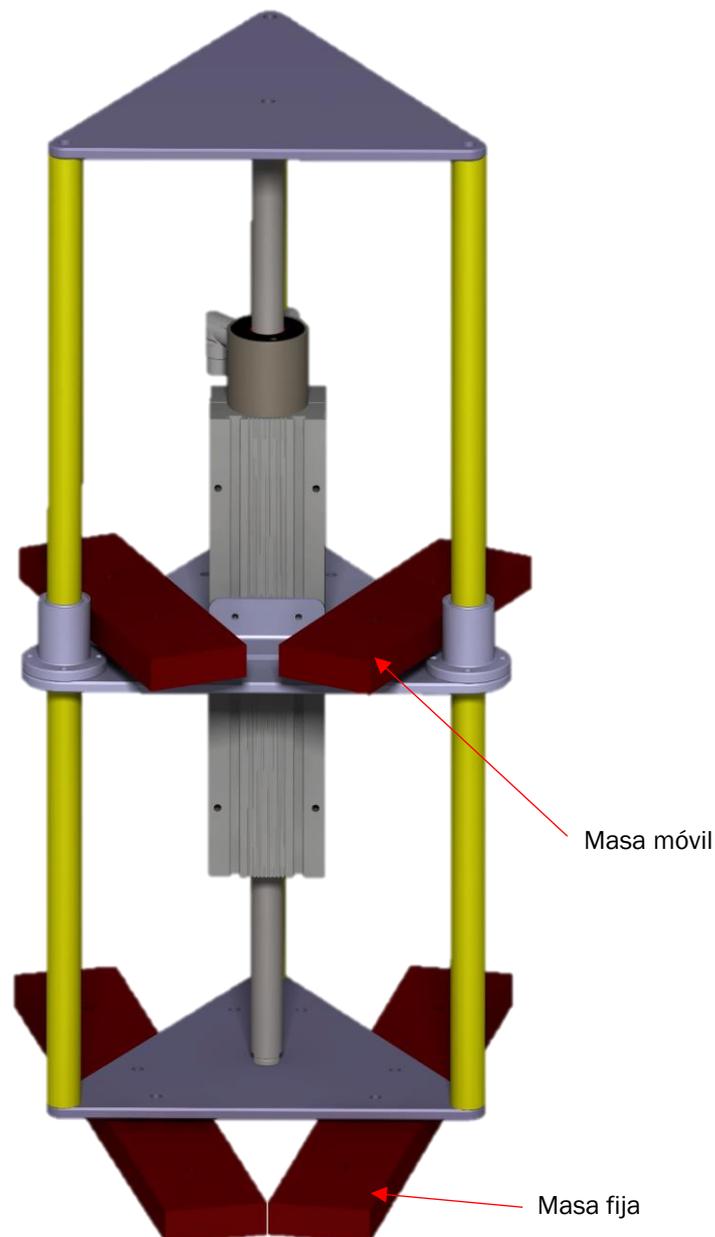


Figura 2.8: Diseño de prototipo nº1 con montaje de masas fijas y masas móviles.

2.3.2. Prototipo nº2:

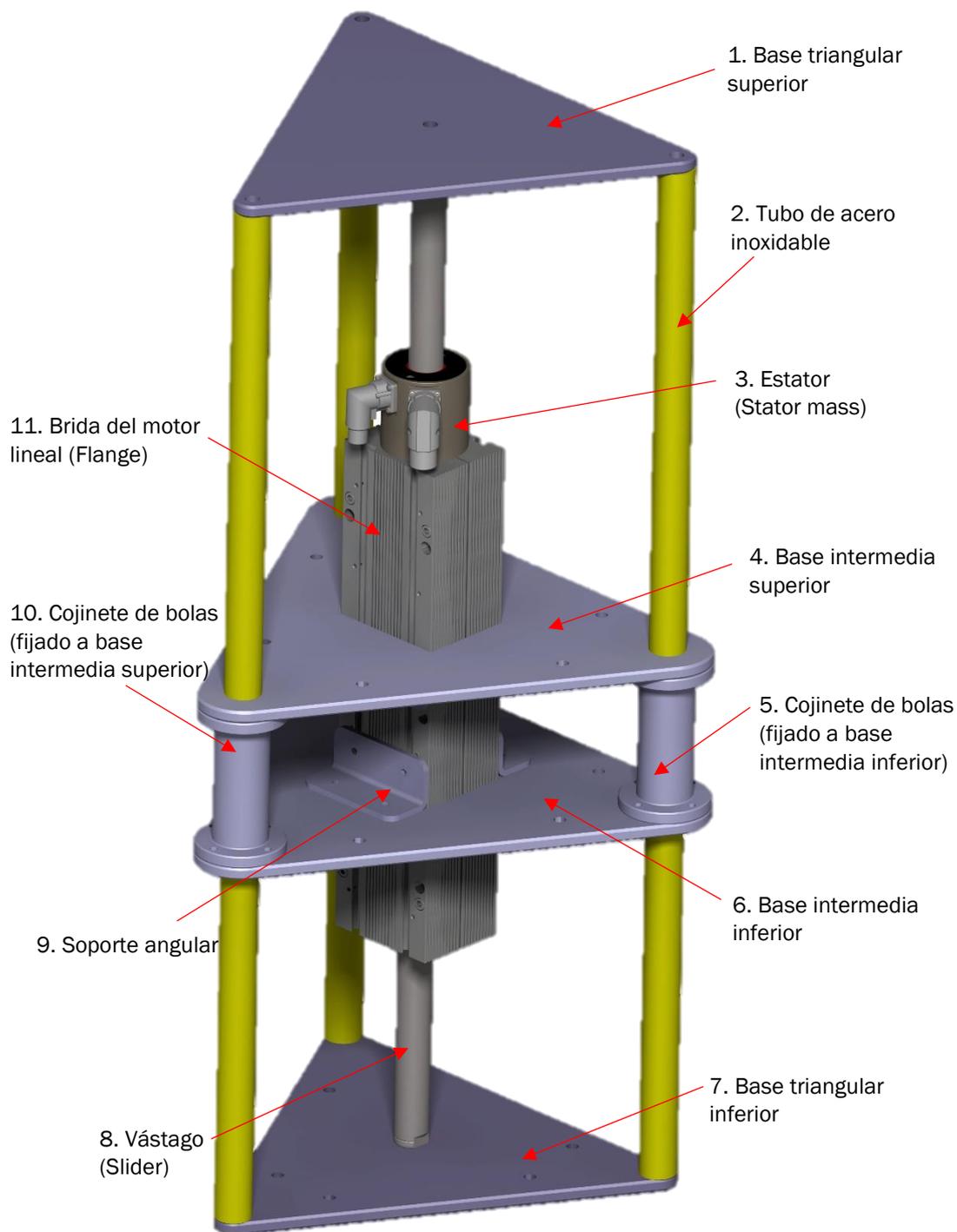


Figura 2.9: Diseño de prototipo nº2.

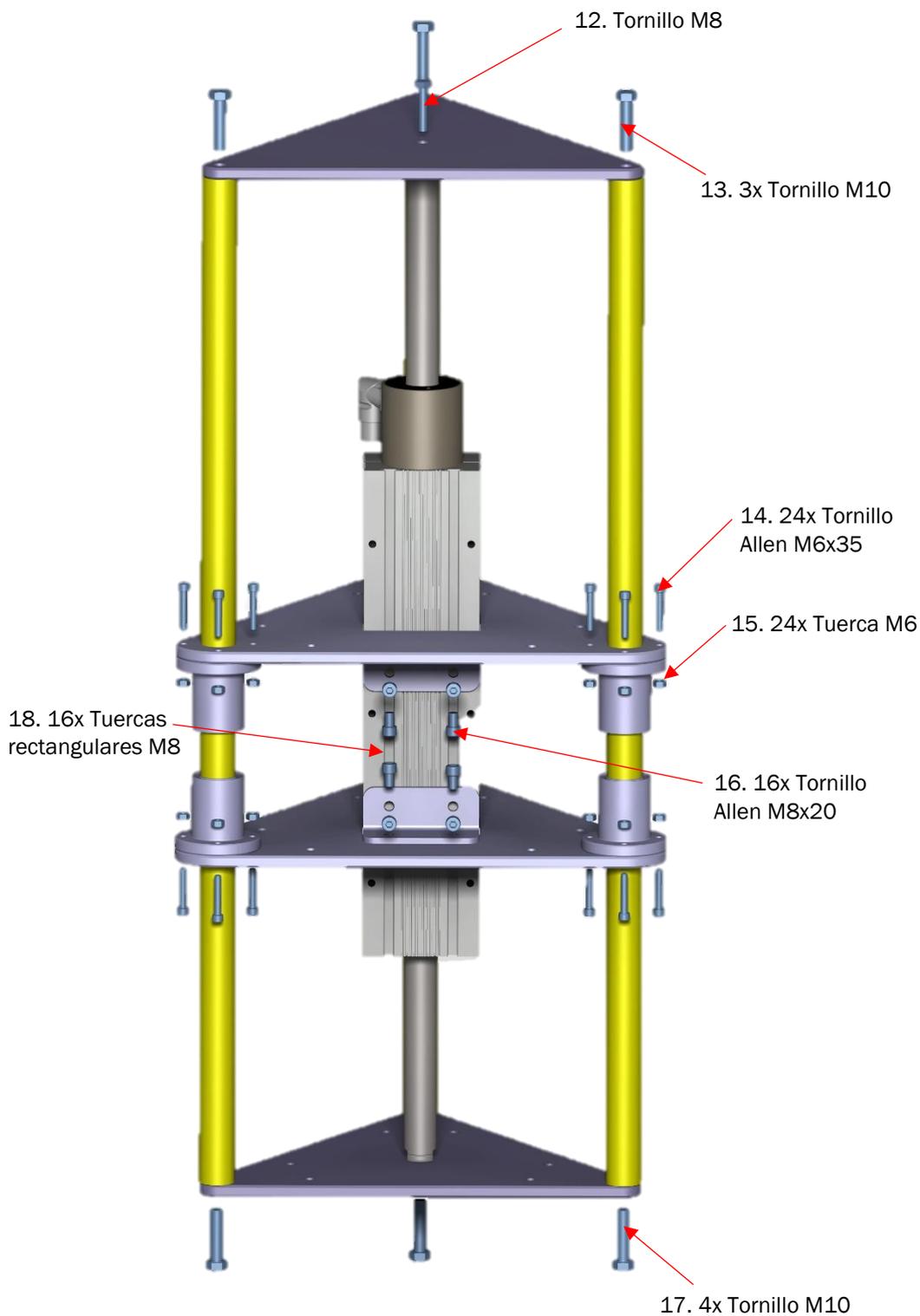


Figura 2.10: Diseño de prototipo n°2, incluyendo tornillería.

En el segundo prototipo, se han realizado cambios con respecto al primer diseño, pero sigue sin cumplir con las condiciones de funcionamiento óptimas que tiene que llevar a cabo.

Como se puede apreciar en la Figura 2.9, este diseño lleva incorporado una base intermedia superior (4), de forma y espesor idéntico a la base intermedia inferior (6), siendo ambos componentes de espesor 10mm. También se puede observar que los cojinetes de bolas (10) están anclados a la base intermedia superior, de manera similar que en la base intermedia inferior (5) por medio de tornillos y tuercas de M6 (14 y 15) a lo largo de la superficie del cojinete de bolas. Los cojinetes de bolas que se disponen en los tubos de acero inoxidable (2), tanto superiores como inferiores, se encuentran próximos, dificultando la colocación y fijación de las masas móviles.

La base triangular superior (1) y la base triangular inferior (2), son de forma y espesor 10mm, iguales que en el diseño del prototipo nº1. Ocurre lo mismo con los tubos de acero inoxidable, se utilizan tubos de idénticas dimensiones, 30 mm de diámetro exterior, 1.5mm de espesor, 890mm de longitud y que sirven de guías del movimiento que realiza el estator [Ref. Web 7] (3) junto con los cojinetes de bolas (10 y 5). Al igual que en el diseño del prototipo anterior, a ambos extremos de los tubos van soldadas tuercas de M10 para que estén fijados a las bases triangulares superior e inferior dando rigidez.

El vástago del motor lineal (8) [Ref. Web 12] se asienta en las bases triangulares, por un tornillo de M8 (12) en la base triangular superior y un tornillo de M10 (17) en la base triangular inferior [Ref. Web 13] (Figura 2.10).

Para poder anclar las masas móviles habría que sostener la base intermedia superior, muy por encima de la posición que se va a fijar, para introducir dichas masas de forma cómoda y sin causar riesgos a los operarios. A continuación, se fijarían las masas a la base intermedia inferior con tornillos de M10 cuya dimensión del vástago es grande para que atraviesen las masas móviles y se pueda realizar una sujeción correcta. Aun así, habría espacio entre la base intermedia superior y la masa móvil, debido a las cabezas de los tornillos que se utilizan en el anclaje de dichas masas o un espacio aún mayor por el choque enfrente de los cojinetes de bolas (Figura 2.11). Toda esta operación, se realiza sosteniendo en todo momento la base intermedia superior mientras se realiza el apriete de las masas móviles con la base intermedia inferior, por lo que sea bastante complicado la fijación de las masas móviles en el prototipo nº2.

Al igual que en el diseño del prototipo nº1, las disposiciones de las masas móviles entran en colisión con el soporte angular (9) que une la brida que abarca el motor lineal (11) [Ref. Web 10] con la base intermedia inferior. En este diseño habría que tener en cuenta que hay cuatro soportes angulares en

total. Dos que fijan la base intermedia superior a la brida y otros dos soportes angulares que fijan la base intermedia inferior a la brida. Dichos soportes se encuentran situados a ambos lados del motor lineal, junto a las canalizaciones de la brida. Puede existir colisión de las masas móviles con dichos soportes angulares, y también con las cabezas de los tornillos Allen de M8 (16), ubicados tanto en los soportes angulares superiores como en los soportes angulares inferiores, junto con las tuercas rectangulares (18) en el interior de las canalizaciones de la brida del motor lineal [Ref. Web 11]. Esto impide una falta de fijación de las masas móviles con respecto a las bases intermedias causando un choque persistente, por no estar completamente apoyada la masa móvil sobre la superficie de las bases intermedias.

Para este diseño aparecen los mismos problemas en la disposición de masas fijas, como en el diseño del prototipo nº1, entrando en colisión unas masas con otras, debido a sus dimensiones, y también necesitando de una tercera masa fija, para un adecuado equilibrio del conjunto.

A continuación, se muestra el resultado de la disposición de las masas, tanto fijas como móviles y su disposición, apreciando con mayor detenimiento los problemas citados con anterioridad.

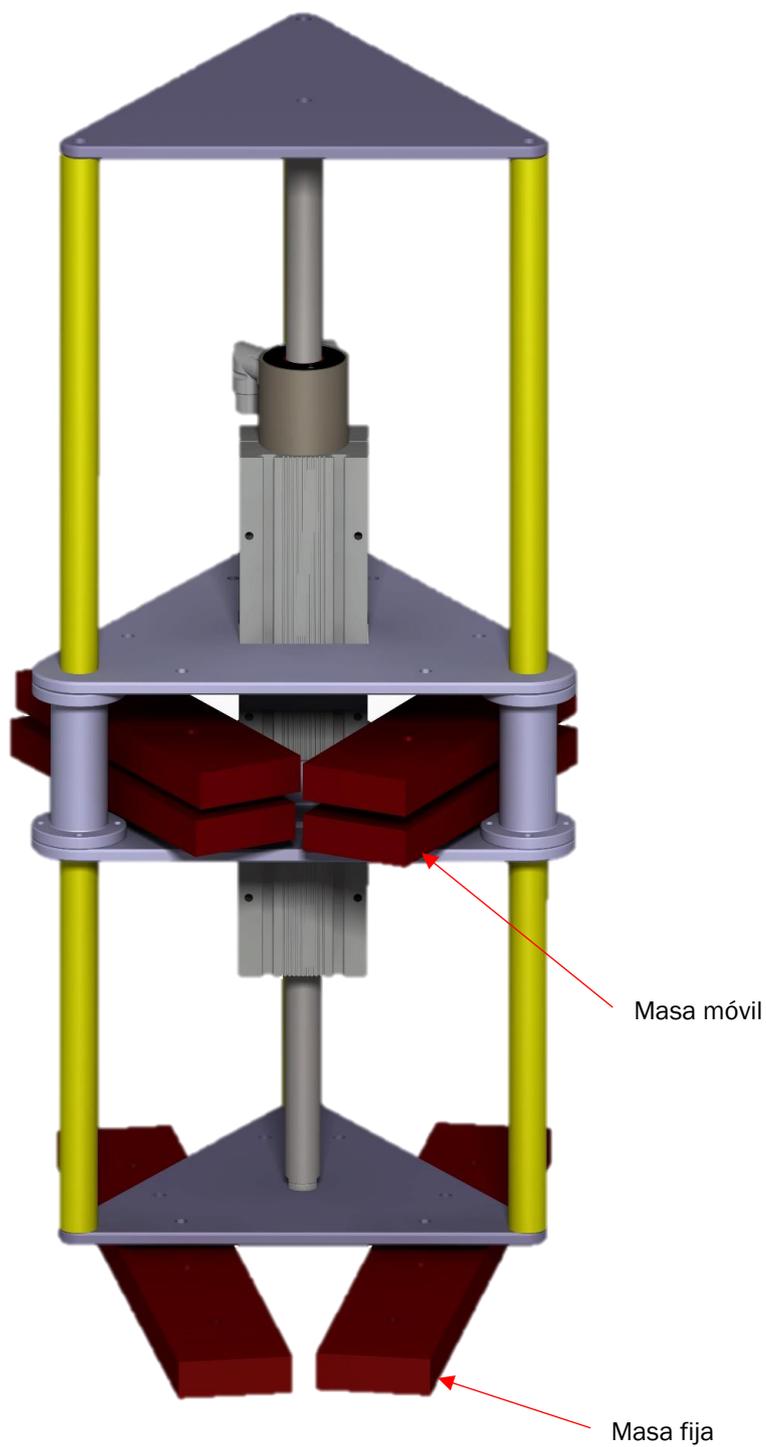


Figura 2.11: Diseño de prototipo n°2.

2.3.3. Prototipo nº3:

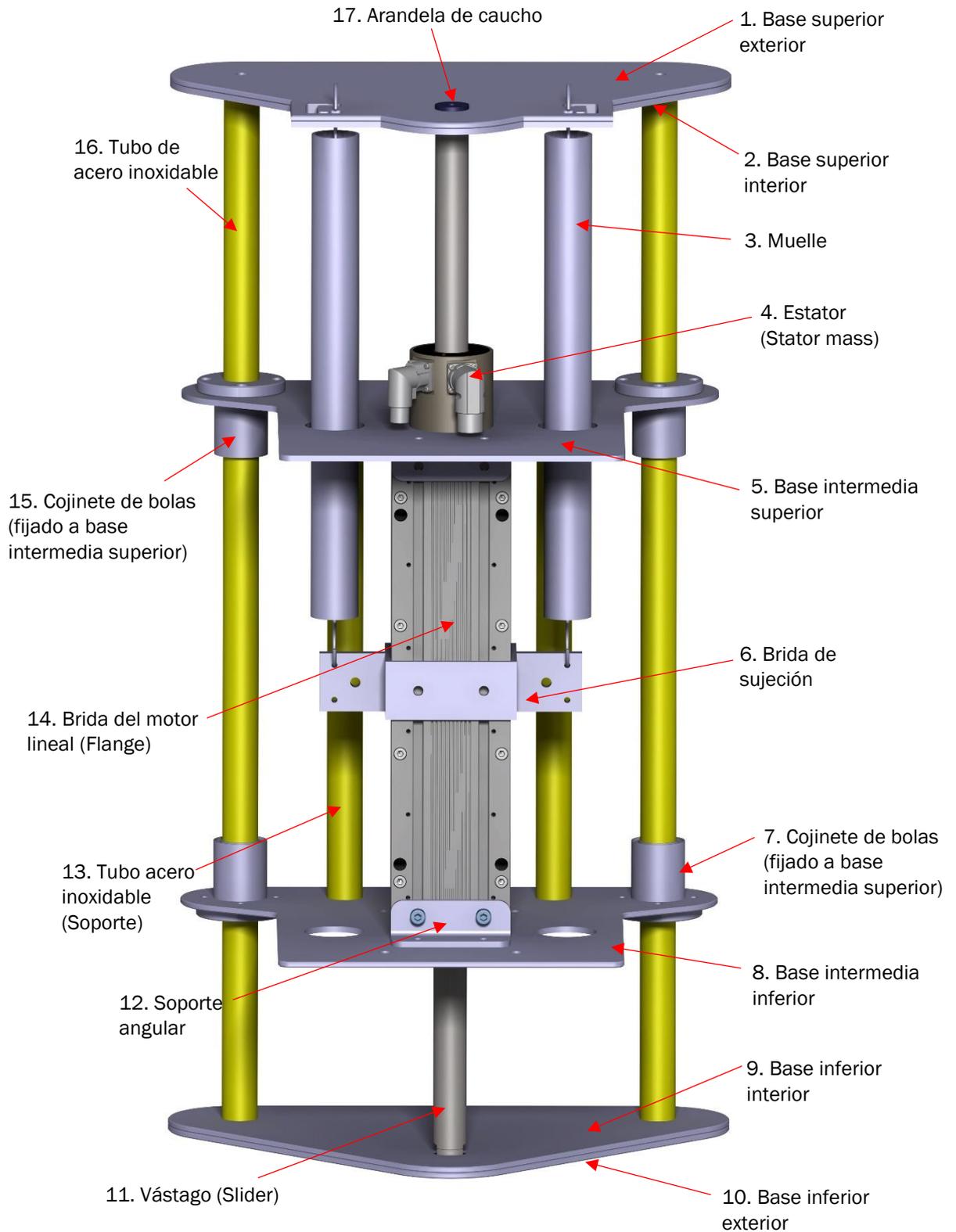


Figura 2.12: Diseño de prototipo nº3.

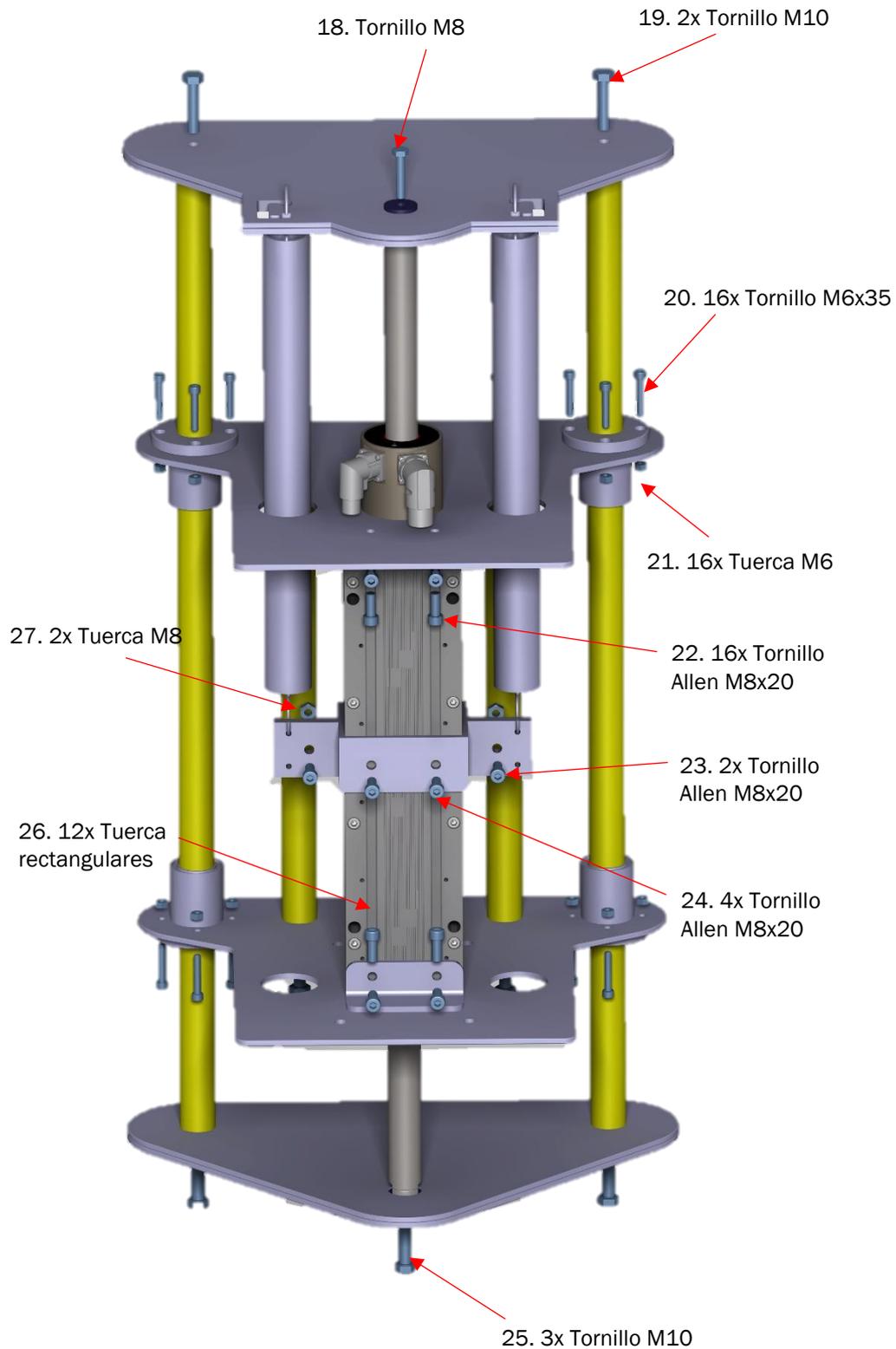


Figura 2.13: Diseño de prototipo n°3, incluyendo tornillería.

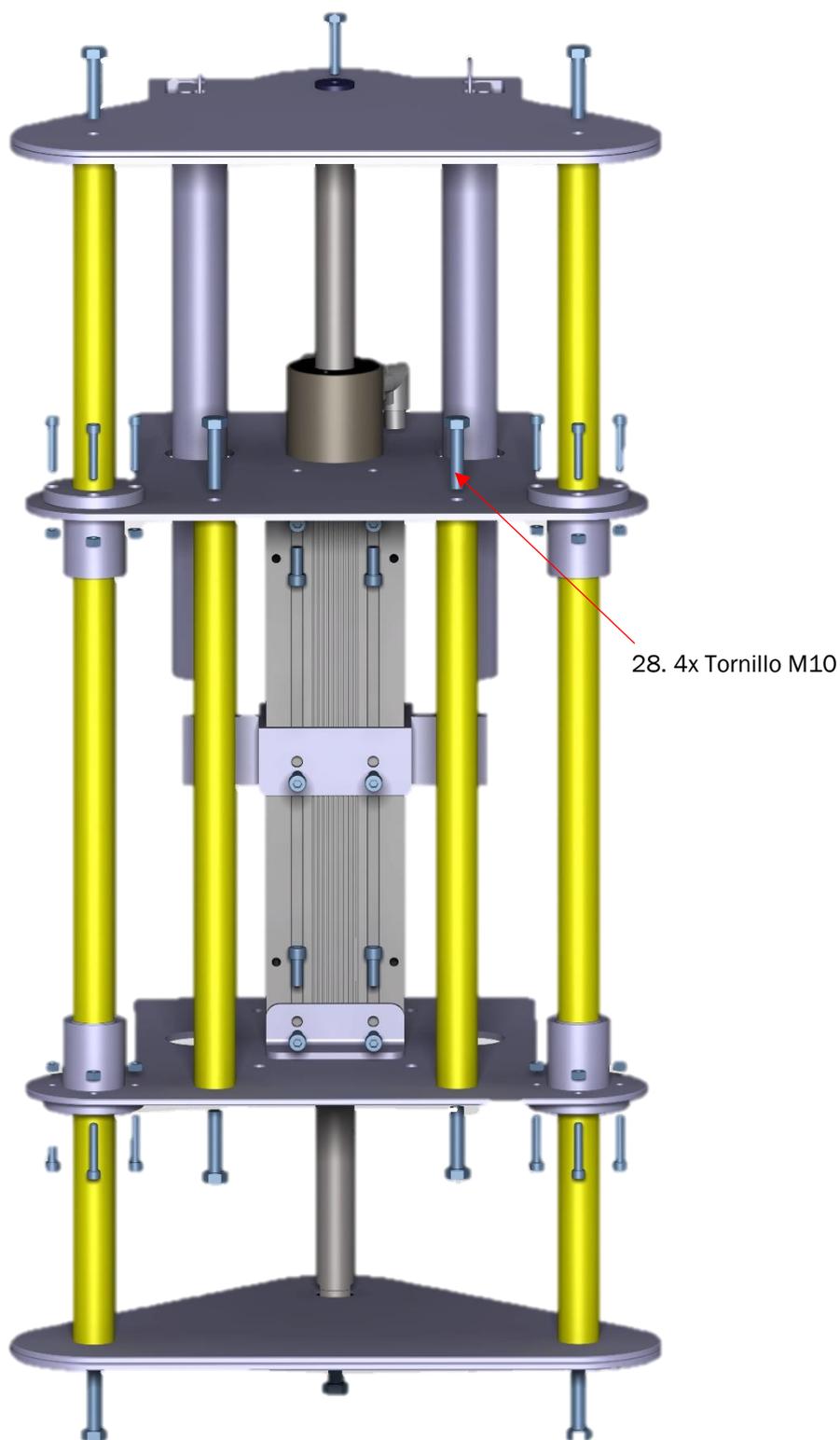


Figura 2.14: Diseño de prototipo nº3, incluyendo tornillería (Vista posterior).

El concepto de este diseño ha servido para plantear el prototipo de excitador inercial que se ha construido finalmente, difiere mucho de los prototipos anteriormente mencionados. Como se puede apreciar en la Figura 2.12, la base de funcionamiento sigue siendo similar que, en los casos anteriores, pero con modificaciones realizadas en sus componentes.

Este prototipo cuenta con dos bases en la parte inferior y dos bases en la parte superior, todas ellas con un espesor de 5mm y de acero al carbono, para una mayor resistencia.

Las bases inferiores y las bases superiores del conjunto son diferentes en cuanto a la forma. Las bases superiores tienen como objetivo, además de servir como fijación y posicionamiento de los tubos de acero inoxidable (16), alojar dos muelles (3) a ambos lados de la brida del motor lineal (14) [Ref. Web 10] que servirán de asistencia al estator (4) [Ref. Web 7] en el movimiento vertical, y así tenga que realizar un menor esfuerzo a la hora de desplazarse. Los muelles van introducidos en dos bridas de sujeción (6) que actúan de abrazadera, fijadas entre sí por dos tornillos de M8 (23) y dos tuercas de métrica idéntica (27). Dichas bridas son posicionadas a lo largo de la brida del motor lineal por medio de tornillos de M8 (24) y tuercas rectangulares (26) alojadas en las canalizaciones de la brida del motor lineal.

La base inferior exterior (10) y la base superior exterior (1) tienen como objetivo servir de fijación para el vástago del motor lineal (11) [Ref. Web 12] y los tubos de acero inoxidable, que actúan como guías. Ambos tubos de acero inoxidable tienen unas dimensiones de 30mm de diámetro exterior con un espesor de 1.5mm y con una longitud de 897mm, debido a que el vástago del motor lineal mide 890mm e irían colocadas arandelas de caucho (17) de espesor 3.5mm a ambos extremos del vástago, para evitar el contacto con la base inferior exterior y la base superior exterior de acero, y así proteger al vástago de un desgaste precipitado. Gracias a la soldadura de tuercas en los extremos de los tubos de acero inoxidable, van fijados tanto a la base inferior exterior como a la base superior exterior, por tornillos de M10 (19 y 25). El vástago del motor lineal se une a la base inferior exterior por un tornillo de M10 (25) y a la base superior exterior por un tornillo M8 (18) [Ref. Web 13] (Figura 2.13).

La base inferior interior (9) y la base superior interior (2) van instaladas por el interior de la estructura para un posicionamiento correcto de los tubos de acero inoxidable y del vástago del motor lineal, sin posibilidad de deslizamiento. Con este montaje se trata de atravesar tanto la base inferior interior como la base superior interior con los tubos de acero inoxidable, pero haciendo tope con la base inferior exterior y la base superior exterior, y dando una mayor rigidez al conjunto por la colocación de la tornillería anteriormente mencionada.

Las bases intermedias (5 y 8) son de diseño idéntico, para que su montaje no suponga un problema. Ambas bases son de espesor 5mm y de acero al carbono. Se encuentran fijadas sobre la brida del motor lineal y por sus esquinas laterales atraviesan los tubos de acero inoxidable, con el posterior montaje de los cojinetes de bolas (7 y 14). En dichas bases se realizan unos orificios de 50mm de diámetro, a ambos lados de la brida del motor lineal por los que atraviesan los muelles, para finalmente anclarse a la brida de sujeción. En el caso de los cojinetes, se encuentran apoyados directamente sobre las bases intermedias, de manera superpuesta, la base intermedia inferior quede situada por encima de la base de los cojinetes inferiores, y en el caso de la base intermedia superior se sitúa por debajo de la base de los cojinetes superiores. Este montaje proporciona una mayor compresión en la unión, y por tanto una mayor sujeción. Se efectúan unos orificios en las esquinas de las bases intermedias a lo largo de la zona circular, de diámetro 7mm, dónde van posicionados los tornillos y tuercas de M6 (20 y 21) que hacen posible la unión. Además, tienen fabricados orificios a ambos lados del motor lineal para la inmovilización de las masas móviles de dimensiones 90 x 30 x 290mm (Figura 2.13).

Otro componente que se ha añadido en este diseño, son dos tubos de acero inoxidable (13), de sección idéntica a los tubos de acero inoxidable que sirven de guías, pero que en este caso desempeñan las funciones de soporte y de rigidez del conjunto intermedio, que lo forman la brida del motor lineal, las bases intermedias y los cojinetes. Sin estos dos tubos recaería demasiado peso sobre la brida del motor lineal por parte de las bases intermedias y con las masas móviles cuando se acoplen. La fijación de estos dos tubos se realiza mediante tornillos de M10 (28), gracias a que llevan soldadas roscas de M10 en su interior a ambos extremos, y uniéndose a las bases intermedias inferior y superior (Figura 2.14).

Un problema que podría ocurrir sin la fijación de estos tubos de acero inoxidable es que ambas bases intermedias se flexionen por el desplazamiento no uniforme del conjunto intermedio, impidiendo un correcto movimiento vertical, ya que no se desplazaría conjuntamente. En cualquiera de los casos, las cargas a flexión se tienen que evitar ya que se transmitirían posteriormente al vástago del motor lineal.

Como se pueden apreciar en la Figura 2.12, las bases intermedias tienen mayor superficie con respecto a las bases inferiores y superiores, lo que supone un problema a la hora de colocar las masas móviles, pudiendo dar lugar a una cierta inestabilidad cuando el excitador inercial esté en funcionamiento. Las bases intermedias son emplazadas a la brida del motor lineal por soportes angulares (12) y tornillos de M8 (22) y tuercas rectangulares (26) introducidas en las canalizaciones de la brida.

En este prototipo no van a surgir problemas a la hora de la colocación de las masas fijas en la base inferior del excitador inercial, ya que se van a disponer en sentido transversal, sin que entren en contacto ambas masas fijas y tampoco ningún elemento que compone el propio excitador inercial, como se puede observar en la Figura 2.15 y Figura 2.16.

En este diseño nos surge el problema, como en los diseños anteriores, debido a la disposición de las masas móviles ubicadas en las bases intermedias en sentido longitudinal. Existe colisión con el soporte angular de sujeción quedando la masa móvil desnivelada sin apoyar directamente sobre la superficie de la base intermedia, lo que produce una mala inmovilización de las masas móviles, y que por el choque continuado haya riesgo de producirse vibración en la estructura que soporta el excitador inercial.

Otro problema que aparece en este diseño es que la brida del motor lineal soporte demasiado esfuerzo por parte de las bases intermedias y las masas móviles que se pueden alojar en la base intermedia inferior a ambos lados del motor lineal, en sentido longitudinal.

La disposición de la masa móvil en la parte exterior de la base intermedia inferior (Figura 2.15) transmite cargas a flexión al vástago pudiendo llegar a deformarse, incluso pudiendo llegar a fracturarse, inutilizando una parte esencial del motor lineal. Por restricción del fabricante del motor lineal Linmot, advierte que el vástago no debe sufrir ningún tipo de carga a flexión, bajo ningún concepto.

A continuación, se muestra la imagen de cómo sería la disposición de las masas, tanto fijas como móviles, para una mejor comprensión.

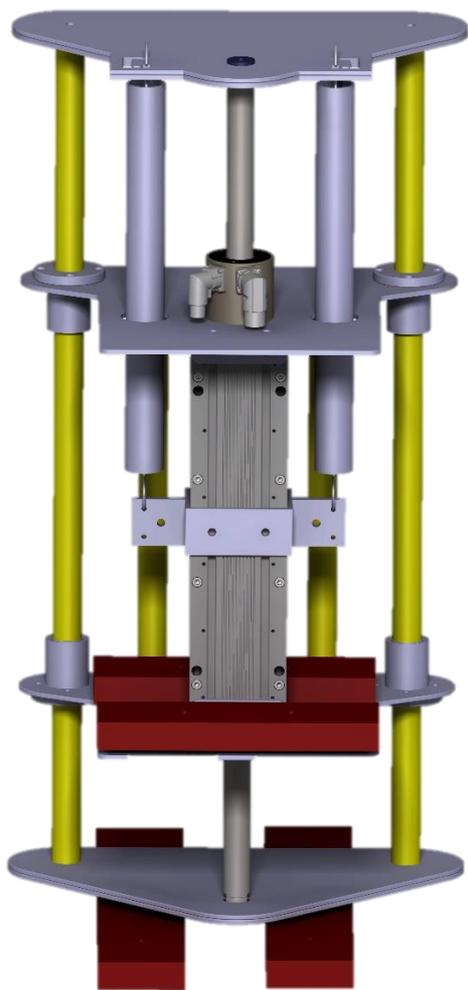


Figura 2.15: Diseño de prototipo nº3.

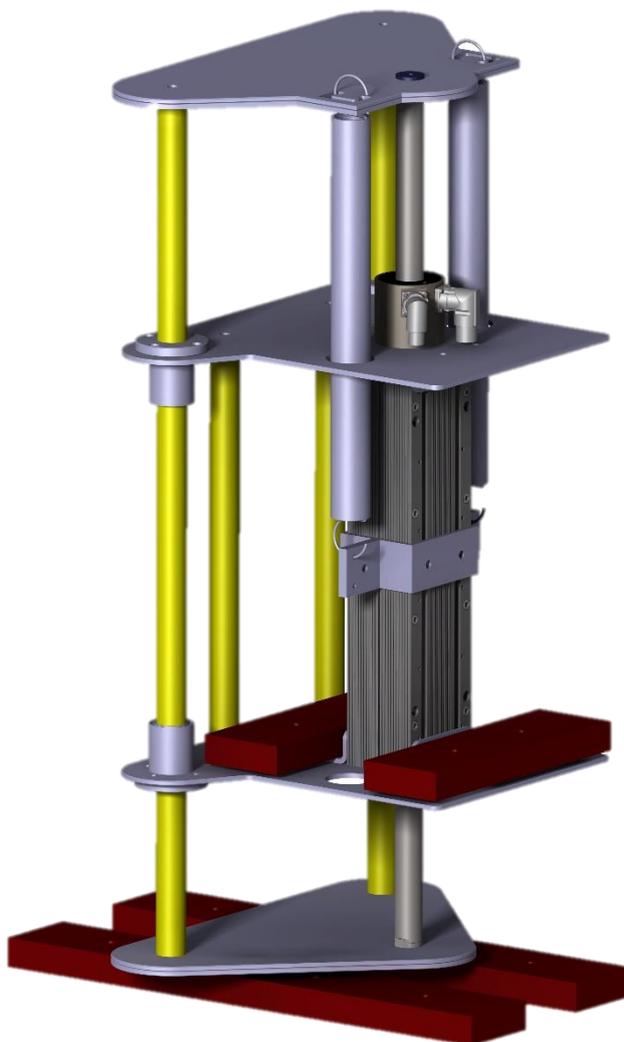


Figura 2.16: Diseño de prototipo nº3.

2.4. Prototipo Final

Gracias al diseño de los prototipos, que se ha mencionado en el Epígrafe 2.3 anterior, hemos optado por el prototipo final de excitador inercial que más ventajas tiene, en cuanto a su fabricación y montaje de sus componentes. Las condiciones de funcionamiento las cumple correctamente sin ningún tipo de interacción con los componentes del conjunto estructural y garantizando la máxima carrera a lo largo del vástago. Tampoco existen problemas a la hora de fijar las masas fijas y móviles, que como se ha comentado anteriormente, era uno de los principales problemas por los que se han descartado los prototipos anteriores.

Para este diseño se ha tenido presente todos los factores mencionados previamente con el objetivo de obtener un prototipo compacto, ligero en su transporte y de fácil construcción, buscando la máxima ergonomía posible. Además, tiene que cumplir, que la estructura que sostiene el conjunto del motor lineal, vástago, brida y estator sea rígida a la par que resistente.

A continuación, se muestra el diseño en 3D del prototipo final de excitador inercial a través de Catia V5 (Figura 2.17) y que posteriormente se describirán las partes de que se compone, junto con la función que desempeña.

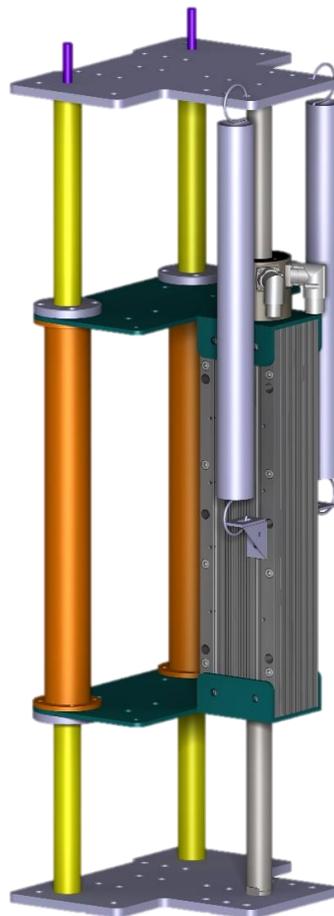


Figura 2.17: Prototipado de excitador inercial final.

El diseño final del excitador inercial está formado por los siguientes componentes (Figura 2.18):

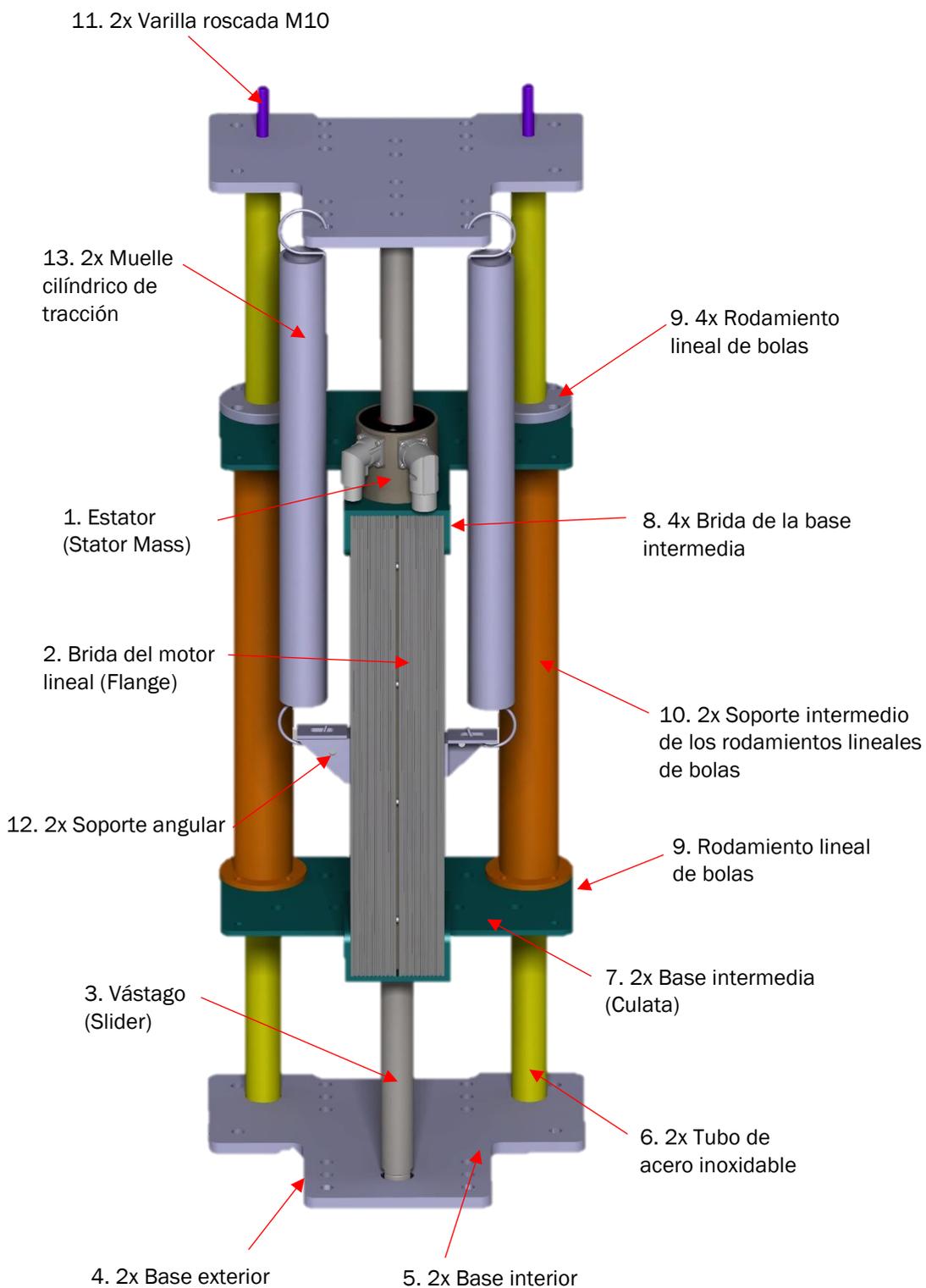


Figura 2.18: Componentes del excitador inercial.

2.4.1. Descripción de los componentes del excitador inercial

2.4.1.1. Estator (Stator Mass)

El estator es uno de los componentes más importante de todo el conjunto del excitador inercial ya que será la parte en movimiento que se traslada de manera dinámica, sin fricción a lo largo del conjunto estructural.

En nuestro prototipo de excitador inercial hemos incorporado un estator de transmisiones electromagnéticas de forma tubular. El movimiento lineal se produce de manera eléctrica exclusivamente, sin ningún tipo de desgaste y sin intermediarios de tipo mecánico como engranajes, husillo o correas [Ref. Web 6]. El estator tiene como objetivo convertir la energía eléctrica que se le transmite en energía mecánica. En nuestro caso, la energía mecánica producida es el desplazamiento longitudinal del estator (1) a lo largo del vástago (3), ya que dicho componente se encontrará fijo al conjunto estructural. En el interior del estator se encuentran las bobinas responsables de crear el campo magnético, también denominado devanado, que realizará dicho desplazamiento de traslación [Ref. Web 6]. Además, contiene los casquillos de rozamiento para el vástago, los sensores de lectura de posición y un circuito microprocesador para la monitorización del motor lineal en todo momento (Figura 2.19).

El sensor de posición interno mide y supervisa la posición actual del estator no solo cuando se detiene, sino también durante el movimiento. Las desviaciones que se producen en la posición se detectan de inmediato y se informan al microprocesador. El motor lineal se puede posicionar libremente dentro del rango completo de la carrera que permite el vástago. Por otro lado, la velocidad de desplazamiento y la aceleración se pueden controlar con precisión. Las oscilaciones complejas pueden guardarse como curvas en el módulo de control (drive) que rige el estator y ejecutarse por él, a la velocidad y amplitud deseada [Ref. Web 6].

El estator es alimentado por dos cables: el cable de alimentación (cable naranja) que va conectado a la red trifásica [Ref. Web 9], y el cable de codificación (cable verde) que es el responsable de transmitir al estator la señal configurada a través del programa DEWESoftX3 [Ref. Web 8]. En el Anexo 6, se describirá todo lo referente al cableado que compone el conjunto de excitador lineal.

La elección de este motor se ha debido a su poco peso, 8.25 kg, lo cual puede ser fácilmente transportable por una persona. Otra característica por la que se ha escogido es por su elevada fuerza de empuje siendo la máxima en 2720 N a una velocidad de 3.9 m/s [Ref. Web 7].

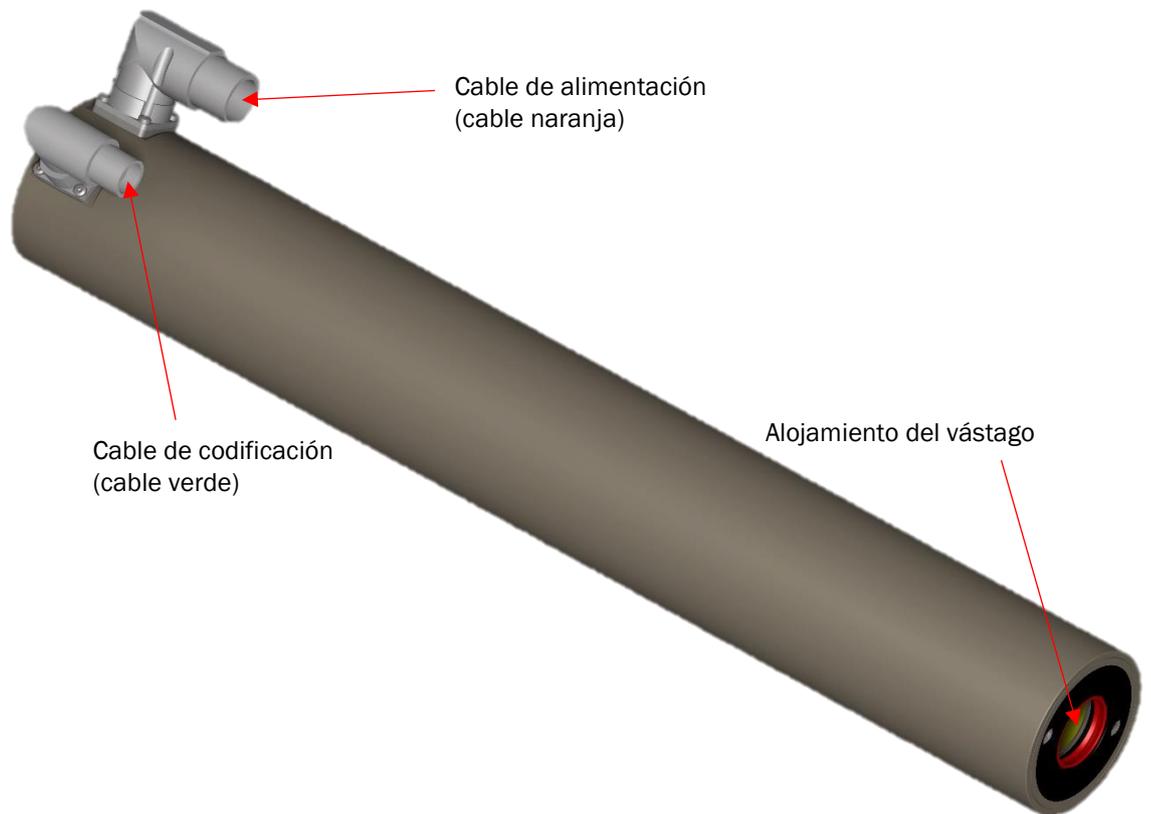


Figura 2.19: Estator, separado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.2. Brida del motor lineal (Flange)

El motor lineal se encuentra envuelto por dos elementos de aluminio, cuya unión establece el conjunto denominado brida. Todo el conjunto tiene 430mm de longitud y una sección rectangular de 80x100mm, con un peso de 4.056Kg [Ref. Web 10]. Dicho elemento tiene como misión básica el enfriamiento del motor lineal, ya que se alcanzarán temperaturas elevadas en él durante la ejecución del movimiento. Las aletas de enfriamiento, que se encuentran en toda la superficie exterior de la brida, aseguran un enfriamiento óptimo del motor lineal. En la aplicación que nos ocupa tiene una segunda misión importante: sujetar las culatas, que son las que, junto con el vástago, guiarán el movimiento.

Por excelencia el aluminio es el material idóneo para disipar el calor por su alta conductividad térmica, y además tiene una gran resistencia ante la oxidación y corrosión. Hay que tener especial cuidado en el manejo y sujeción de la brida porque al ser fabricado de aluminio se pueden dejar marcas en la superficie y dobleces en las zonas de las canalizaciones dificultando la entrada de las tuercas rectangulares que son introducidas en las mismas. Dichas tuercas rectangulares servirán de fijación de las culatas (7) a la brida del motor lineal gracias a las bridas (8) soldadas a las bases intermedias.

La sujeción de la brida al motor lineal se hace sobre una gran superficie del estator, prácticamente en toda su longitud, para así cubrir la mayor parte de la superficie a enfriar. Dicha sujeción se realiza por medio de ocho tornillos Allen M6x45, situados en los exteriores de la carcasa [Ref. Web 11] (Figura 2.20).



Figura 2.20: Brida del motor lineal, separado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.3. Vástago (Slider)

Este componente es también una parte bastante importante de todo el conjunto estructural, debido a que el vástago tiene por objetivo servir de guía al estator (1). Dicho componente ejecutará su movimiento de traslación a lo largo de todo el vástago, ya que irá introducido en el interior del motor lineal.

El vástago tiene un diámetro exterior de 28mm y una longitud 890mm con un peso de 4.18 kg [Ref. Web 16]. Su construcción se basa en un tubo de acero inoxidable de alta precisión que lleva incorporado en su interior imanes de neodimio, que gracias al devanado del estator (1) favorece el movimiento de traslación de manera electromagnética [Ref. Web 6].

En ambos extremos del vástago tiene fabricadas dos taladros roscados ciegos, de M8x10 y M10x20, que se utilizan para fijar el vástago al conjunto estructural [Ref. Web 13]. El taladro ciego roscado de M10x20 se sitúa en la parte inferior del conjunto estructural del excitador inercial, y el taladro ciego roscado de M8x10 en la parte superior (Figura 2.21).

Hay que tener especial cuidado en el montaje del vástago, para que no sufra ningún tipo golpe o mella en la carcasa de acero inoxidable porque podrían dañarse alguno de los imanes de su interior. Esto podría suponer un deterioro considerable y por consiguiente un mal funcionamiento de dicho componente.

Además supondría que el estator (1) no se desplazase correctamente a lo largo del vástago e incluso no proporcionar la suficiente fuerza a la hora de realizar los estudios estructurales.

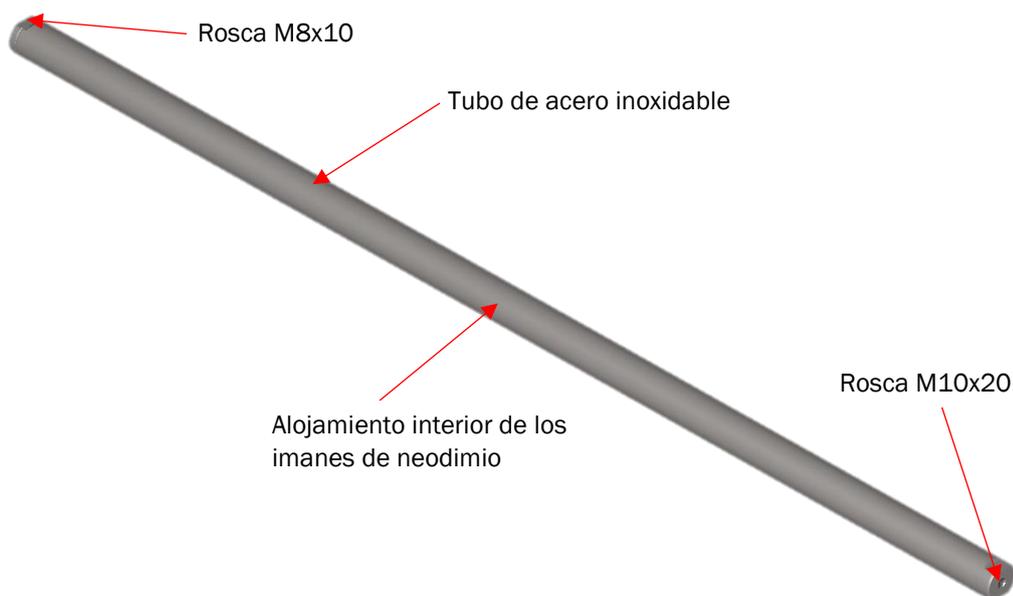


Figura 2.21: Vástago, separado del conjunto excitador lineal.

2.4.1.4. Base exterior

La base exterior se trata de una placa de acero S275 de espesor 5 mm, con la forma que se puede apreciar en la Figura 2.22 para poder disponer de una manera simétrica todo el conjunto de excitador inercial.

Las bases exteriores, tanto inferior y superior son idénticas. Su fabricación se llevó a cabo mediante corte por láser con un nivel de acabado excepcional. La empresa encargada de realizar el corte por láser fue Laser Ebro S.L. Además, cabe destacar que las dos bases sean iguales favorece una fabricación rápida y, por consiguiente, un ahorro económico. Además, las dos bases exteriores tienen un montaje dinámico con respecto al conjunto estructural.

Ambas bases exteriores tienen el objetivo de dar rigidez al conjunto estructural fijando el vástago (3) y los tubos de acero inoxidable (6). El vástago se fija a la base exterior inferior por medio de tornillo M10 y a la base exterior superior con un tornillo de M8, ambos tornillos con arandelas metálicas para soportar la carga de apriete. Los tubos de acero inoxidable tienen sujeción a las bases exteriores por medio de unas varillas roscadas de M10, que pasan por el interior de los tubos de acero inoxidable, y fijándose por medio de tuercas M10 junto con arandelas metálicas.

Los taladros fabricados en las bases exteriores están dispuestos de manera simétrica teniendo distintos objetivos:

- I. Un taladro que sirve para la fijación del vástago del motor lineal.
- II. Dos taladros laterales para la sujeción de los tubos de acero inoxidable mediante varillas roscadas M10.
- III. Dos taladros para atornillar una chapa de acero que servirá de soporte para la colocación de las masas fijas (Epígrafe 4). Dicha chapa lleva soldadas dos tuercas de M10 situadas a la altura de los taladros para la sujeción de la chapa de acero a la base inferior.
- IV. Cuatro taladros para la colocación de una escuadra metálica (se instalará otra escuadra idéntica al otro extremo del excitador inercial) regulada a distintas alturas cuando el excitador inercial se disponga en posición horizontal.
- V. Catorce taladros en los que se puede colocar tornillos y tuercas de M10 que funcionan a modo de taco para nivelar el excitador inercial. Únicamente en la base inferior exterior.
- VI. Cuatro taladros que servirían de fijación de las masas fijas, bien centradas en la base inferior, como otra posibilidad de montaje.
- VII. Dos taladros en los que se introducirá los dos ganchos de los muelles cilíndricos de tracción. Únicamente en la base superior exterior.

Los taladros tienen un diámetro de 11mm, para que haya cierta holgura y no provoque un problema a la hora de introducir los tornillos de M10 en dichos taladros y así poder atornillarlos a la base inferior. Se puede apreciar con mejor detenimiento en el Plano 1 del Anexo 7.

A diferencia de la base inferior exterior, la base superior exterior no requiere la fijación de las masas fijas, por tanto, solo tendrían uso el taladro (I) dónde se fija el vástago, los taladros (II) para la sujeción de los tubos de acero inoxidable gracias a la varilla roscada, y los taladros (VII) para la colocación de los dos ganchos de los muelles cilíndricos de tracción.

A continuación, se presenta el diseño de la base exterior inferior que compone el excitador inercial, con la numeración de los distintos taladros agrupados según su función.

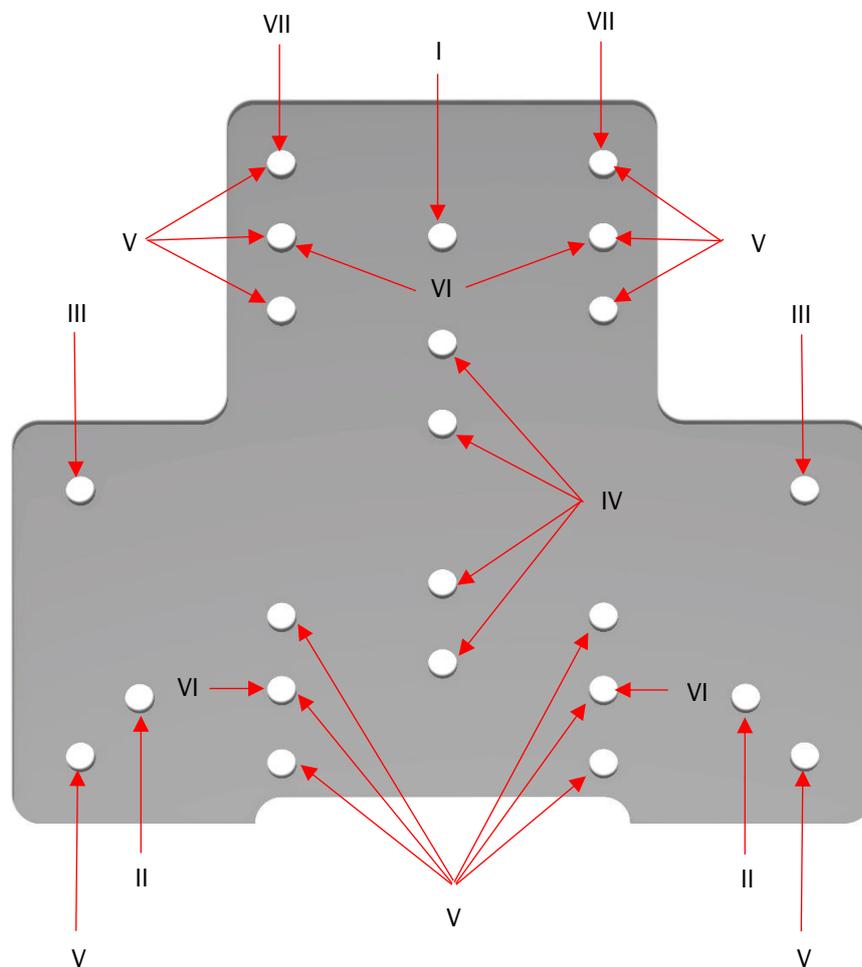


Figura 2.22: Base inferior exterior, desglosada del conjunto excitador inercial.

2.4.1.5. Base interior

La base interior está fabricada del mismo acero que la base exterior y del mismo espesor, 5mm. Ambas bases interiores y exteriores, son idénticas en cuanto a contorno y están soldadas en los distintos laterales que conforman las bases. El contorno de la base interior interior es idéntico a la base inferior exterior para que la unión de ambas forme un solo elemento de montaje, como se puede observar en la Figura 2.23.

El objetivo de la base interior es la de posicionar el vástago (1) y los dos tubos de acero inoxidable (6) sin posibilidad de desplazamiento de ambos componentes, con fijación a la base exterior por medio de tornillos M10. El conjunto estructural que forma el excitador inercial posee una rigidez considerable, dando seguridad en el momento de la ejecución del movimiento.

Los taladros que tiene fabricados están localizados en las mismas ubicaciones y teniendo los mismos objetivos que en el caso de la base exterior, salvo los orificios que ubican el vástago (I) y los tubos de acero inoxidable (II), que tienen un diámetro de 29mm para el vástago y de 31mm para los tubos de acero inoxidable. La razón de incrementar el diámetro en 1mm en dichos taladros, se debe a que es mejor que haya una cierta holgura a la hora de introducir el vástago y los tubos de acero inoxidable, ya que si no hubiera dicha holgura dichos componentes podrían dañarse al encajarlos en sus taladros correspondientes. Otra razón por la que tiene que haber holgura es también debido a la posible dilatación que puede sufrir el vástago y los tubos de acero inoxidable por el rozamiento del movimiento de traslación o por la posibilidad de que el excitador inercial se encuentre en una zona de elevada temperatura ambiental.

Los taladros dispuestos de forma simétrica en la base interior inferior, respecto al eje de simetría de la pieza, tienen un diámetro de 11mm, para la colocación de los tornillos de M10. En este caso, el motivo de ampliar los taladros es para favorecer el paso de los tornillos de M10 que desempeñan las diferentes funciones indicadas en el Epígrafe 2.4.1.4. Se puede observar con más detalle en el Plano 2 del Anexo 7.

En el caso de la base interior superior, los orificios (I) y (II) se siguen utilizando para posicionar el vástago y los dos tubos de acero inoxidable, y los dos taladros (VII), al igual que en el Epígrafe 2.4.1.4 anterior, se emplean para la colocación de los dos ganchos de los muelles cilíndricos de tracción.

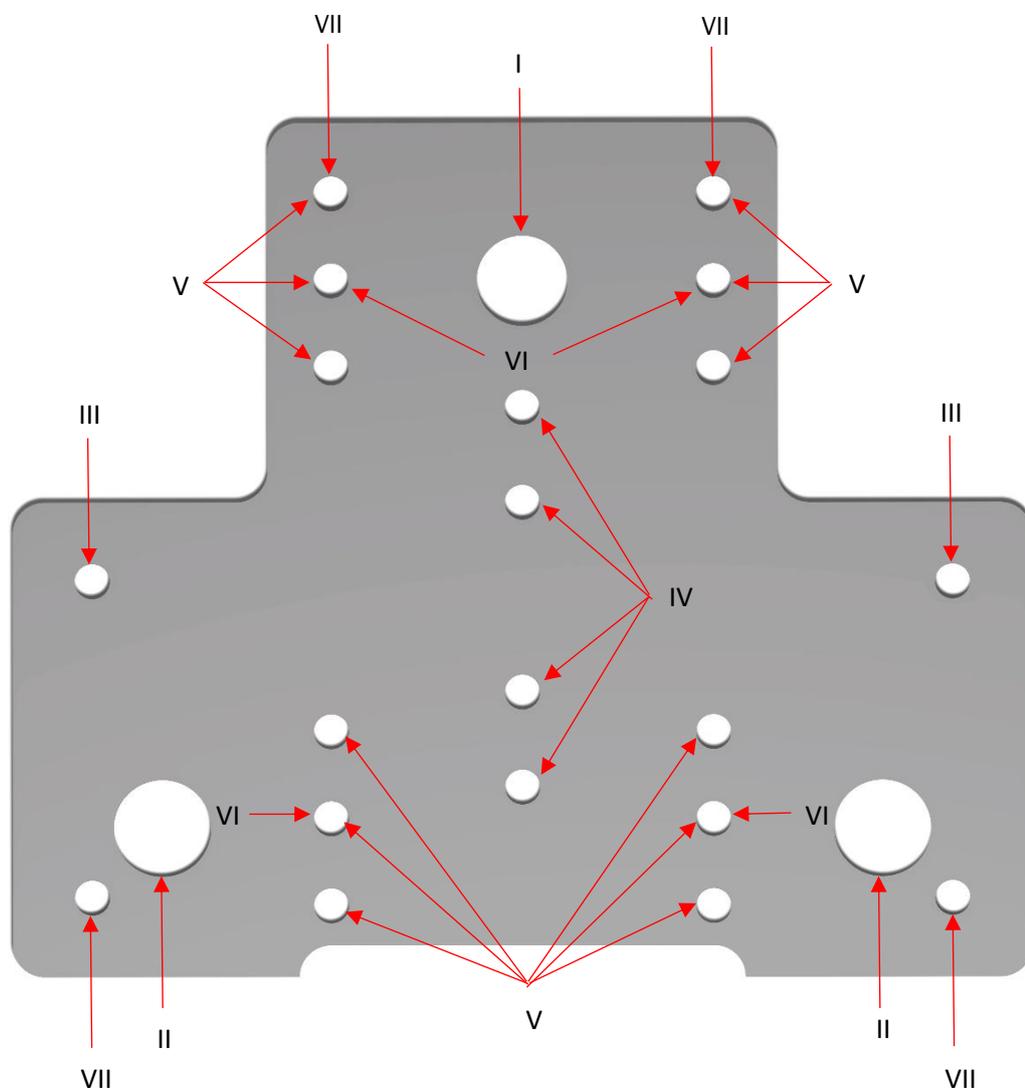


Figura 2.23: Base inferior interior, separada del conjunto excitador inercial.

2.4.1.6. Tubo de acero inoxidable

Los dos tubos que forman el conjunto estructural del excitador inercial están fabricados de acero inoxidable, tienen una longitud de 890mm con un diámetro exterior de 30mm y un espesor de 1.5mm (Figura 2.24).

La función que desempeñan estos dos tubos es la de guiar el movimiento de traslación de todo el excitador inercial, junto con el vástago que también actúa de guía.

El movimiento de traslación que se produce en el excitador inercial, a través de los tubos de acero inoxidable es asistido por los cojinetes de bolas (9 y 13) que se deslizan por la superficie exterior de dichos tubos.

Ambos tubos de acero inoxidable llevan alojados en el interior una varilla roscada de M10, que como se ha explicado brevemente en el Epígrafe 2.4.1.4, van fijadas a las bases exteriores, tanto superior como inferior, por medio de tuercas de M10 junto con arandelas metálicas. La posición de dichos tubos viene determinada por las bases interiores, tal y como se describe en el Epígrafe 2.4.1.5.

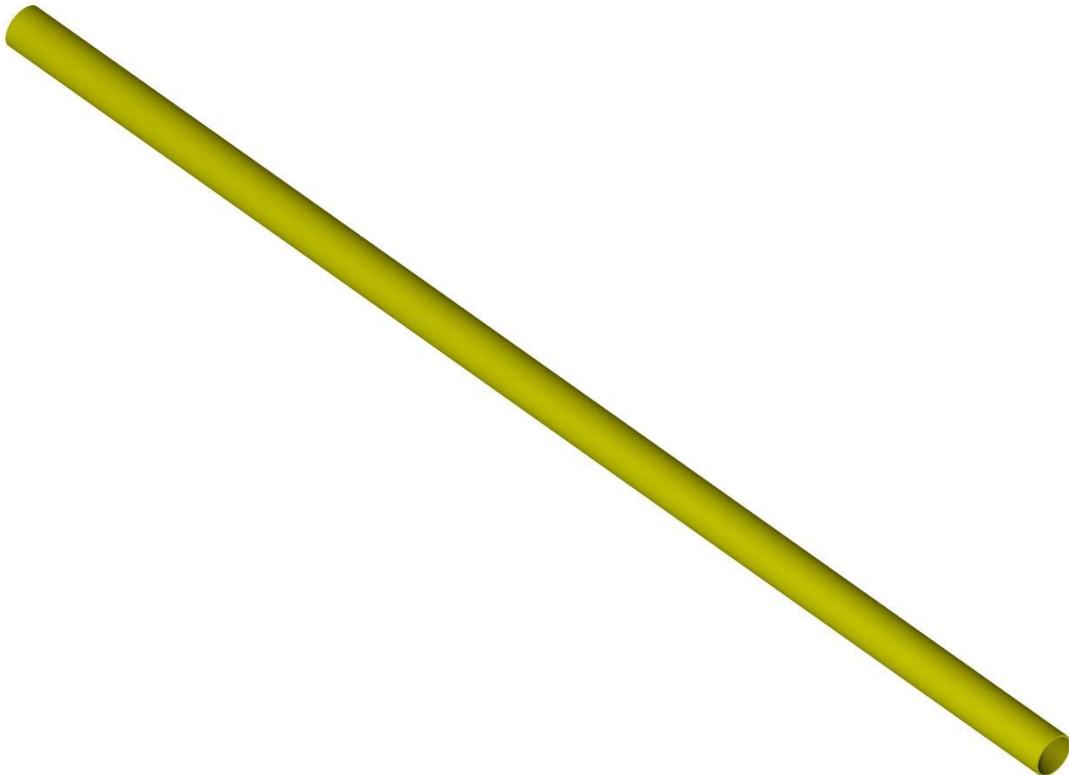


Figura 2.24: Tubo de acero inoxidable, separado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.7. Base intermedia o culata

Las bases intermedias (7), tanto inferior como superior, está fabricada del mismo acero que las bases exteriores (4) e interiores (5), acero S275, y un espesor idéntico de 5mm, para poder resistir el peso de las masas móviles junto con el movimiento de traslación del conjunto móvil. Ambas bases intermedias son fabricadas de manera semejante, en cuanto a contorno superficial y la disposición de los taladros.

El contorno superficial difiere mucho de las bases exteriores e interiores, ya que este componente tiene el objetivo de soportar las masas móviles cuando se efectúe el movimiento de traslación. El diseño del excitador inercial requería que fuese compacto a la hora de disponer y fijar las masas móviles en las bases intermedias lo más centrada posible.

La disposición de los taladros, se han fabricado de esta manera debido a los distintos objetivos que desempeñan cada uno de ellos (Figura 2.25):

- I. Un orificio de 71mm de diámetro para deslizar el estator sin inconveniente a la hora de realizar el montaje del excitador inercial.
- II. Dos orificios de 46mm de diámetro para introducir los rodamientos lineales de bolas cuando se efectúe el montaje.
- III. Cuatro taladros de 11mm de diámetro, cuyo objetivo es permitir el paso de tornillos M10 para poder fijar las masas móviles a la base intermedia.
- IV. Dos taladros de 11mm de diámetro cuyo propósito sería la colocación de dos tubos de diámetro exterior de 30mm de acero inoxidable, con tuercas soldadas a ambos extremos para poder anclar dichos tubos a ambas bases intermedias, y así dar más rigidez a todo el conjunto móvil. Esta posibilidad de diseño entraría como idea futura para mejorar este prototipo de excitador inercial.
- V. Ocho taladros de 7mm de diámetro, cuatro de ellos espaciados a 90° para fijar el soporte intermedio de los cojinetes de bolas (10) a las bases intermedias junto con los cojinetes de bolas (9 y 13), todo ello por medio de tornillos y tuercas de M6.
- VI. Dos taladros de 7mm de diámetro que sirven para colocar dos tornillos y tuercas de M6 a modo de taco para nivelar las masas móviles ancladas en la base intermedia inferior.

Las bases intermedias (7), tanto inferior como superior, van apoyadas sobre la brida del motor lineal y el propio estator, soportando ambos demasiado peso, haciendo que el vástago sufra un posible riesgo por flexión. Por esa misma razón se diseñó el soporte intermedio de los cojinetes de bolas, para dar rigidez a todo el conjunto móvil y que estuviese fijado a las bases intermedias, convirtiéndose en un conjunto móvil lo bastante sólido para soportar el peso de

las masas móviles a la hora de efectuar el movimiento de traslación. Dicho componente será descrito posteriormente en el Epígrafe 2.4.1.10.

En la Figura 2.25, se observa el diseño de la base intermedia para poder apreciar el contorno superficial y el posicionamiento de los orificios y taladros, para una mayor aclaración ver el Plano 3 del Anexo 7:

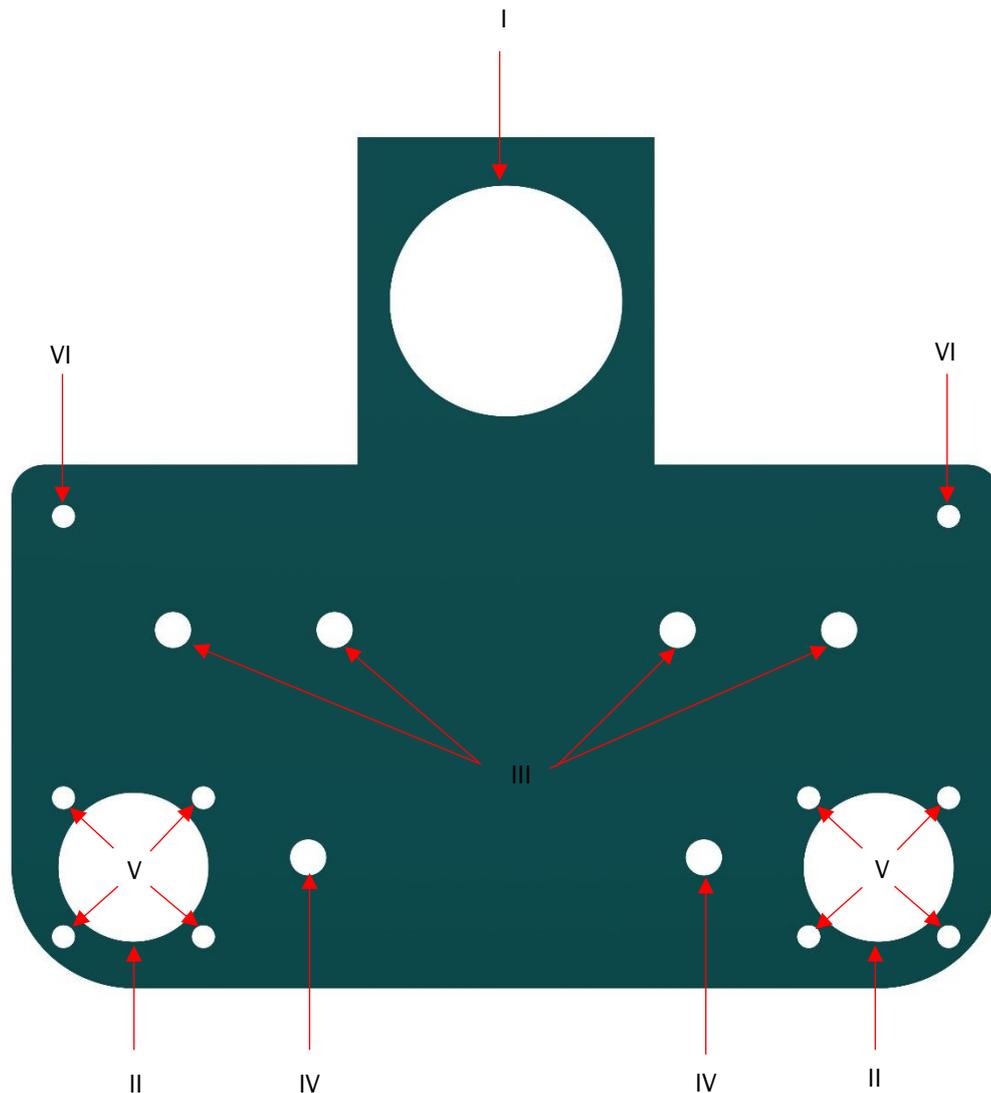


Figura 2.25: Base intermedia, desglosado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.8. Brida base intermedia

Las cuatro bridas (8) que forman parte de las bases intermedias o culatas (7), dos en la base intermedia inferior y dos en la base intermedia superior, son elementos esenciales a la hora de fijar las bases intermedias a la brida del estator (2), dando mayor rigidez al conjunto móvil soportando aún más el peso de las masas móviles y poder efectuar el movimiento de traslación sin que atañe ningún tipo de riesgo a todo el conjunto de excitador inercial.

Las bridas también están fabricadas de acero S275 y de espesor 5mm (Figura 2.26). Dichos elementos se encuentran situados en los laterales del orificio donde se ubica el estator en las bases intermedias, y unidos a la superficie de dichas bases por medio de soldadura. Los taladros que tiene fabricados son de 9mm de diámetros separados a 55mm situados a la misma altura de las canalizaciones de la brida del estator. Para mayor especificación observar el plano 3 del Anexo 7.

La fijación de las bridas de las bases intermedias con la brida que envuelve al motor lineal se hace por medio de tornillos Allen de M8 y tuercas rectangulares de igual métrica introducidas en las canalizaciones de la brida del motor lineal, siendo un total de ocho tornillos Allen y tuercas rectangulares.

La separación entre las bridas debe abarcar todo el ancho de la brida que cubre al motor lineal que son 100mm, pero tiene que haber algo de tolerancia entre ambos componentes para que a la hora de colocar la brida del motor lineal no exista complicación en el montaje y deslice adecuadamente.



Figura 2.26: Brida de una base intermedia o culata, separado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.9. Rodamiento lineal de bolas

Los rodamientos lineales de bolas (9) que dispone el excitador inercial son cuatro en total, dos de ellos anclados a la culata situada en la parte inferior del conjunto móvil y los dos restantes a la culata en la parte superior. El objetivo de estos rodamientos lineales es permitir el deslizamiento a través de los tubos de acero inoxidable de todo el conjunto móvil, gracias a las bolas autoalineantes de acero alojadas en la jaula de plástico instalada en el diámetro interior. La carcasa exterior del rodamiento lineal está fabricada completamente de acero

El rodamiento lineal de bolas tiene un diámetro interior de 30mm dónde va alojado el tubo de acero inoxidable que guía el movimiento lineal del conjunto móvil y un diámetro exterior de 45mm [Ref. Web 14]. Dicho elemento queda anclado y posicionado a la culata por los orificios que lleva fabricados a lo largo de la brida separados de manera radial cada 90°, dónde se introducen los tornillos de M6 (Figura 2.27). La brida que forma parte del rodamiento lineal tiene un diámetro de 74mm y un espesor de 10mm [Ref. Web 14].

Las culatas, como se ha mencionado en el Epígrafe 2.4.1.7, tienen fabricados dos orificios (II) de 46mm dónde se introducen los rodamientos lineales, puesto que se ha mencionado previamente, tienen un diámetro exterior de 45mm quedando correctamente superpuesto junto con los soportes intermedios de rodamientos lineales (10), que también son introducidos en los tubos de acero inoxidable. Este componente se describirá con mayor especificación en el Epígrafe 2.4.1.10.

Hay que mencionar que los rodamientos lineales aparte de estar anclados a las bases intermedias también están anclados al soporte intermedio, también por medio de tornillos y tuercas de M6. Dichos tornillos atraviesan las bases intermedias y la base del soporte intermedio para finalmente asegurar la unión mediante la tuerca correspondiente. Hay un total de dieciséis tornillos y tuercas de M6 que fijan los cojinetes de bolas.

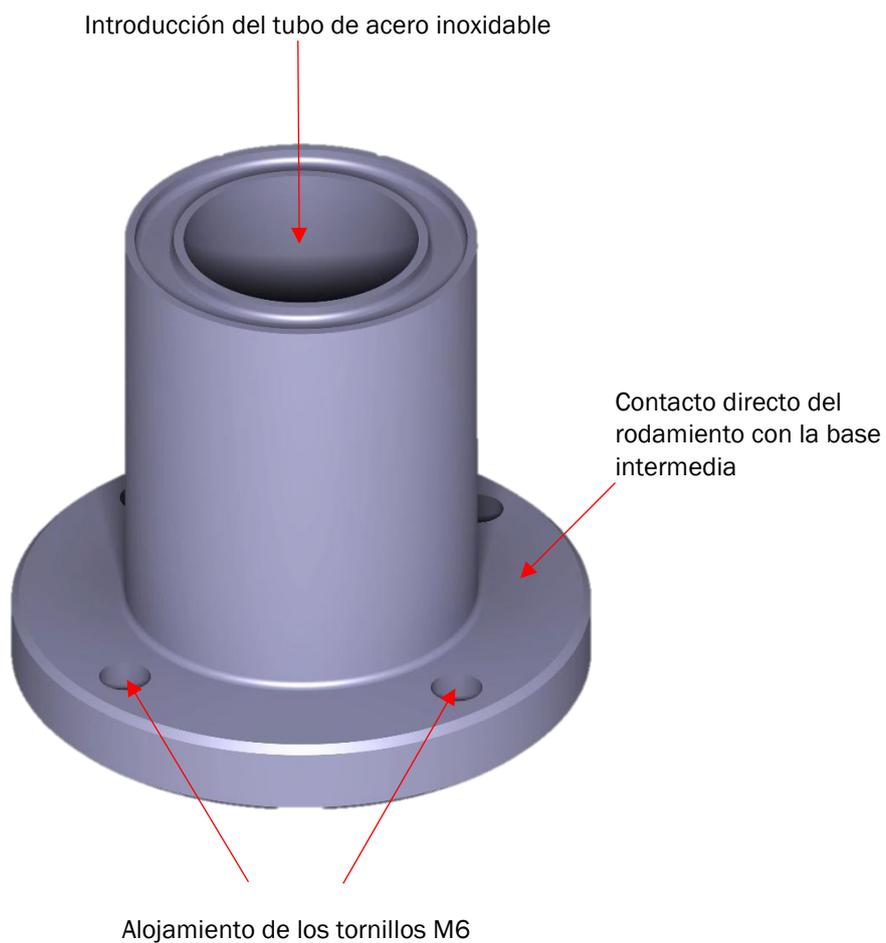


Figura 2.27: Rodamiento lineal de bolas, desacoplado del conjunto excitador inercial.

2.4.1.10. Soporte intermedio de los rodamientos lineales de bolas

El excitador inercial posee dos soportes intermedios (10) que se encuentran atornillados a las dos bases intermedias (7) y a los rodamientos lineales de bolas (9), mediante los tornillos de M6 que son introducidos en los taladros de los rodamientos, como se ha mencionado en el Epígrafe 2.4.1.9.

Este componente tiene la función de dar rigidez al conjunto móvil, impidiendo que recaiga demasiado peso sobre la brida del motor lineal (2) y que las bases intermedias junto con los tubos de acero inoxidable (6) que funcionan de guías no flexionen, haciendo que el movimiento de traslación del conjunto móvil sea completamente lineal.

El soporte intermedio de los rodamientos está compuesto por un tubo de acero inoxidable de 420mm de longitud, que tiene un diámetro exterior de 50mm y diámetro interior de 46mm. Dicho tubo lleva soldado a ambos extremos dos bridas fabricadas de acero S275, de igual diámetro exterior que el propio rodamiento, 76mm, y un diámetro interior igual que el tubo de acero inoxidable mencionado previamente, 46mm, teniendo un espesor ambas bridas de 5mm. En el contorno superficial de dichas bridas hay cuatro taladros de 7mm dispuestos, cada uno de ellos, a 90° (Figura 2.28). Para mayor aclaración observar el Plano 4 del Anexo 7. Las bridas han de colocarse idénticamente en el momento de realizar los puntos de soldadura para la unión con el tubo de acero inoxidable, esto quiere decir que los centros de los taladros de cada brida deben coincidir de manera homóloga con los centros de los taladros de la brida colocada al otro extremo del tubo.

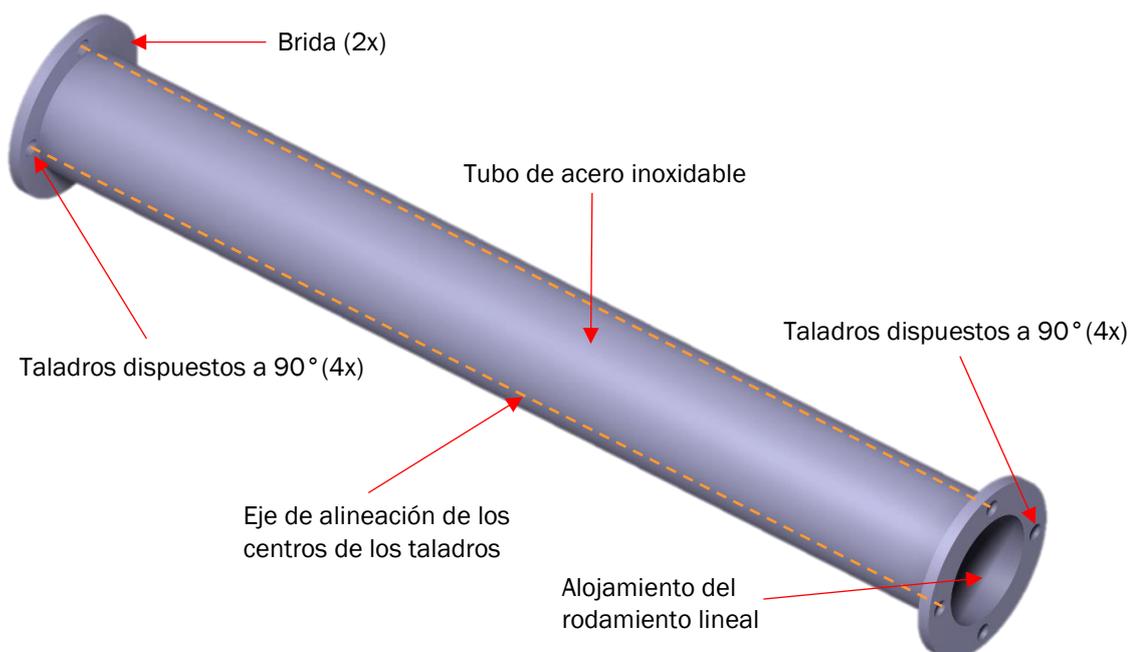


Figura 2.28: Soporte intermedio de los rodamientos lineales, desglosado del excitador inercial.

2.4.1.11. Varilla roscada

El excitador inercial precisa de un conjunto estructural resistente cuando se vaya a poner en marcha el movimiento de traslación. Todo el montaje del conjunto estructural que se realiza para dar rigidez a todo el excitador inercial necesita de tornillería para una mayor firmeza.

En nuestro caso, tenemos un inconveniente a la hora de fijar los tubos de acero inoxidable (6) a las bases exteriores (4), ya que en este diseño final no tienen roscas soldadas en ambos extremos de dichos tubos. Por tanto, se utiliza varillas roscada de M10x930 (11) que se encuentran situadas por el interior de los tubos de acero inoxidable para finalmente anclarse a las bases exteriores, tanto superior como inferior, mediante arandelas y tuercas de M10 (Figura 2.29). Además, el conjunto móvil que acompaña el movimiento de traslación que produce el motor lineal, no se verá perjudicado ya que los tubos de acero inoxidable tienen elevada dureza. Junto al posicionamiento que brindan las bases interiores este tipo de anclaje garantiza una gran consistencia al conjunto estructural del excitador inercial.

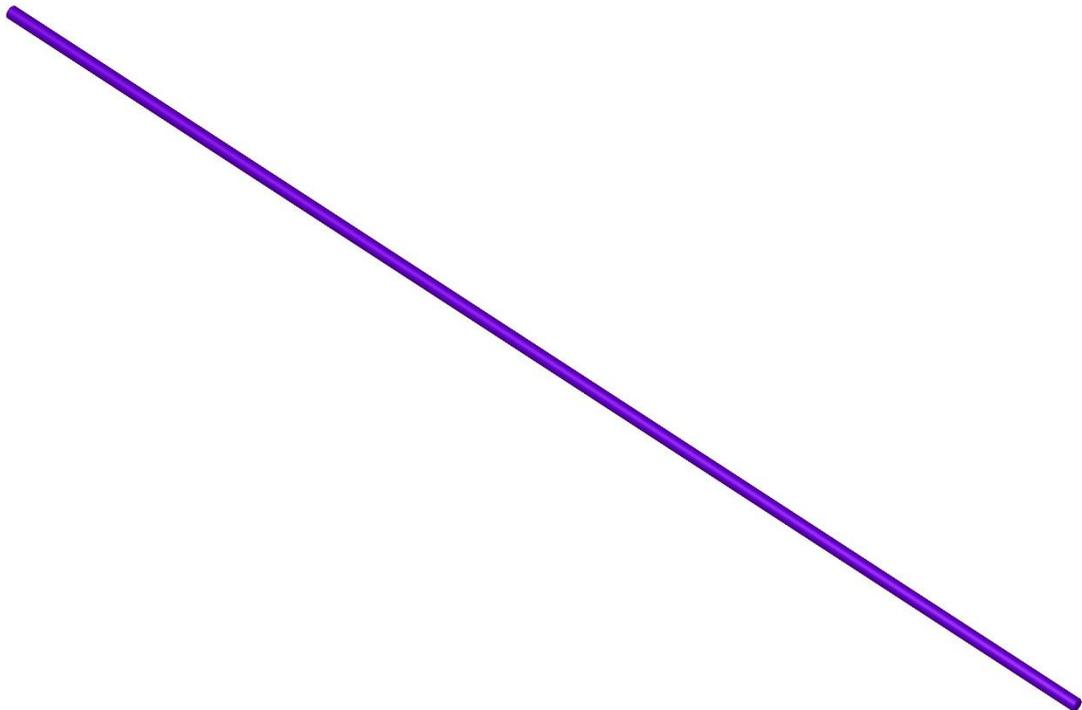


Figura 2.29: Varilla roscada de M10, desglosado del excitador inercial.

2.4.1.12. Soporte angular

El soporte angular que hemos dispuesto en el excitador inercial se trata de una chapa de acero zincado que ha sido plegada en su fabricación adoptando el diseño que se puede observar en la Figura 2.30. Las dimensiones de los soportes angulares son de 43x43x30mm [Ref. Web 17].

El objetivo del soporte angular es servir de fijación en la brida del motor lineal (2) para, posteriormente, llevar a cabo la colocación del muelle (13) en uno de sus orificios.

El excitador inercial dispone de dos soportes angulares fijados en las canalizaciones a ambos lados de la brida del motor lineal, por medio de tornillos y tuercas rectangulares de M8.

Las canalizaciones de la brida del motor lineal permiten regular la altura a la cual fijar los soportes angulares, lo cual hace que el pretensado del muelle pueda ajustarse para mantener el conjunto móvil en la posición central para cada masa móvil que se disponga.

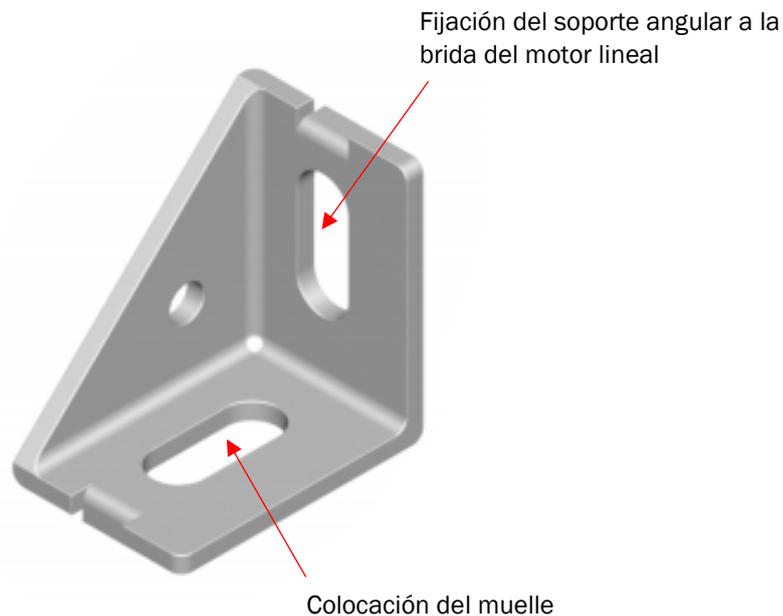


Figura 2.30: Soporte angular [Ref. Web 17], desacoplado del excitador inercial.

2.4.1.13. Muelle cilíndrico de tracción

Como se ha mencionado en el epígrafe anterior, conviene que en reposo (motor apagado) la masa móvil esté más o menos ubicada en la posición central. Para ello se disponen dos muelles entre la base superior y el soporte angular regulable. Además, cuando el excitador inercial se encuentre desconectado impedirá que el conjunto móvil caiga a plomo e impacte contra la base inferior.

El muelle cilíndrico tiene un diámetro exterior de 30mm y una longitud inicial total de 200mm. El alambre que lo forma está fabricado de acero para muelles F141 de 3,3mm de diámetro (Figura 2.31).

Los dos muelles se colocan a ambos lados de la brida del motor lineal (2), un gancho se introduce en el soporte angular (12) y a continuación, el gancho del otro extremo se inserta en el orificio (VII) de la base exterior (4) y de la base interior (5) de la Figura 2.22 y 2.23.

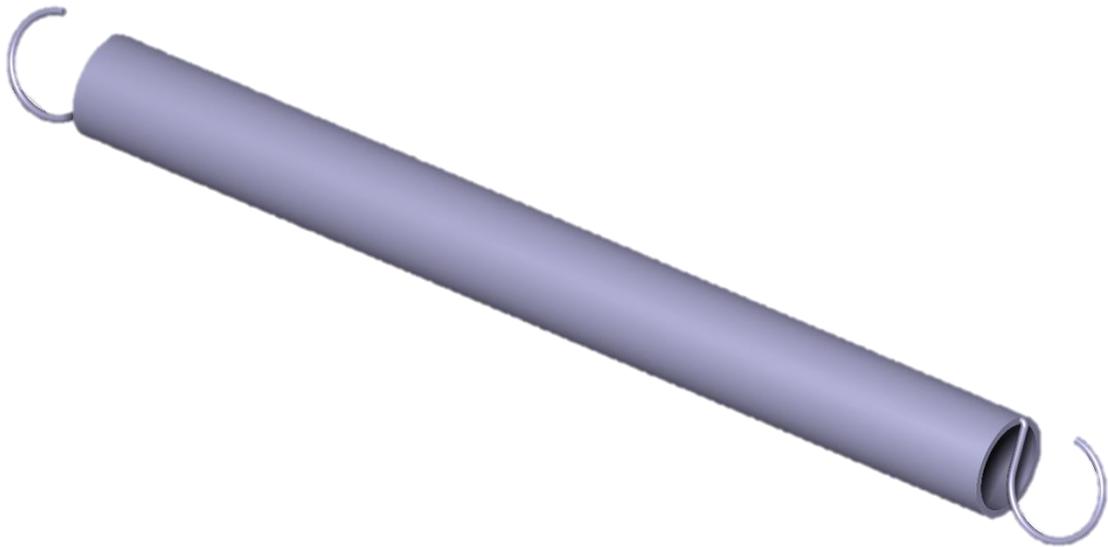


Figura 2.31: Muelle cilíndrico de tracción, desglosado del excitador inercial.



3. Fabricación y montaje de componentes del excitador inercial

En este epígrafe se muestran cuáles han sido los métodos de fabricación de los distintos elementos que componen el excitador inercial.

3.1. Fabricación de componentes del excitador inercial

3.1.1. Bases exteriores e interiores

En primer lugar, las bases exteriores e interiores son fabricadas mediante corte por láser, que traza el contorno de las piezas y los propios taladros, con un acabado superficial de elevada precisión.

A continuación, para que las bases exteriores e interiores formen un solo componente, se sueldan ambas piezas por el contorno por medio de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) [Ref. Lib. 1 y Web 15]. Este tipo de soldadura produce uniones más fuertes, más dúctiles y resistentes a la corrosión, en casi cualquier metal, en cualquier posición y en casi cualquier espesor de chapa, placa o tubo [Ref. Lib. 2]. Como se puede observar en las imágenes, la soldadura TIG logra cordones de soldadura homogéneos con un acabado completamente liso y limpio, ya que no deja escoria y no es necesario una limpieza posterior, tal como sucede en la mayoría de los otros procesos de soldadura [Ref. Lib. 2]. La varilla de aportación para la soldadura TIG que se ha realizado, también es de acero al carbono debido a que la varilla de aportación tiene que ser lo más parecido al material base [Ref. Web 16].

Previamente, la base exterior e interior son unidas mediante tornillos y tuercas de M10, para una mayor firmeza a la hora de realizar los cordones de soldadura a lo largo de las paredes laterales de ambas piezas (Figura 3.1, 3.2 y 3.3).



Figura 3.1: Unión de las bases, exterior e interior, mediante soldadura TIG.



Figura 3.2: Soldadura de las bases, externa e interna, en las caras laterales por medio de soldadura TIG.



Figura 3.3: Soldadura TIG en las caras laterales de las bases, exterior e interior, con varilla de aportación.

Finalmente, el resultado que se obtiene de realizar la unión de la base, exterior e interior, tanto de la parte inferior como la superior, que componen el excitador inercial es el siguiente (Figura 3.4 y 3.5):

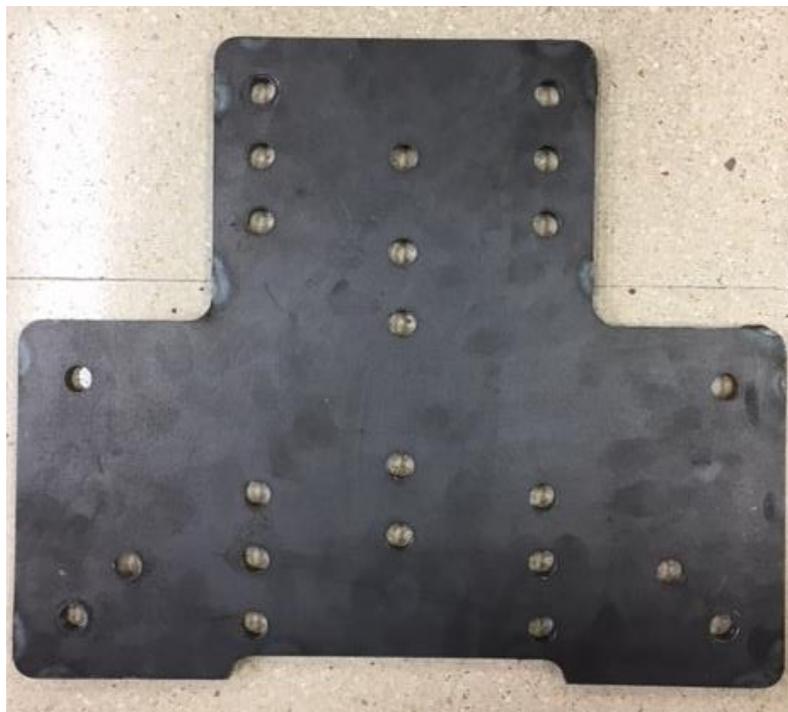


Figura 3.4: Vista de la base exterior, una vez realizada la soldadura.

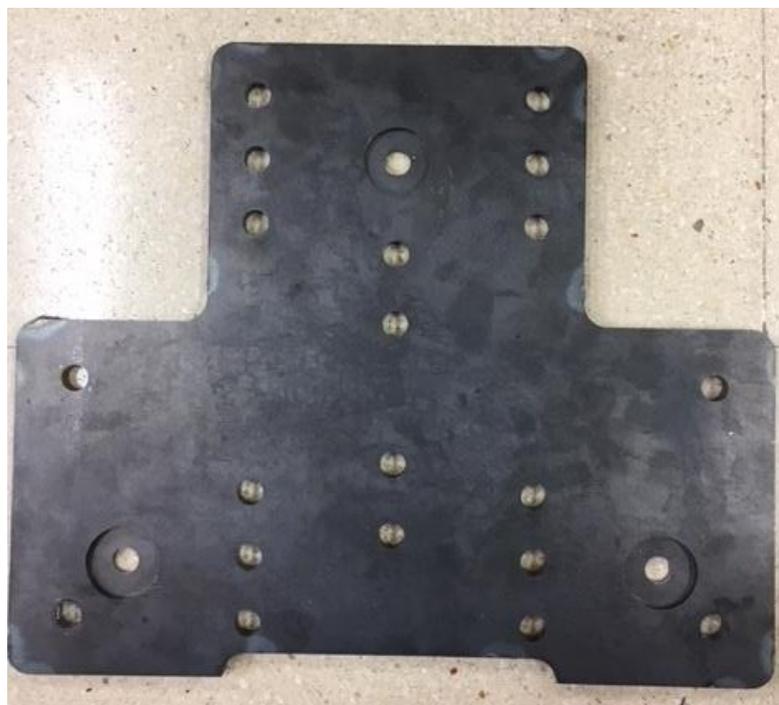


Figura 3.5: Vista de la base interior, una vez realizada la soldadura.

3.1.2. Base intermedia o culata

En este componente se efectuará la unión de la placa intermedia junto a las dos bridas, que sirven de sujeción a la brida del estator, a ambos lados del orificio dónde se posiciona e introduce el estator. La unión de dichos elementos forma la base intermedia o culata del excitador inercial.

Primeramente, se realiza una limpieza con una radial de las zonas donde se originará el cordón de soldadura. Dicha limpieza tiene el objetivo de retirar la capa superficial, tanto de la placa intermedia como de las bridas, en las zonas donde se ejecutará la soldadura para que la fusión sea lo más limpia posible y el cordón de soldadura no tenga ningún tipo de defecto debido a impurezas (Figura 3.6, 3.7 y 3.8).



Figura 3.6: Limpieza de las zonas dónde se desarrollará el cordón de soldadura en las placas intermedias.



Figura 3.7: Limpieza de las cuatro zonas de las placas intermedias donde se efectuará la soldadura TIG.



Figura 3.8: Limpieza de las dos zonas a ambos lados de la brida donde se realizará la soldadura TIG.

A continuación, se procede a ejecutar dos puntos de soldadura para poder fijar la brida, de manera momentánea, para después proseguir con la elaboración del cordón de soldadura en los dos lados de la brida.

La brida tiene que posicionarse perpendicularmente a la placa intermedia, y para ello, se utilizó un bloque de acero a modo de escuadra para asegurar tanto la perpendicularidad como la posición de la brida al límite del borde de la placa intermedia (Figura 3.9 y 3.10).



Figura 3.9: Realización del primer punto de soldadura de la primera brida al borde de la placa intermedia.



Figura 3.10: Realización del segundo punto de soldadura de la segunda brida, al otro extremo del borde de la placa intermedia.

Una vez fijada la brida, seguidamente se procede a soldar la brida a la placa intermedia en las dos zonas del mismo lateral. La soldadura se realiza a ambos lados de la brida, por la parte interior y exterior, para dar firmeza a la unión de los dos elementos (Figura 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14).

Las posiciones de soldadura se intentaron buscar de la manera más ergonómica posible, para poder ejecutar la unión sin ningún tipo de defecto para el cordón de soldadura y que se realice de manera cómoda [Ref. Lib. 2]. Para ello, se utiliza una mesa de soldadura, que permite fijar cualquier posición de la pieza a soldar.



Figura 3.11: Soldadura de la primera brida por la parte interna. Primer cordón de soldadura.



Figura 3.12: Soldadura de la primera brida por la parte interior. Segundo cordón de soldadura.



Figura 3.13: Soldadura de la primera brida por la parte externa. Primer cordón de soldadura.

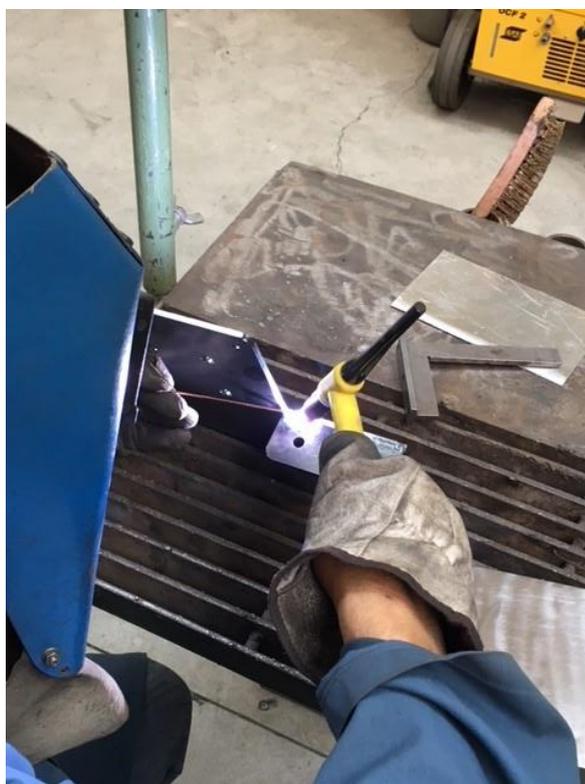


Figura 3.14: Soldadura de la primera brida por la parte externa. Segundo cordón de soldadura.

Una vez efectuado la unión de una de las bridas, se procede con la siguiente brida que se encuentra ubicada al otro lado del orificio donde se introduce el estator. El proceso de soldeo de esta segunda brida es idéntico a como se ha explicado previamente y como se puede apreciar en las siguientes imágenes (Figura 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20).



Figura 3.15: Ejecución del primer punto de soldadura de la segunda brida al borde de la placa intermedia.

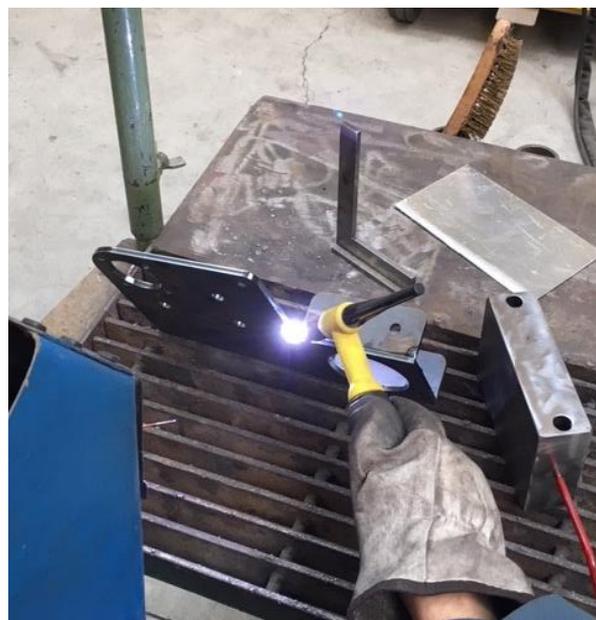


Figura 3.16: Ejecución del segundo punto de soldadura al otro extremo de la segunda brida al borde de la placa intermedia.



Figura 3.17: Soldadura de la segunda brida por la parte interior. Primer cordón de soldadura.

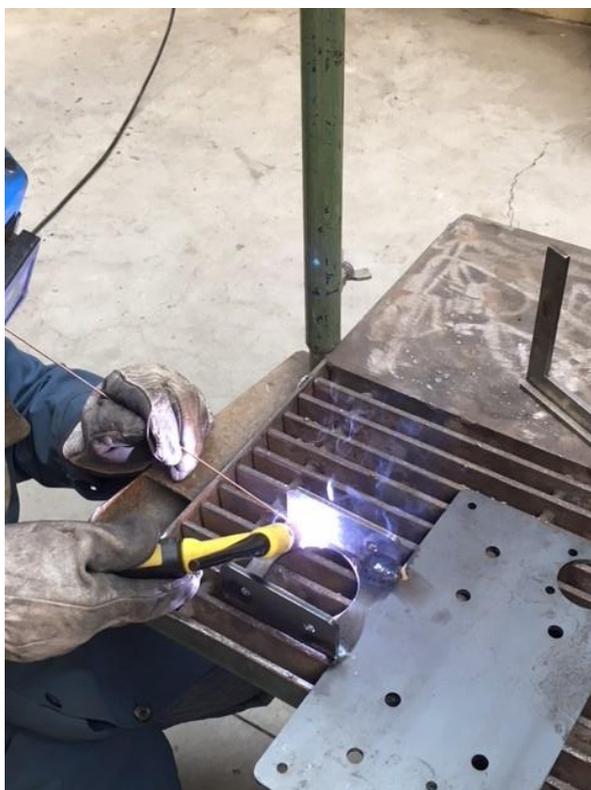


Figura 3.18: Soldadura de la segunda brida por la parte interior. Segundo cordón de soldadura.



Figura 3.19: Soldadura de la segunda brida por la parte externa. Primer cordón de soldadura.

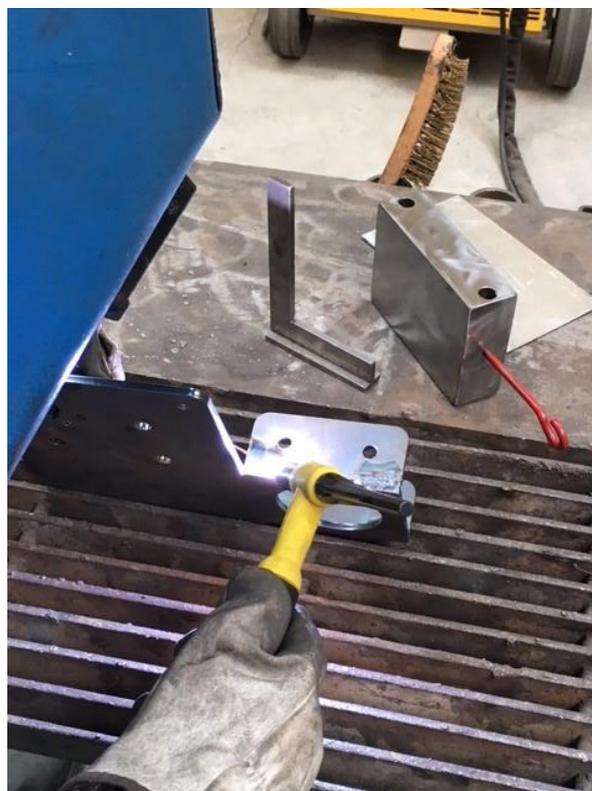


Figura 3.20: Soldadura de la segunda brida por la parte externa. Segundo cordón de soldadura.

Una vez finalizado el proceso de soldadura de las bridas en la primera placa intermedia, pasamos a realizar el mismo proceso de fabricación de la otra culata con la limpieza de las placas intermedias y la soldadura de las bridas.

Finalmente, el resultado obtenido después de todo el proceso de fabricación que se ha detallado previamente es el mostrado a continuación (Figura 3.21):



Figura 3.21: Finalización del proceso de fabricación de la culata.

3.1.3. Soporte intermedio de los rodamientos lineales de bolas

El siguiente componente que se va a llevar a preparar es el soporte intermedio que va a conseguir la rigidez de todo el conjunto móvil, permitiendo la fijación de los rodamientos junto con las bases intermedias. A continuación, se muestra todo el proceso de fabricación realizado.

Primeramente, se cortan los tubos de 50mm de diámetro de acero a una longitud de 420mm a través de una sierra de cinta. El proceso de corte se realiza de manera rápida y efectiva, evitando que se recaliente la sierra de cinta mediante taladrina (Figura 3.22).



Figura 3.22: Corte de los tubos de 50mm de diámetro.

Una vez realizado el proceso de corte, se continua con la limpieza a ambos extremos de los tubos mediante una amoladora angular o radial. El motivo de dicha limpieza, como se ha mencionado en el Epígrafe 3.1.2, es para garantizar un proceso de soldadura adecuado, sin ningún tipo de imperfección que suponga un riesgo para el cordón de soldadura (Figura 3.23 y 3.24).



Figura 3.23: Limpieza de los tubos de 50mm en ambos extremos, mediante radial.



Figura 3.24: Resultado de la limpieza de un extremo del tubo de 50mm.

A continuación, se procede a la limpieza superficial de las bridas, únicamente en la zona donde se va a realizar el proceso de soldadura (Figura 3.25).



Figura 3.25: Limpieza superficial de la brida.

Posteriormente, con los componentes libres de impurezas en su superficie, procedemos a la unión de dichos componentes mediante soldadura TIG. Para el proceso de soldadura, previamente hemos dado un punto de soldadura a cada extremo del tubo sin tener acoplada las bridas, como se puede apreciar en la Figura 3.26. La razón de dicha operación es debido a que se produjeron problemas de conductividad para realizar la soldadura entre ambos componentes. Con dichos puntos de soldadura se consigue que haya material conductor que favorece el arco eléctrico entre el electrodo de tungsteno y las piezas a soldar.

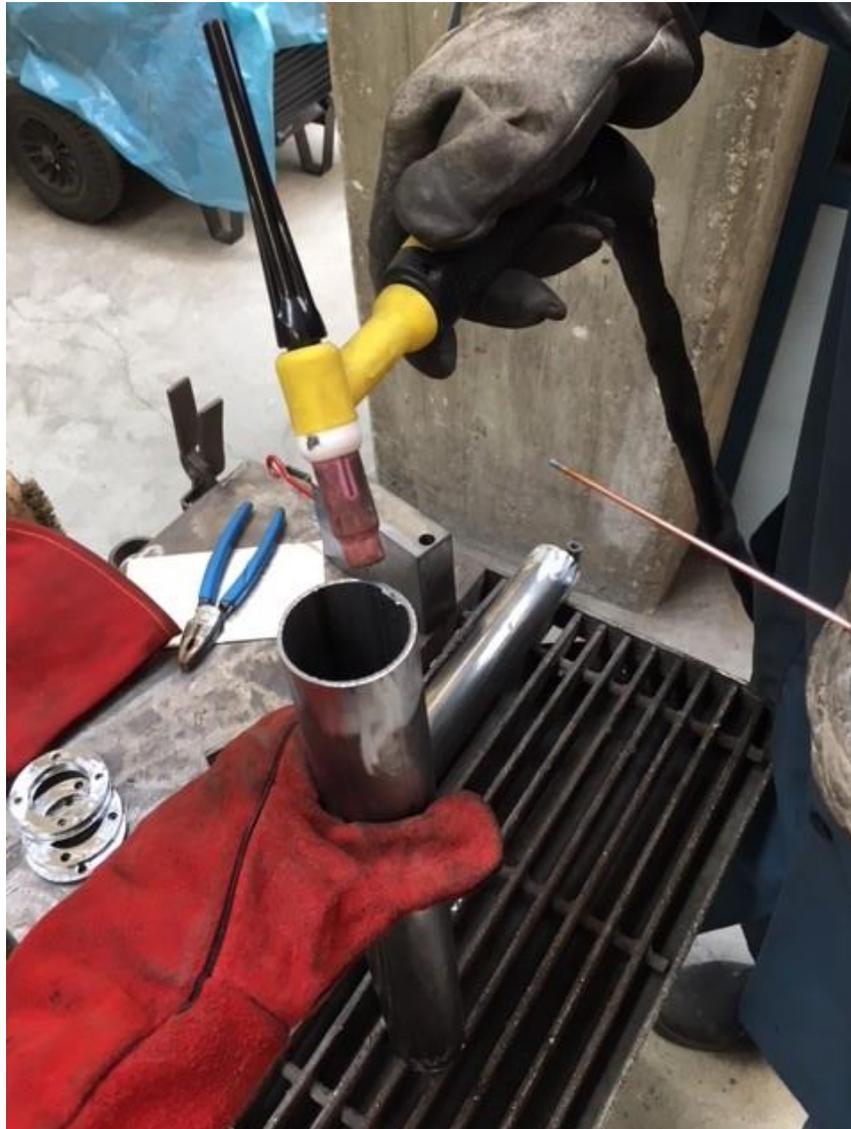


Figura 3.26: Aportación de material conductor en un extremo del tubo de acero.

Seguidamente se realizan los puntos de soldadura entre el tubo de acero inoxidable y las bridas en un extremo del tubo, para poder tener una fijación de ambos componentes a la hora de efectuar el cordón de soldadura. Se realizan dos puntos de soldadura en ambos lados del tubo de acero (Figura 3.27). Dichos puntos no se pueden efectuar en las proximidades de los taladros posicionados en las bridas, debido a que podría alojarse material en dichos taladros, impidiendo el paso de los tornillos de M6 que fijan los rodamientos lineales con dicho soporte intermedio.



Figura 3.27: Ejecución del primer punto de soldadura en un extremo del tubo, entre el tubo y la brida.

Este proceso se repite de manera idéntica en un solo extremo del tubo, en el segundo tubo de acero junto a la brida (Figura 3.28).



Figura 3.28: Ejecución del segundo punto de soldadura en un extremo del tubo, entre el tubo y la brida.

Finalizado el proceso de fijación de ambos componentes, se comienza con el cordón de soldadura ubicado en la unión del tubo de acero y la brida. Los cordones de soldadura se realizan en los huecos entre los taladros de la brida, por lo tanto, en este proceso se hacen cuatro cordones de soldadura a lo largo de la superficie de la brida con un seguimiento circular de la antorcha que contiene el electrodo de tungsteno (Figura 3.29).

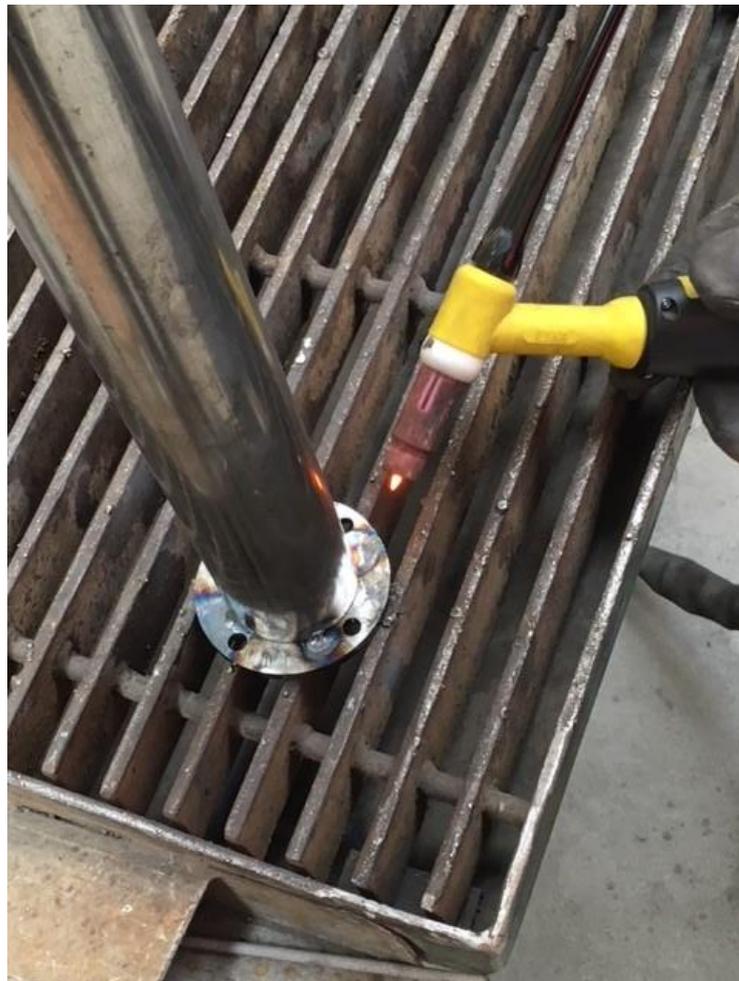


Figura 3.29: Realización del cordón de soldadura en la unión del tubo de acero inoxidable y la brida.

Una vez soldadas las dos bridas a los dos tubos de acero, se tiene que comprobar la perpendicularidad entre el contorno de los tubos de acero y las bridas. Dicha comprobación tiene bastante importancia, debido a que el soporte intermedio de los rodamientos lineales va apoyado sobre la culata, y es por ello que las bridas que componen el soporte intermedio tengan un paralelismo horizontal con respecto a la superficie de la culata. Esto también influye en el momento que se vayan a introducir los tornillos de M6 ya que, si la brida se encuentra con un cierto desnivel con respecto a la culata, dichos tornillos colisionarían con la brida y no pasarían por los taladros para poder ser

fijados mediante las tuercas de M6. Los utensilios utilizados en dicha operación son, una escuadra de acero que comprueba la perpendicularidad de los dos componentes, y una varilla rectangular de metacrilato totalmente horizontal que verifica el paralelismo de la brida junto con la escuadra de acero, con esto se comprueba que la brida se encuentra completamente horizontal (Figura 3.30).



Figura 3.30: Comprobación de la perpendicularidad del tubo de acero inoxidable con la brida.

Las dos bridas se encuentran en este momento, cada una fijada a un lado de cada tubo de acero inoxidable.

La siguiente operación que se va a implementar es el posicionamiento de las bridas. Como se mencionó anteriormente en el Epígrafe 2.4.1.10 los centros de los cuatro taladros, dispuestos en cada brida, deben permanecer cada uno de ellos en un mismo eje de alineación. Esto permite que las bridas estén colocadas en una misma posición.

En esta operación se ha ideado un utillaje que nos permite posicionar las bridas que no han sido soldadas aún, manteniendo la alineación de los centros de los taladros. Dicho utillaje consiste en una chapa fina de aluminio, en la se marca con un punzón dos líneas perpendiculares entre sí. Con un compás de puntas se traza una circunferencia de 30mm de diámetro. La intersección de las líneas con la propia circunferencia sitúa los centros de los taladros de las bridas. Por medio del punzón y un martillo marcamos aún más las intersecciones para que quede más visible la ubicación de los centros (Figura 3.31).



Figura 3.31: Utillaje que permite el posicionamiento de las bridas.

La fijación de la primera brida, soldada a un extremo del tubo de acero inoxidable, nos sirve de referencia para el posicionamiento de los taladros y la soldadura de la siguiente brida situada al otro extremo del tubo.

Con la ayuda de dos varillas cilíndricas introducidas por los taladros de la brida ya soldada y la chapa diseñada previamente, se sitúan los taladros de la brida a soldar en los puntos marcados en la chapa (Figura 3.32).

Esta operación se realiza en las dos bridas restantes y con asistencia de un ayudante.



Figura 3.32: Posicionamiento de la brida, al otro extremo del tubo de acero de 50mm.

Después del posicionamiento de la brida, se procede a soldar dos puntos de soldadura a ambos extremos de la unión del tubo de acero y la brida, para tener una primera fijación de ambos componentes (Figura 3.33 y 3.34).



Figura 3.33: Ejecución del primer punto de soldadura en la unión del tubo de acero con la brida.

Con las bridas fijadas, se continua con la elaboración del cordón de soldadura en la unión del tubo de acero con la brida (Figura 3.35).



Figura 3.34: Ejecución del segundo punto de soldadura en la unión del tubo de acero con la brida.



Figura 3.35: Realización del cordón de soldadura en la unión del tubo de acero con la brida.



Finalizado el proceso de soldadura, se daría por completado todo el proceso de fabricación de los distintos componentes del excitador inercial necesarios para un buen funcionamiento de este y a su vez aportando rigidez en los componentes. Al final, los métodos utilizados en la fabricación de los componentes del excitador inercial han resultado ser eficaces y seguros, gracias a la ayuda del maestro de taller Juan Mansilla.

3.2. Montaje del excitador inercial

Primeramente, se tiene el estator desacoplado de la brida para poder introducir una de las culatas a través del orificio de 70.5mm de diámetro. Se debe tener especial precaución de no rallar la superficie del estator a la hora introducir la culata, ya que podría suponer un mal funcionamiento del bobinado que está alojado en el interior del estator. También, hay que establecer un margen entre la culata y los dos conectores del sensor de posición y alimentación, para que no choquen los cables con la propia culata cuando se inicie el movimiento de traslación del conjunto móvil (Figura 3.36).

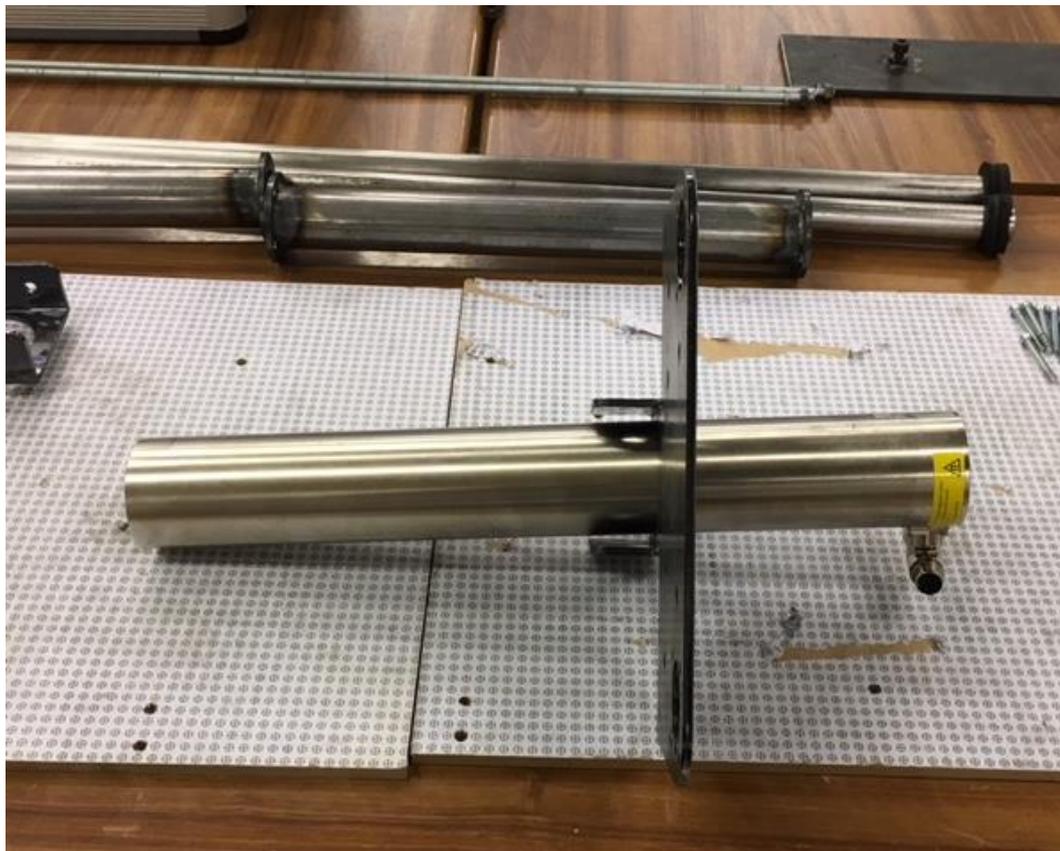


Figura 3.36: Introducción de la culata en el estator.

Se sitúa la culata próxima a los conectores para poder colocar la brida del motor lineal, debido a que ocupa prácticamente toda la superficie del estator (Figura 3.37).

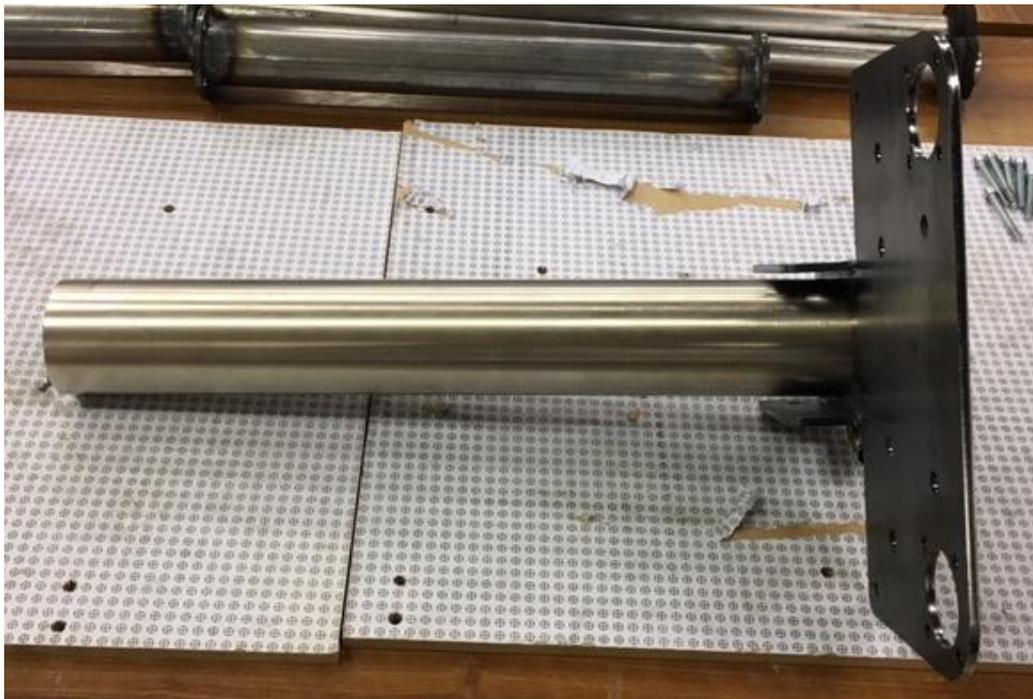


Figura 3.37: Colocación de la culata próxima a los conectores del estator.

A continuación, se acopla la brida del motor lineal en el estator (Figura 3.38) hasta la culata quedando ajustada entre las dos bridas de la culata, pero sin fijar ambos componentes ya que antes se tienen que posicionar a lo largo del estator. Con dicho posicionamiento tratamos de buscar el mejor espaciado entre los conectores y la unión de la brida del motor lineal con la culata. Para esta operación se ha necesitado de una maza de goma para poder introducir la brida del motor lineal entre las bridas de la culata, sin que resulte dañada la superficie de dicha componente (Figura 3.39).

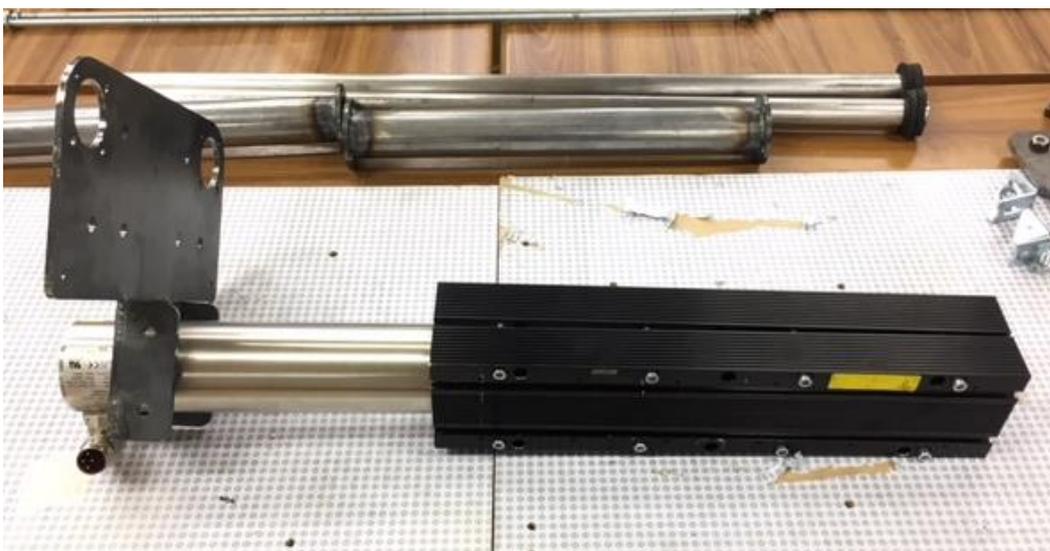


Figura 3.38: Introducción de la brida del motor lineal.

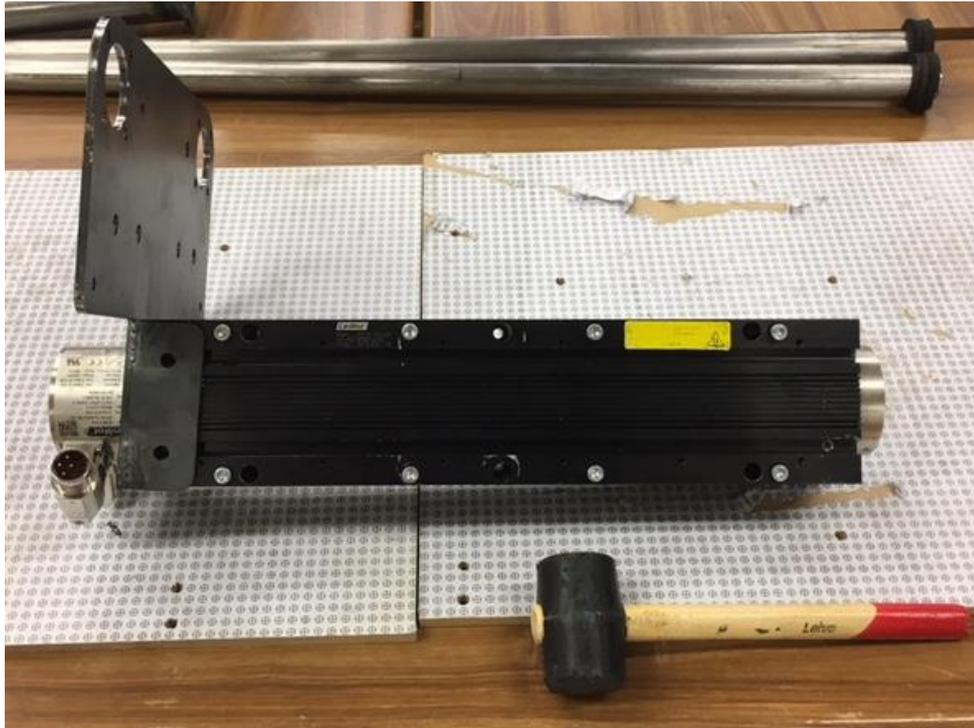


Figura 3.39: Acoplamiento de la brida del motor lineal en la culata, ajustándose entre las dos bridas de la culata.

Una vez realizado el posicionamiento de la culata junto con la brida del motor lineal, se procede a la fijación de la brida del motor al estator mediante ocho tornillos de M6x45 [Ref. Web 11] (Figura 3.40).

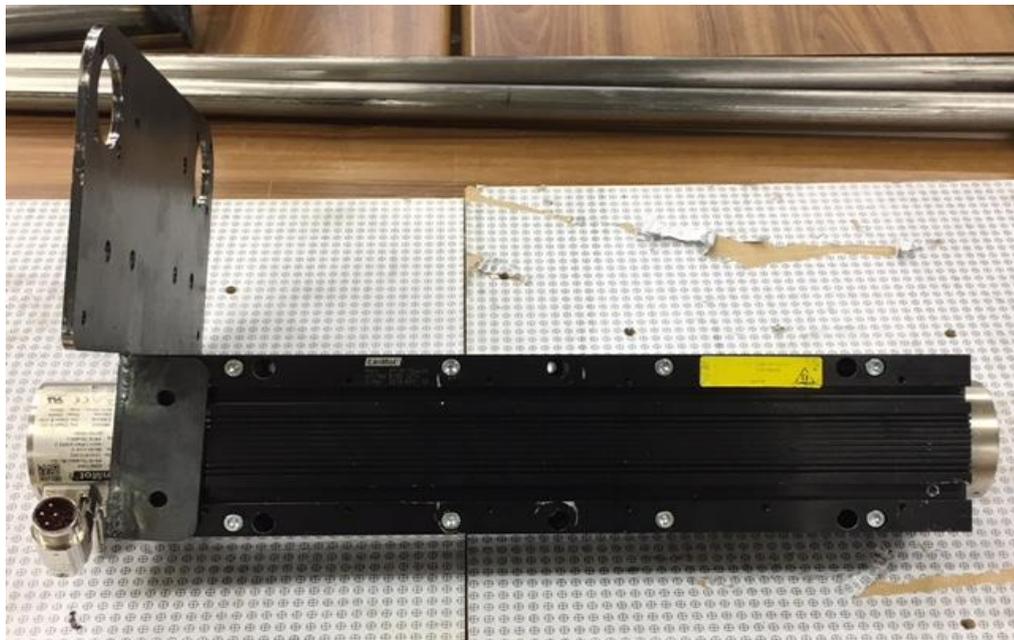


Figura 3.40: Fijación de la brida del motor lineal.

Se continua con la unión de la culata a la brida del motor lineal, mediante cuatro tornillos y tuercas rectangulares de M8, junto con arandelas. Dos tornillos se introducen en los taladros de la brida, a ambos lados de la culata (arriba y abajo Figura 3.41). Las dos tuercas rectangulares correspondientes se alojan en las canalizaciones de la brida, pudiendo desplazarse dentro de ellas hasta la posición de los tornillos. La culata fijada se sitúa en la parte superior del conjunto móvil.

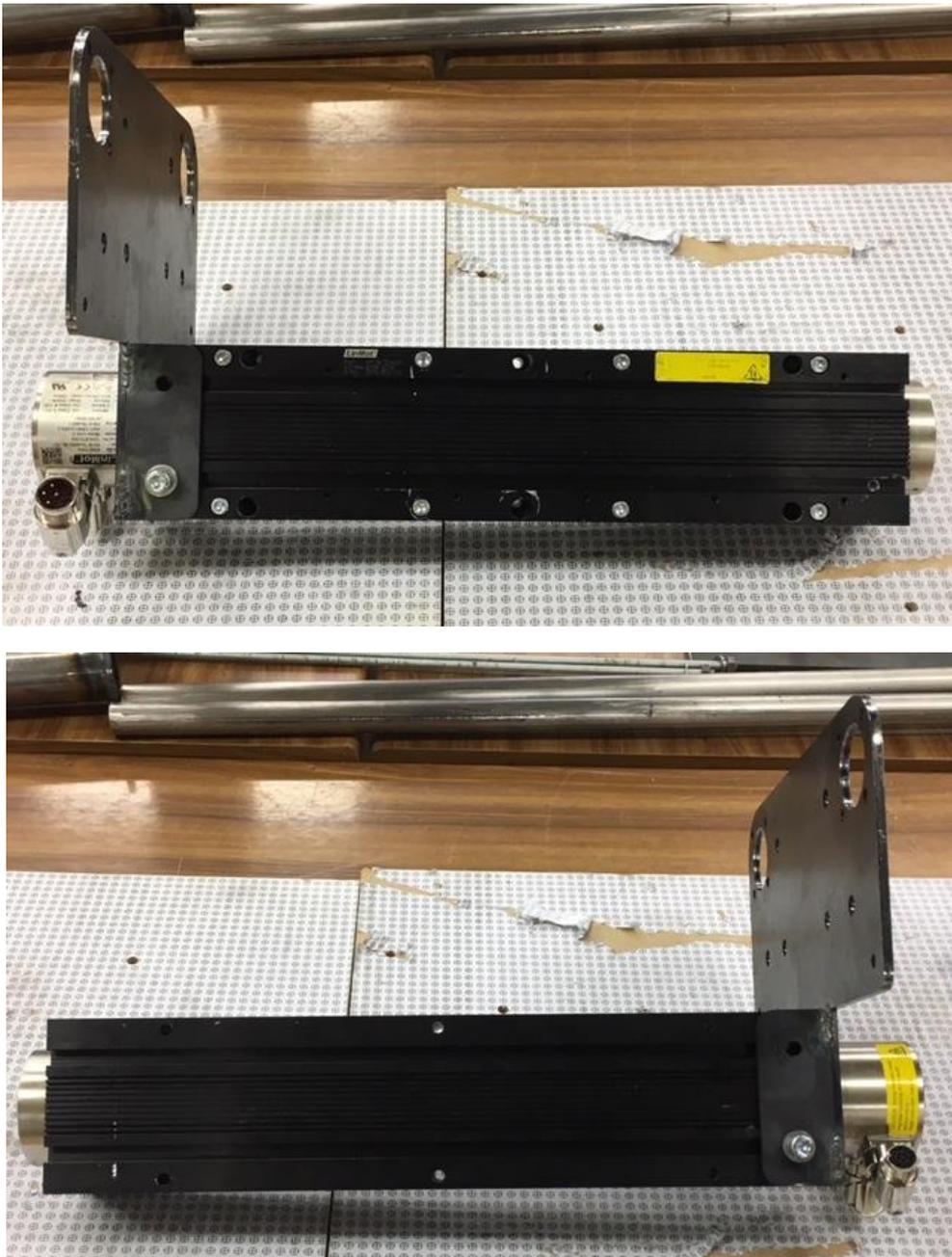


Figura 3.41: Fijación de la culata superior a ambos lados de la brida del motor lineal, por medio de tornillos y tuercas rectangulares de M8.

Dos de los tornillos de M8 que fijan la culata a ambos lados de la brida del motor lineal (arriba y abajo Figura 3.42), se utilizan además para fijar los dos soportes angulares, que sirven de anclaje para los dos muelles.

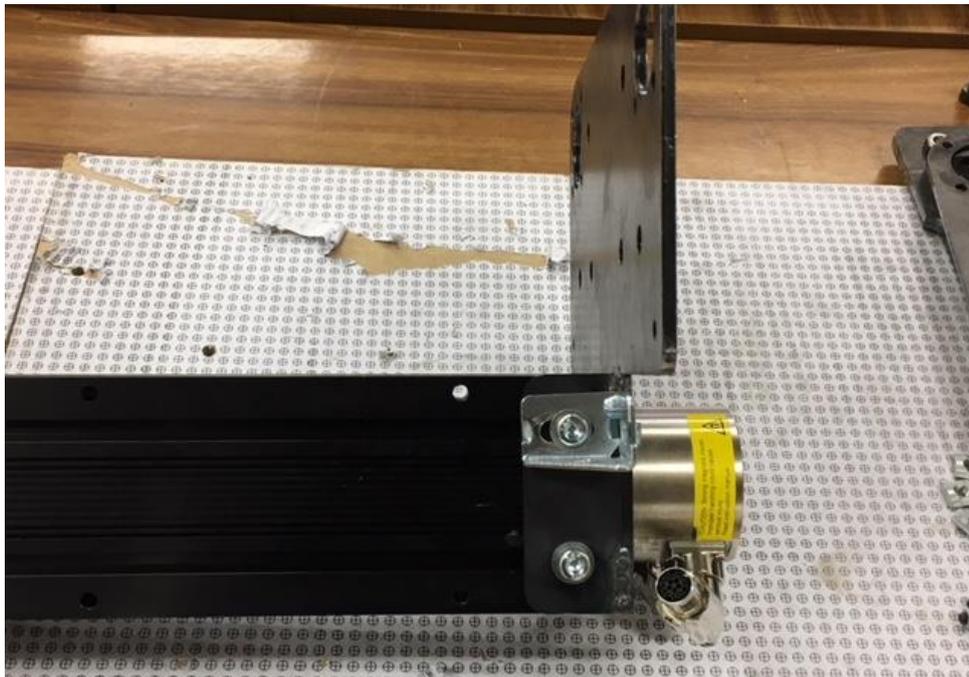
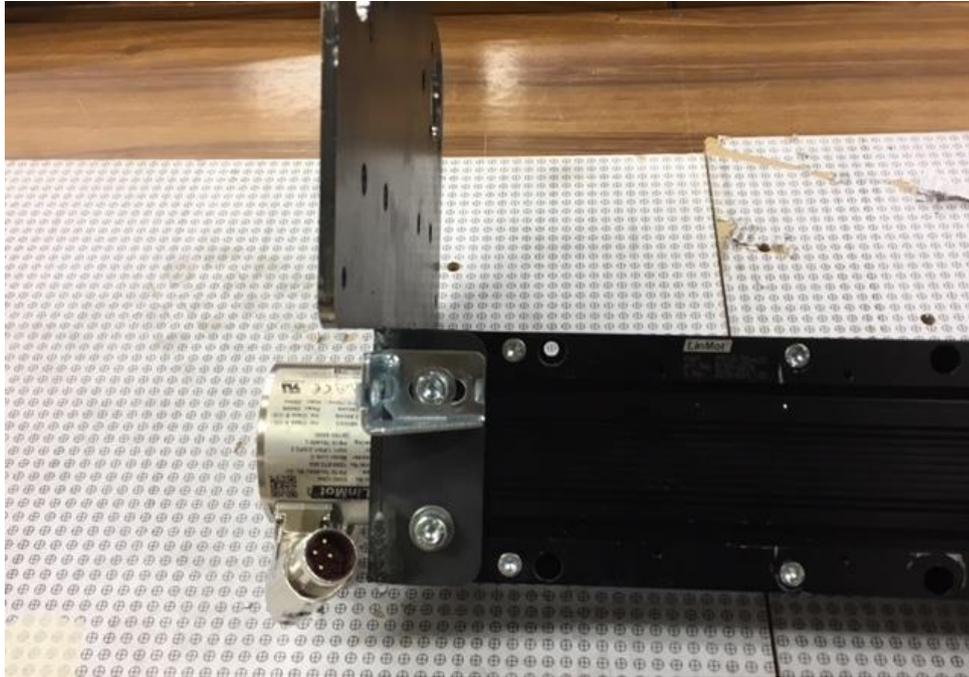


Figura 3.42: Unión de los soportes angulares a ambos lados de la culata con tornillos y tuercas rectangulares de M8.

Seguidamente introducimos los dos rodamientos lineales en la culata superior, en sus orificios correspondientes (Figura 3.43).



Figura 3.43: Introducción de los dos rodamientos en la culata.

A continuación, se introduce uno de los soportes intermedios en el propio rodamiento y se fija por medio de tornillos M6, que atraviesan el rodamiento lineal de bolas, la culata y la brida del soporte intermedio. Los soportes intermedios no deben anclarse fijamente, debido a que es preferible que tengan cierta libertad de movimiento para poder posicionar y fijar dicho soporte intermedio en la culata inferior (Figura 3.44).

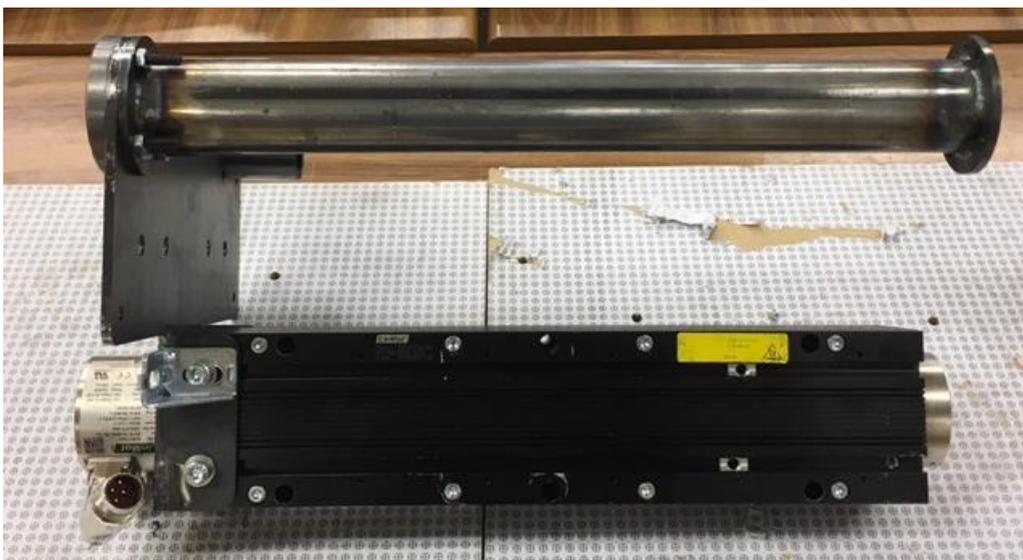


Figura 3.44: Anclaje del primer soporte intermedio de los rodamientos lineales de bolas.

Posteriormente, se repite el mismo proceso descrito anteriormente con el segundo soporte intermedio de los rodamientos lineales. En este caso tampoco se fija completamente dicho soporte intermedio (Figura 3.45).



Figura 3.45: Anclaje del segundo soporte intermedio de los rodamientos lineales de bolas.

Terminada la operación del anclaje de los soportes intermedios de los rodamientos lineales, se introducen las cuatro tuercas rectangulares en las canalizaciones de la brida del motor lineal (Figura 3.46).



Figura 3.46: Introducción de las cuatro tuercas rectangulares en las canalizaciones de la brida.

Una vez anclados los dos soportes intermedios de los rodamientos, pero sin estar fijados completamente a la culata superior, introducimos la culata inferior al otro extremo de la brida del motor lineal. En esta operación todavía no se procede a fijar la culata inferior a la brida del motor lineal (Figura 3.47).



Figura 3.47: Posicionamiento sin fijación a la brida del motor lineal de la culata inferior.

El problema que se mencionaba anteriormente con respecto a la fijación de los soportes intermedios se observa en la Figura 3.48. En esta ocasión se aprecia el desajuste de uno de los soportes intermedios con respecto al orificio de la culata inferior. Por esta razón, en la parte superior de los soportes intermedios no deben ir fijados completamente, ya que si no es así no permite cierta libertad de movimiento en el momento que se introduzca el rodamiento lineal de bolas en la culata inferior.



Figura 3.48: Desalineamiento de uno de los soportes intermedios.

A continuación de los dos anclajes en la parte superior del conjunto móvil del excitador inercial, se continúa con la introducción de un rodamiento lineal en la parte inferior del conjunto móvil, y que a su vez se encuentre en el interior del soporte intermedio de los rodamientos lineales, encontrándose entre ambos componentes la culata inferior (Figura 3.49).

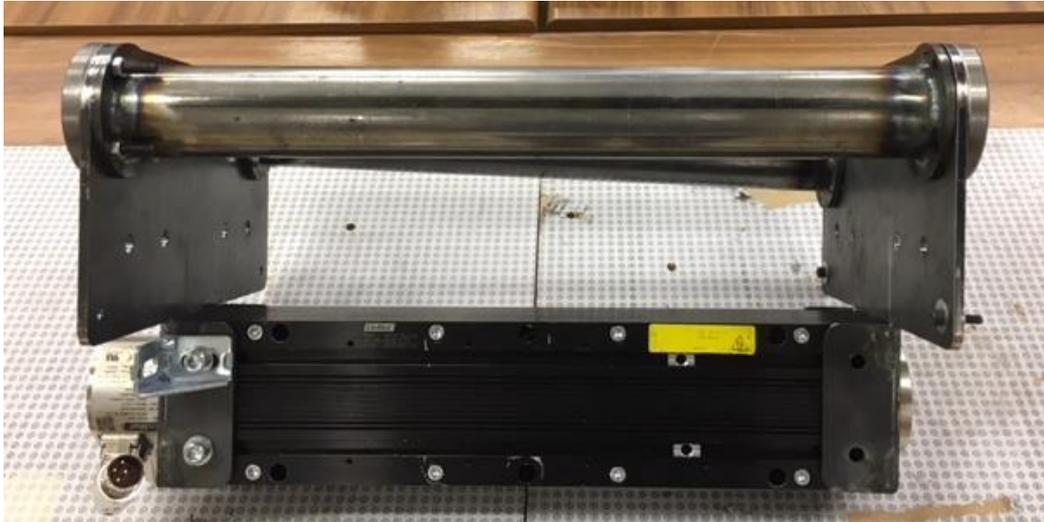


Figura 3.49: Introducción del primer rodamiento lineal en la parte inferior del conjunto móvil.

La introducción del rodamiento lineal sitúa el soporte intermedio de manera alineada, junto con los taladros del rodamiento lineal de bolas. Seguidamente se procede a fijar el soporte intermedio de los dos rodamientos a través de tornillos de M6. En este soporte intermedio se realiza la fijación completa, apretando dichos tornillos a ambos lados de dicho componente quedando completamente rígida la unión (Figura 3.50).



Figura 3.50: Fijación a ambos lados del primer soporte intermedio de rodamientos lineales.

Posteriormente, se introduce el segundo rodamiento en el segundo soporte intermedio de los rodamientos lineales, en la parte inferior del conjunto móvil. Al no estar fijado completamente el soporte intermedio al rodamiento lineal superior, permite situar el soporte intermedio en el orificio e introducir acto seguido el rodamiento lineal (Figura 3.51).

En esta operación se observó que los taladros del soporte intermedio se encontraban escasamente desalineados con respecto a los taladros de la culata. La resolución a este problema es ampliar un poco los taladros, tanto de la brida del soporte intermedio como de la culata, por medio de una taladradora con broca helicoidal para el taladro en acero de 7 mm de diámetro.



Figura 3.51: Introducción del segundo rodamiento lineal en la parte inferior del conjunto móvil.

Con el soporte intermedio de los rodamientos lineales posicionado, se procede a fijar completamente dicho componente a las culatas, tanto superior como inferior, mediante los tornillos de M6 (Figura 3.52).



Figura 3.52: Fijación a ambos lados del segundo soporte intermedio de rodamientos lineales.

Una vez fijados los dos soportes intermedios de los rodamientos lineales, la siguiente operación es unir ambas bridas de la culata inferior a la brida del motor lineal con cuatro tornillos y cuatro tuercas rectangulares, incluyendo arandelas en dichas uniones (Figura 3.53).

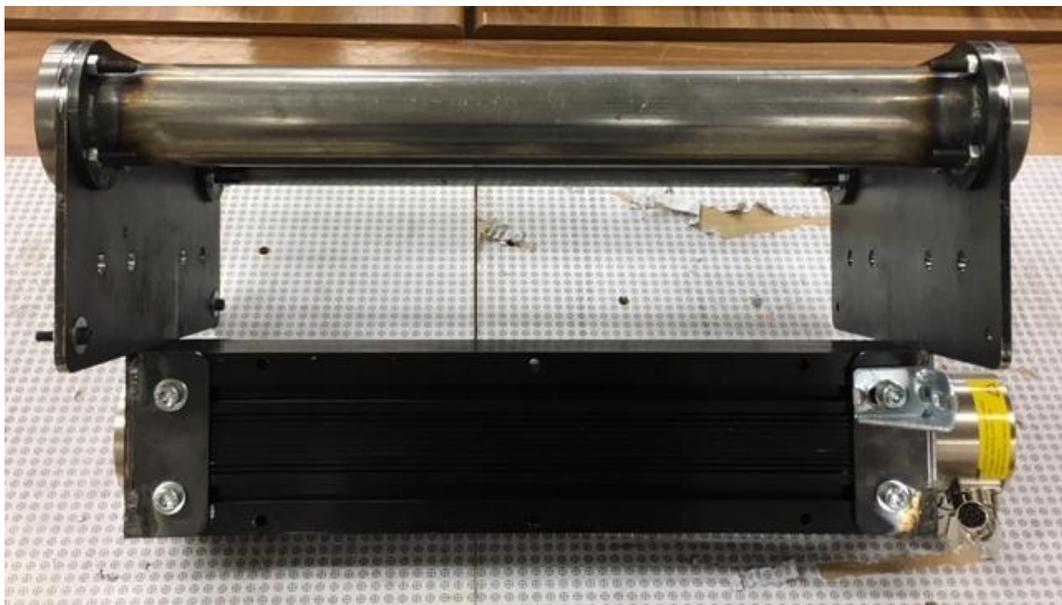


Figura 3.53: Fijación de la culata inferior a la brida del motor lineal.

Realizando esta operación se da por finalizado el acoplamiento de todo el conjunto móvil que compone el excitador inercial.

Todo el conjunto móvil se posiciona como se aprecia en la Figura 3.54. En esta posición se tiene mayor maniobrabilidad en el montaje del resto de componentes del excitador inercial. Dicho conjunto se encuentra apoyado directamente sobre las culatas, sin poner en riesgo los conectores del estator. En esta posición se introduce el vástago en el interior del estator con mucha precaución. Es aconsejable lubricar parte de la superficie del vástago para que no exista fricción entre el vástago y el cojinete del estator junto con la pared interior del estator.



Figura 3.54: Introducción del vástago en el estator.

Unas arandelas de caucho son introducidas a ambos extremos del vástago. El objetivo de dichas arandelas es evitar el choque directo del estator con las bases, tanto superior como inferior (Figura 3.55).



Figura 3.55: Inserción de arandelas de caucho a ambos lados del vástago.

A continuación, se introducen los dos tubos de acero inoxidable de diámetro 30mm en el interior de los rodamientos, también es aconsejable lubricar la superficie de dichos componentes para mayor facilidad de montaje, y posteriormente para evitar la fricción del conjunto móvil en el movimiento de traslación (Figura 3.56).

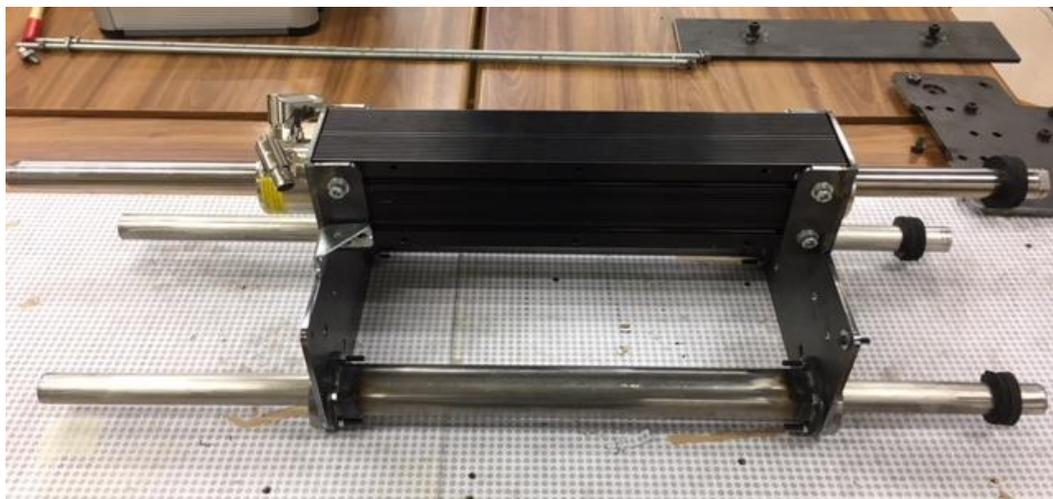


Figura 3.56: Introducción de los dos tubos de acero inoxidable en los rodamientos lineales.

La siguiente operación es la de posicionar las bases superiores exterior e interior soldadas entre sí en el vástago y en los dos tubos de acero inoxidable, introducidos en sus orificios correspondientes (Figura 3.57).



Figura 3.57: Posicionamiento de la base superior del excitador inercial en el vástago y los tubos de acero inoxidable.

Una vez posicionada la base superior, se introducen las varillas roscadas por los taladros de la base superior y por el interior de los tubos de acero inoxidable. Las tuercas sirven a modo de tope, para que la varilla roscada no quede en el interior del tubo, y haya que volver a introducir las varillas roscadas por los taladros de la base superior (Figura 3.58).

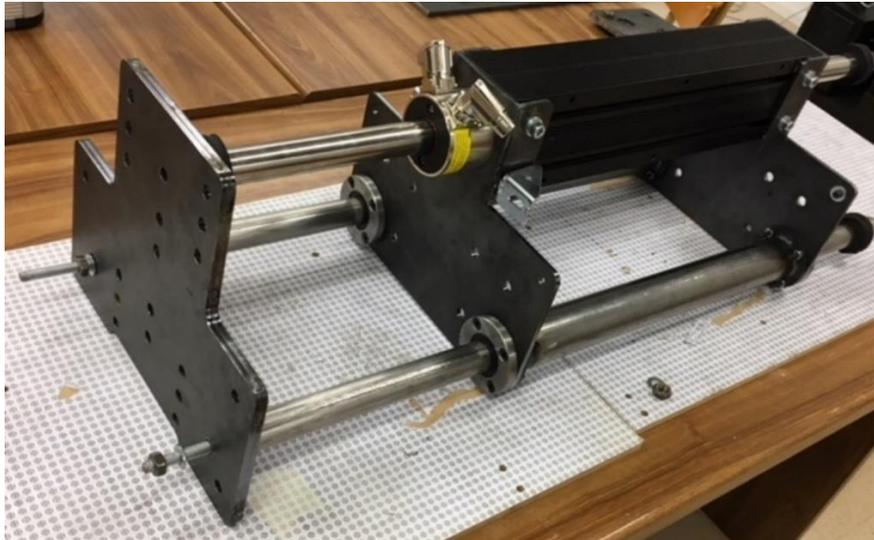


Figura 3.58: Inserción de las varillas roscadas en el interior de los tubos de acero inoxidable, pasando por los taladros de la base superior.

Seguidamente se introducen las varillas roscadas en los taladros de la base inferior y a continuación los tubos de acero inoxidable en los orificios correspondientes de dicha base. Con todo ello dispuesto, se colocan las dos tuercas de M10 en las dos varillas roscadas y apretadas al ras de la varilla roscada. Se colocan tornillos y tuercas de M10 a modo de tacos para nivelar el excitador inercial, como se puede apreciar en Figura 3.59.

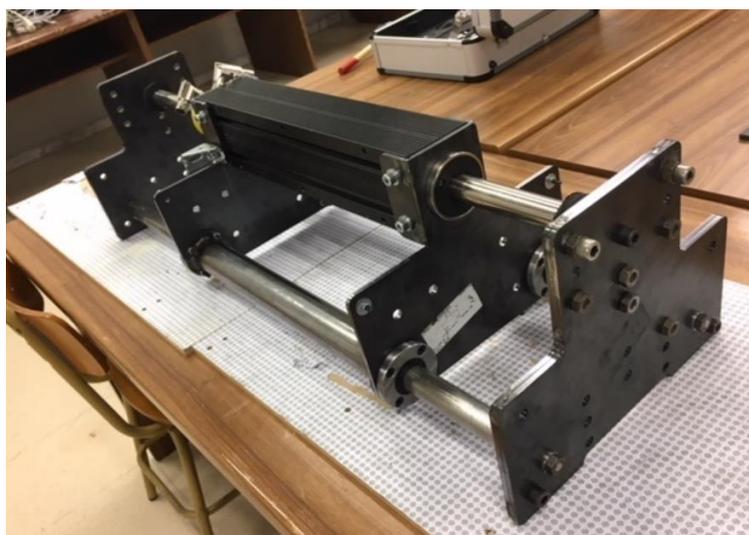


Figura 3.59: Introducción de las varillas roscadas y tubos de acero inoxidable en la base inferior del excitador inercial.

Con la base inferior ya fijada, pasamos a apretar las tuercas de las varillas roscadas de la base superior. Seguidamente fijamos el vástago a la base superior con un tornillo de M8 en la parte superior junto con arandelas, y con un tornillo de M10 en la base inferior. Con todo este montaje se aporta rigidez y firmeza a todo el conjunto estructural.

El resultado del propio excitador inercial se puede apreciar en todo su conjunto en la Figura 3.60, sin tener en cuenta su disposición, tanto vertical como horizontal.



Figura 3.60: Apriete de las varillas roscadas en la base superior y fijación del vástago en ambas bases del excitador inercial.

Con todas las operaciones anteriores realizadas, falta añadir el componente esencial cuando el excitador inercial se disponga de manera vertical. Se trata del soporte de lastre, tal como se explica en el Epígrafe 4, es el elemento que soportara el lastre a ambos lados del excitador inercial, proporcionando fijación a la estructura sin necesidad de atornillar el excitador inercial.

Como se puede observar en la Figura 3.61, el soporte de lastre va atornillado a la base inferior por medio de dos tornillos de M10.

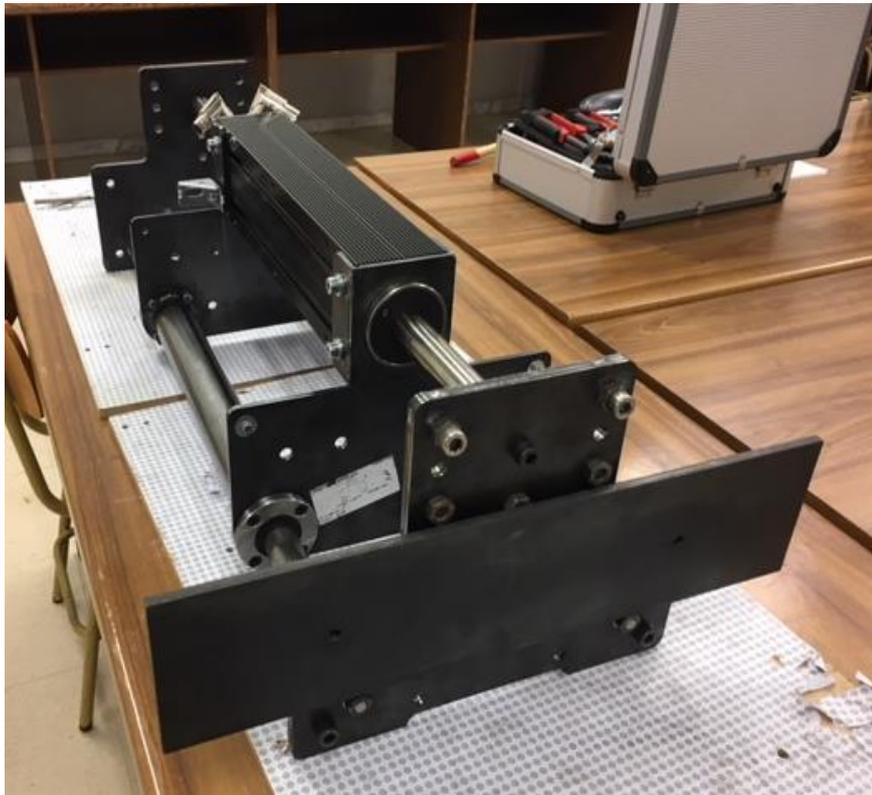


Figura 3.61: Fijación del soporte de lastre en la base inferior.

Como última operación en el montaje del excitador inercial, se colocan los muelles entre la base superior y los soportes angulares, a ambos lados de la brida del motor lineal, como se puede apreciar en Figura 3.62.

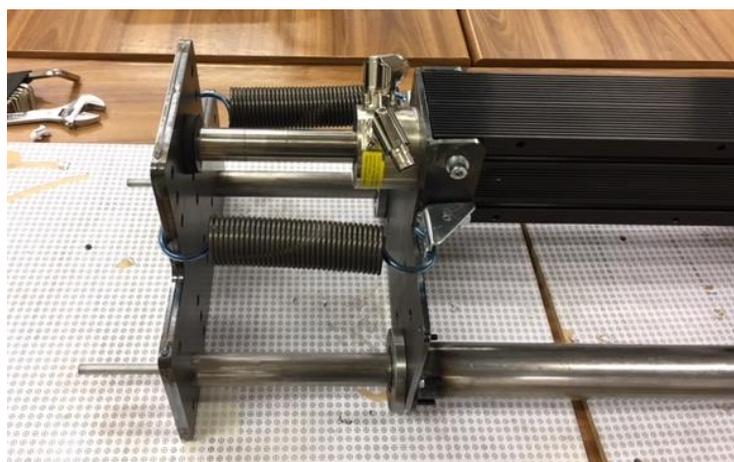


Figura 3.62: Colocación de los muelles en el conjunto excitador inercial.

El resultado completo obtenido de todo el montaje que se ha llevado a cabo en el excitador inercial queda plasmado en la Figura 3.63.



Figura 3.63: Montaje completo del excitador inercial en posición vertical (derecha e izquierda).



4. Fundamento conceptual

El excitador inercial en su movimiento de traslación produce fuerzas de inercia en la misma dirección del vástago, al acelerar las masas móviles que son incluidas en el ensayo.

Por tanto el conjunto del excitador inercial es necesario que se encuentre inmobilizado en todo momento y que también se encuentre solidario a la estructura. La manera de unir el excitador inercial a la estructura debe ser de manera cómoda y sin necesidad de dañar la estructura en el momento de ejecutar el ensayo. Una de las maneras de no dañar la estructura es simplemente dejar gravitando el excitador inercial sobre la estructura, sin necesidad de realizar taladros para atornillarlo.

Existen dos maneras de posicionar el excitador inercial, en posición vertical y horizontal, que explicaremos a continuación.

4.1. Posición vertical

El conjunto móvil del excitador inercial se desplaza de manera vertical a lo largo del vástago, como se puede observar en la Figura 4.1.

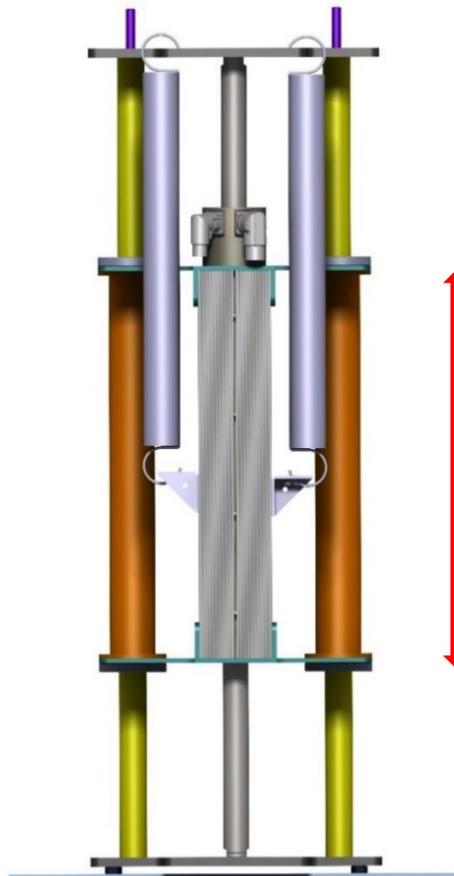


Figura 4.1: Movimiento de traslación vertical del conjunto móvil, visto frontalmente.

En la posición vertical, se ideó un componente que pudiera fijar el excitador inercial sin tener que ensamblarlo fijamente a la estructura.

El componente fabricado que permite dicho anclaje, se llama soporte de lastre. Se trata de una placa de acero S275 de dimensiones 500x120mm de 8mm de espesor. En su superficie lleva fabricados dos taladros de 11mm de diámetro espaciados a 270mm de manera simétrica, para una mejor aclaración observar el Plano 4 del Anexo 7. En los mismos taladros se sueldan dos tuercas de M10, que sirven de anclaje y apoyo a la base inferior (Figura 4.2). Dicho anclaje se realiza en la base inferior con tornillos de M10 a través de dos taladros situados en los vértices de la base inferior (Figura 4.3).



Figura 4.2: Diseño del soporte de lastre.

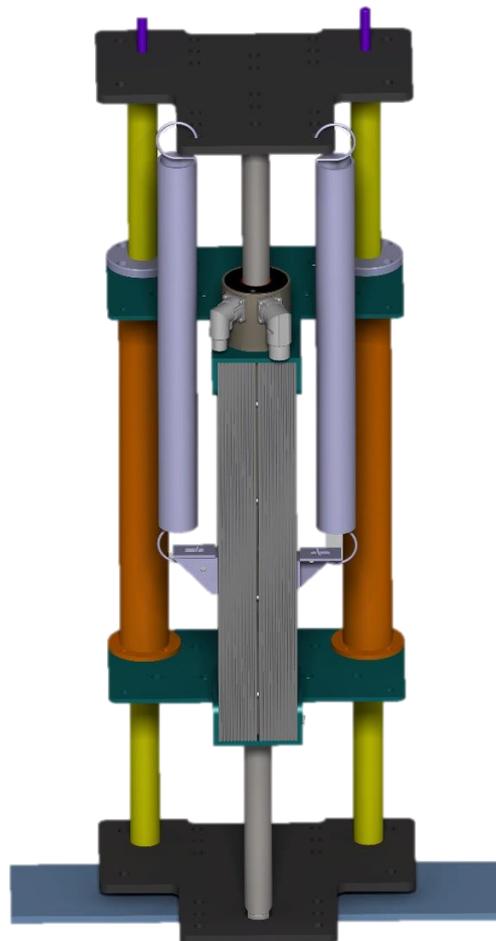


Figura 4.3: Unión del soporte de lastre en el excitador inercial.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de dicho soporte del lastre es fijar el excitador inercial a la estructura, siendo ambos solidarios. Para llevar a cabo esta fijación, se coloca el lastre a ambos extremos del soporte en sentido transversal (Figura 4.4). Cada lastre es una barra prismática de acero con sección rectangular de dimensiones 90x30mm y 580mm de longitud.

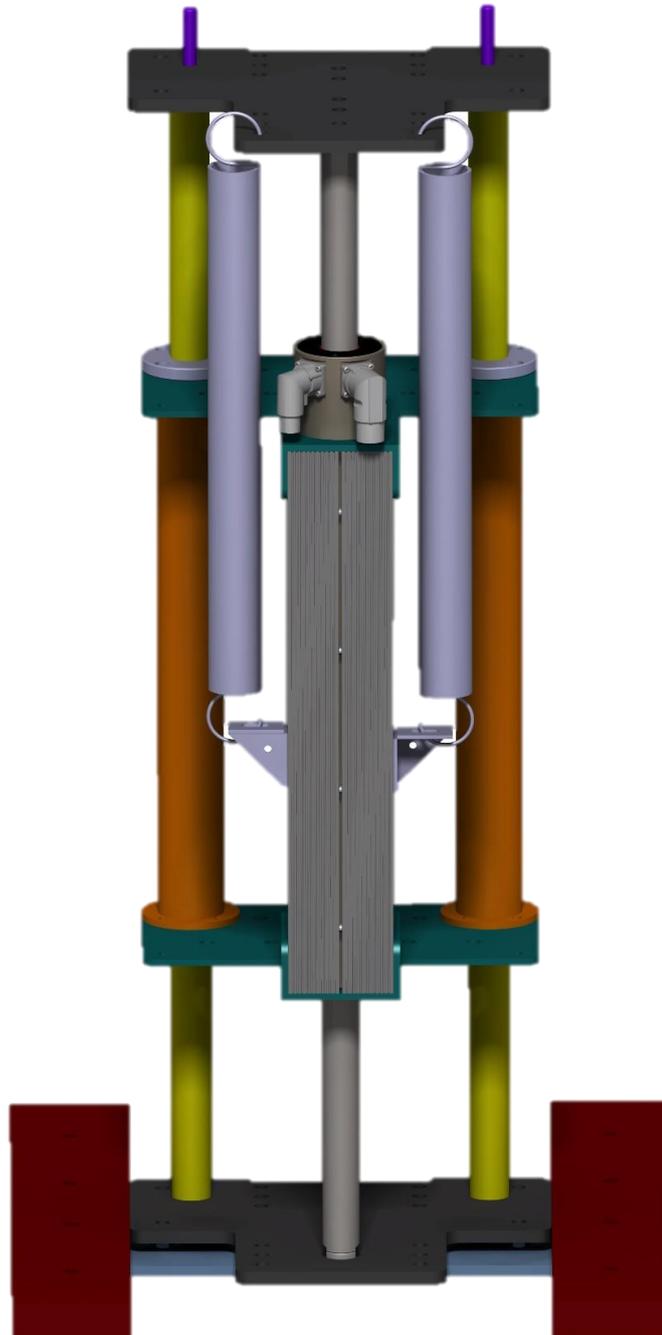


Figura 4.4: Disposición del lastre en el soporte del lastre, para la inmovilización del excitador inercial.

Una vez descrita la disposición del soporte del lastre, se debe realizar un estudio de fuerzas de manera conceptual de esta posición, con respecto al peso del lastre que debe inmovilizar el excitador inercial cuando se inicie el movimiento lineal vertical del conjunto móvil.

En esta posición vertical puede suceder que la masa móvil anclada en la culata decelere el movimiento ascendente del conjunto móvil del excitador inercial haciendo que tenga una aceleración (Figura 4.5), por lo que hay que aplicar el segundo principio de Newton. A continuación, se nombran los parámetros que se necesitarán para llevar a cabo este estudio.

- M_f → Masa del bastidor fijo del excitador inercial.
- M_m → Masa del conjunto móvil del excitador inercial.
- a → Aceleración del conjunto móvil.
- g → Gravedad.

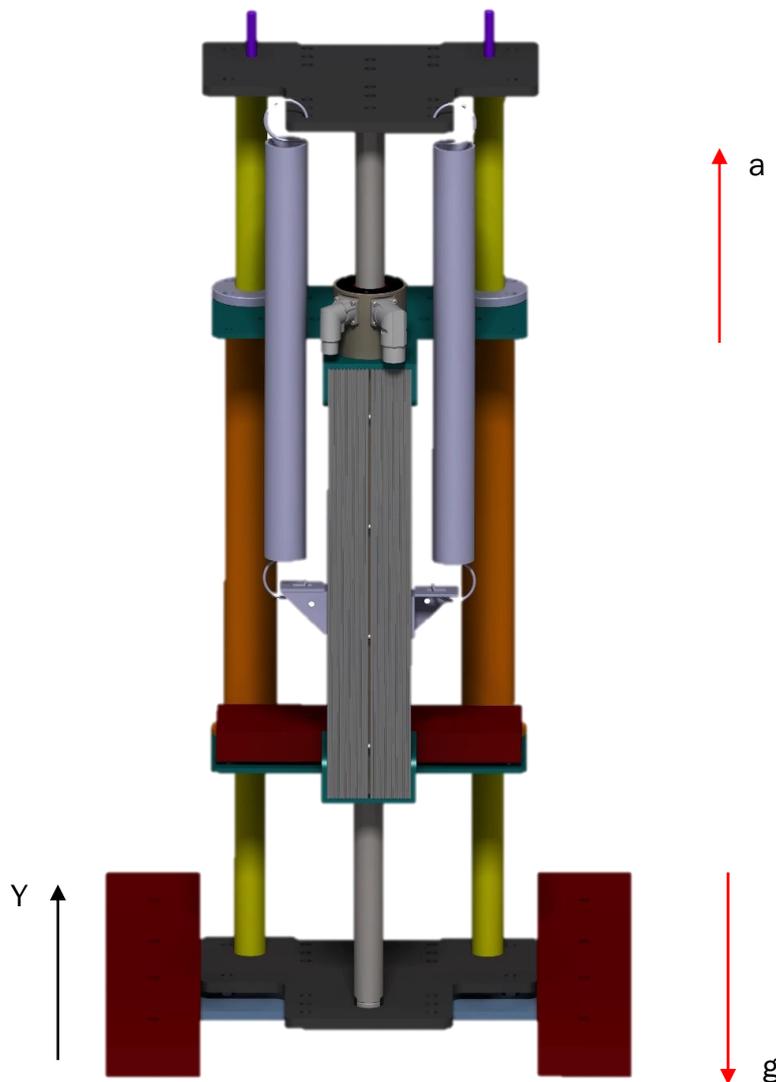


Figura 4.5: Anclaje de las masas móviles en la culata.

Las fuerzas que aparecen en el excitador inercial, partiendo de los parámetros mencionados previamente son:

- Peso del bastidor fijo $\rightarrow M_f * g$
- Fuerza de inercia $\rightarrow M_m * a$

En el caso de inmovilizar el excitador inercial, el sumatorio de fuerzas verticales tiene que ser inferior a 0 para que sea solidario a la estructura [Ref. Lib. 3]. Tomando el sentido positivo del eje Y, se obtiene:

$$\sum F_y < 0$$

$$M_m * a - M_f * g < 0$$

$$M_m * a < M_f * g$$

En esta situación:

- $M_m * a < M_f * g$

El excitador inercial permanece completamente inmovilizado, resultando unas fuerzas inerciales correctas en su medición, producidas por el conjunto móvil. En este estado, el excitador inercial no supone ningún tipo de riesgo para el operario.

Se puede producir otra situación, que las fuerzas de inercia sean mayores que el propio peso del bastidor que compone el excitador inercial:

- $M_m * a > M_f * g$

El conjunto estructural se elevaría y dejaría de cumplir sus objetivos. Las fuerzas inerciales no serían suaves, lo cual provocaría el movimiento del propio excitador inercial impidiendo la correcta identificación de dichas fuerzas. Y también que atañe un peligro para el propio operario. En esta situación hay que aumentar la masa del bastidor fijo M_f , por medio de los lastres situados en el soporte.

4.2. Posición horizontal

El excitador inercial, también tiene la posibilidad de posicionarse de manera horizontal. El movimiento de traslación que efectúa el conjunto móvil es en dirección horizontal, como se aprecia en la Figura 4.6 (abajo).

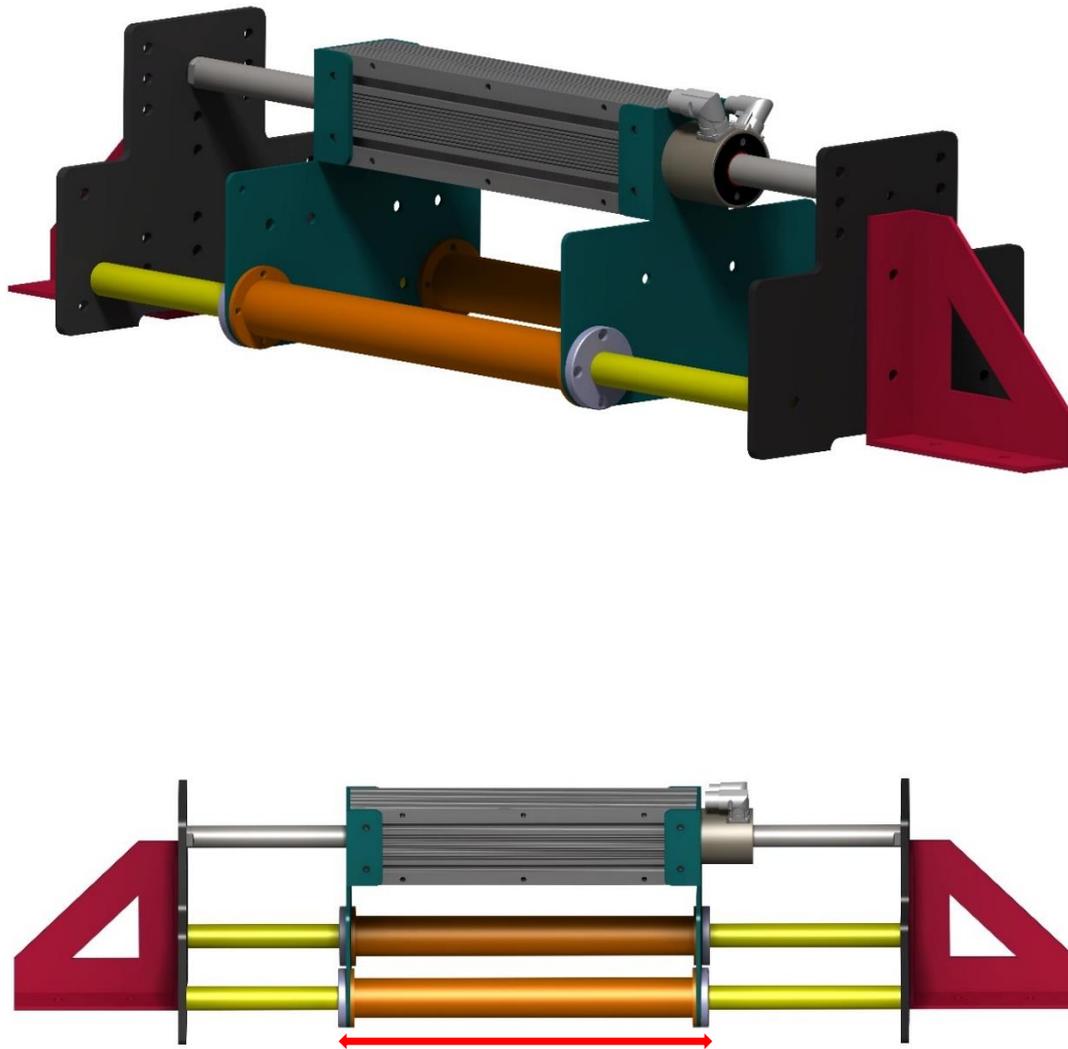


Figura 4.6: Excitador inercial en posición horizontal (arriba) y movimiento de traslación horizontal del conjunto móvil (abajo).

En la posición horizontal, también se ha diseñado un componente que permite la fijación a la estructura mediante el acoplamiento del lastre, siendo el excitador inercial y la estructura solidarios entre sí. El componente que permite el anclaje del lastre, son las escuadras (Figura 4.7), que se encuentran atornilladas a las bases exteriores, tanto superior como inferior, con dos tornillos y dos tuercas de M10 por cada base.



Figura 4.7: Diseño de la escuadra, para la fijación del excitador inercial a la estructura.

La fabricación de la escuadra constaría del corte por láser de una chapa de acero de espesor 5mm de contorno pentagonal, y también de la parte interior de contorno triangular.

Por otro lado, se tendrían unas pletinas de dimensiones con 200x50mm y 205x50mm, todas ellas de 5mm de espesor. Con dos taladros de 10.5mm de diámetro en cada pletina separados a 90mm.

A continuación, se soldaría la pletina de 200mm de longitud a un extremo sobre la pletina de 205mm, formando un ángulo de 90°. Seguidamente, se uniría la chapa de contorno pentagonal en un mismo lateral de las dos pletinas, también por soldadura. Obteniéndose finalmente la escuadra prediseñada en la Figura 4.7.

Al igual que en la posición vertical, la posición horizontal también necesita de la disposición y anclaje de lastre para una mayor fijación a la estructura. El lastre sigue siendo de las mismas dimensiones descritas en la posición vertical, y atornilladas a las escuadras a través de tornillos de M10. En esta posición, cada escuadra contará con la fijación de dos o más lastres para mayor fijación dentro de la estructura y que el excitador inercial no se desplace de la posición inicial. Se puede apreciar todo el montaje del excitador inercial, las escuadras y el lastre en la Figura 4.8.

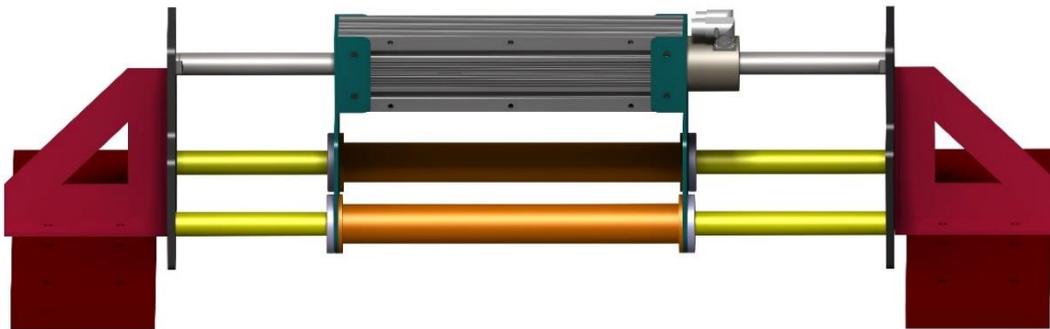


Figura 4.8: Disposición del lastre en la posición horizontal del excitador inercial.

Una vez detallado la ubicación de las escuadras y el lastre, se procede a realizar el estudio de fuerzas de forma conceptual. En posición horizontal también se anclan masas móviles a las bases intermedias a la hora de poner en funcionamiento el excitador inercial para realizar estudios en la estructura (Figura 4.9).

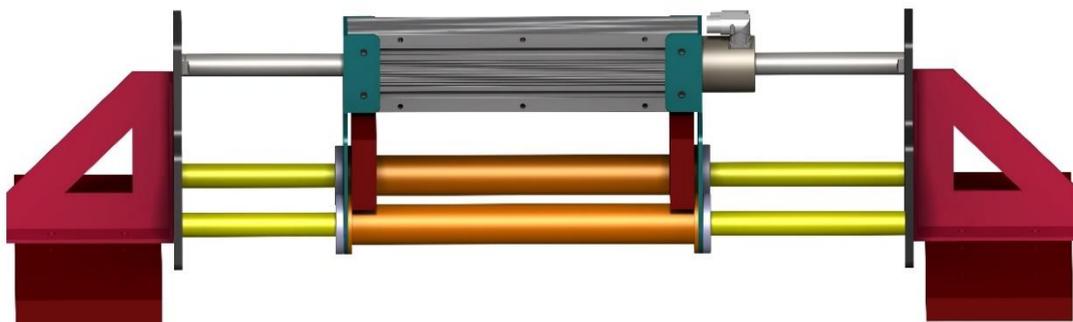


Figura 4.9: Ubicación y fijación de las masas móviles en las bases intermedias del conjunto móvil.

La posición horizontal difiere de la posición vertical en cuanto a las fuerzas que actúan sobre el excitador inercial. En este caso, el comportamiento dependerá de la fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre el conjunto excitador inercial y la propia estructura [Ref. Lib. 3].

Los parámetros utilizados para el estudio del excitador inercial en la posición horizontal son los siguientes:

- M_f → Masa del bastidor fijo del excitador inercial.
- M_m → Masa del conjunto móvil del excitador inercial.
- a → Aceleración del conjunto móvil.
- g → Gravedad.

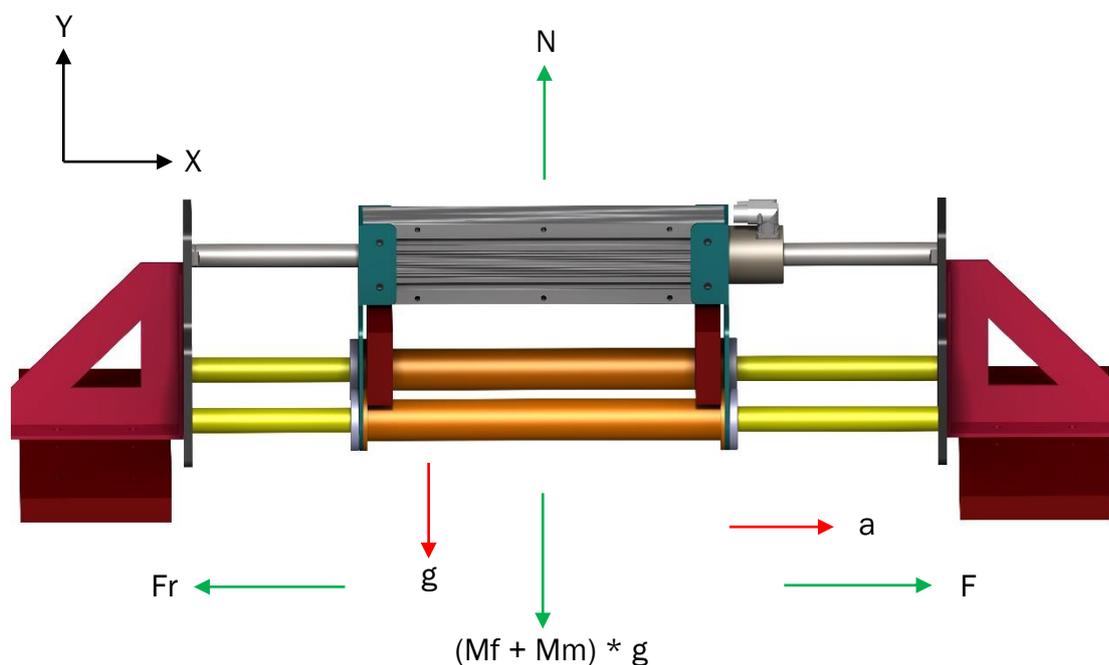


Figura 4.10: Fuerzas presentes en la posición horizontal del excitador inercial.

Las fuerzas que presenta el excitador inercial en la posición horizontal (Figura 4.10) a la hora de realizar el estudio son [Ref. Lib. 3]:

- Fuerza normal → $N = (M_f + M_m) * g$
- Fuerza de inercia → $F = M_m * a$
- Fuerza de rozamiento → $Fr = \mu * N$

El estudio para la inmovilización del excitador inercial en esta posición se lleva a cabo mediante el sumatorio de fuerzas horizontales y para que se produzca la inmovilización apropiada para poder realizar el estudio en la estructura dicho sumatorio tiene que ser inferior a 0 [Ref. Lib. 3].

Tomando el sentido del eje X como positivo, se obtiene:

$$\sum F_x < 0$$

$$F - Fr < 0$$

$$Mm * a - (Mf + Mm) * g * \mu < 0$$

$$Mm * a < (Mf + Mm) * g * \mu$$

En este caso:

- $Mm * a < (Mf + Mm) * g * \mu$

La fuerza de rozamiento del excitador inercial será lo suficiente elevada con respecto a la fuerza de inercia que el excitador inercial se encontrará bloqueado y solidario a la estructura. En esta situación se podrá realizar un estudio adecuado de la estructura, sin la preocupación de que el excitador inercial se desplace descontroladamente de la posición de origen.

Puede suceder otra situación, en la que la fuerza de inercia que produce el conjunto móvil es superior a la fuerza de rozamiento de todo el conjunto de excitador inercial.

- $Mm * a > (Mf + Mm) * g * \mu$

El excitador inercial, dada esta situación, se desplazará descontroladamente por el interior de la propia estructura, sin poder identificar adecuadamente las fuerzas inerciales que actúan sobre la estructura, además de resultar peligroso para el operario y la posible colisión con la estructura. Por tanto, para evitar esta situación será necesario aumentar la masa del bastidor fijo M_f mediante los correspondientes lastres fijados a las escuadras.

En conclusión, el lastre desempeña, tanto para la posición vertical como la horizontal, un papel importante para el conjunto excitador inercial a la hora de inmovilizarlo y encontrarse solidario a la estructura, para una correcta medición de las fuerzas de inercia. Y además establecer una cierta seguridad en los operarios a la hora de ponerlo en funcionamiento.

5. Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

- Se ha partido del motor lineal PS10-70 con su correspondiente botonera de control y se ha prototipado un actuador inercial plenamente funcional, dándose por cumplido el objetivo principal del Trabajo Fin de Grado.
- Se ha colaborado en técnicas de caracterización dinámica de estructuras mediante excitadores inerciales.
- Se han diseñado diversas alternativas de forma creativa y se ha optado razonadamente y con criterio técnico por la más adecuada.
- Se ha trabajado en equipo y se han discutido, con espíritu crítico, ventajas e inconvenientes de las distintas de las distintas posibilidades.
- Se han demostrado competencias propias de la profesión de ingeniero industrial, entre las que cabe destacar: modelado sólido en 3D; búsqueda de disponibilidad comercial de componentes mecánicos como tornillos especiales o cojinetes; elaboración de planos para corte por láser; supervisión de trabajos de taller e inventiva para el montaje de ciertas partes con el diseño de útiles específicos, etc.

5.2. Líneas futuras

En este proyecto existen innovaciones y actualizaciones que se pueden efectuar, obteniendo un excitador inercial más ergonómico y transportable con respecto a los excitadores de rodamientos APS 400. A continuación, se exponen las distintas ideas posibles a desarrollar:

- En vez de tener el anclaje de las masas móviles en las bases intermedias de la posición horizontal, se podría disponer de una base rectangular metálica ubicada entre las bases intermedias y apoyada sobre los tubos de acero inoxidable. Dicha base rectangular tendrá practicados unos taladros en las proximidades de los dos tubos de acero inoxidable, para poder anclar la base rectangular a la parte superior de los rodamientos lineales LMF [Ref. Web 14] introducido en los tubos de acero inoxidable. La base rectangular tiene taladros centrales para poder posicionar y anclar las masas móviles de manera centrada.
- Para una futura remodelación íntegra del excitador inercial, se sustituirá los cuatros rodamientos lineales y los dos tubos de acero inoxidable, por dos guías lineales con carro de rodillos-guía libres cada una. Dichos carros de rodillos-guía libres irían anclados a las placas soldadas perpendicularmente en los laterales de las bases intermedias.
- Caracterización del conjunto excitador inercial, midiendo las fuerzas inerciales que genera a cada frecuencia, carrera y la masa móvil que se disponga en el conjunto móvil. Para el procedimiento de una caracterización más detallada se debe incluir los parámetros de frecuencia, carrera y potencia del motor lineal, consiguiendo aceleraciones en función de las señales senoidales introducidas mediante el generador de funciones. La masa móvil es acelerada, por la tercera ley de Newton, produciendo la fuerza que es aplicada en la estructura. Se podría conocer la fuerza aplicada mediante la medición de la aceleración con un acelerómetro o teniendo conocimiento de la carrera, frecuencia y la señal senoidal introducida. Midiendo en la estructura las respuestas obtenidas ante esa fuerza, se podría caracterizar dicha estructura conociendo su rigidez, su función de respuesta en frecuencia, su amortiguamiento, etc. Por esta razón habría que conocer los valores límite de carrera, frecuencia y masa móvil permiten al excitador inercial ejecutar completamente la señal senoidal.

Bibliografía

Libros:

- [1] José Cueto, (2008). *Manual de soldadura TIG 2º Edición*. Barcelona, España: S.L. EDICIONES CEYSA. CANO PINA. ISBN: 9788496960107
- [2] Larry Jeffus, (2008). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*. España: S.A. EDICIONES PARANINFO. ISBN: 9788428329361
- [3] Sears, F.W., Zemansky, M.W., Young, H.D, & Freedman, R.A. (2005). *Física universitaria*. México: PEARSON EDUCACIÓN. ISBN: 970-26-0672-1

Páginas Web:

- [1]. - APS Dynamics. Products. Vibration Exciter. Ball bearing exciter.
< <http://apsdynamics.com/en/products/vibration-exciter/ball-bearing-exciter.html> >
- [2]. - SENSING S.L. Instrumentación para ensayos en ingeniería civil.
<http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/APLICACIONES_1/Instrumentaci%C3%B3n-para-ensayos-en-ingenier%C3%ADa-civil_126/ >.
- [3]. - SENSING S.L. Medidas de vibraciones. Shakers electrodinámicos - Excitadores de vibración. <http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/MEDIDA-DE-VIBRACIONES_151/Shakers-electrodin%C3%A1micos--Excitadores-de-vibraci%C3%B3n_293/ >.
- [4]. - APS Dynamics. Applications.
< <http://apsdynamics.com/en/applications.html> >
- [5]. - SPEKTRA.StructuralTesting.
< <https://www.spektra-dresden.com/en/products/structural-testing.html> >.
- [6]. - Linmot. Linear Motion Technology Leader. Linear Motors.
<<http://www.linmot.com/products/linear-motors/> >.
- [7]. - Linmot. Linear Motors. Linear Motors P10-70. Stators PS10-70x400.
< <http://shop.linmot.com/E/linear-motors/linear-motors-p10-70/stators-ps10-70x400/ps10-70x400u-bl-qj-d01.htm> >
- [8]. - Linmot. Motor cables. Motor cables for P10 motors. Encoder cables for P10-70. < <http://shop.linmot.com/index.php?KSS05-02-08-D15-J-8&page=productDetails&productNo=0150-2264&pageType=&source=search&language=E> >.



[9]. - Linmot. Motor cables. Motor cables for P10 motors. Power cables for 10-70. < <http://shop.linmot.com/E/linear-motors/linear-motors-p10-70/stators-ps10-70x400/ps10-70x400u-bl-qj-d01.htm> >.

[10]. - Linmot. Linear Motors. Linear Motor P10-70. Flanges PF10-70. < <http://shop.linmot.com/E/linear-motors/linear-motors-p10-70/flanges-pf10-70/pf10-70x430.htm> >.

[11]. - Motor Flanges PF10. < http://shop.linmot.com/data/import/Dokumente/0185-0073-E_1V0_DS_Motor_Flanges_P10.pdf >.

[12]. - Linmot. Linear Motors P10-70. Sliders PL10-28 standard. < <http://shop.linmot.com/E/linear-motors/linear-motors-p10-70/sliders-pl10-28-standard/pl10-28x890-840.htm> >.

[13]. - Linear Motors. Linear Motors P10-70. Sliders PL10-28 standard. < http://shop.linmot.com/data/import/CAD/0186-0418_160412_CAD_PL10-28x....pdf >

[14]. - Rodamiento lineal de bolas con brida. < <https://www.euro-bearings.com/g2klmf.htm> >.

[15]. - Técnica y Fundamentos de la Soldadura TIG. < <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html> >.

[16]. - Artículo Materiales de aporte. < <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd7564.pdf> >.

[17]. - Fasten Sistemas S.L. Catálogo. Elementos de unión. < <https://www.antipoda.eu/pdf/fasten.pdf> >

Anexos

Anexo 1: Excitador inercial APS 400



APS 400 ELECTRO-SEIS®

Long Stroke Shaker with Linear Ball Bearings

Page 1 of 5



The APS 400 ELECTRO-SEIS® shaker is a longstroke, electrodynamic force generator specifically designed to be used alone or in arrays for studying dynamic response characteristics of various structures. It finds use in modal excitation of complex structures, particularly when low frequencies are required. Furthermore it can be used for low frequency vibration testing of components and assemblies.

Applications

- Determination of natural mode frequencies, shapes, damping ratios, and stress distributions
- Excitation of manufactured equipment in the factory or installed in the field to demonstrate compliance with seismic specification criteria
- Seismic simulation for components
- Test and calibration for seismic instruments
- Geological Services, Science, Physics and Seismic

Features

- Can be used to generate sine wave, swept sine wave, random or impulse force waveforms, fully adjustable at source
- Test set-up flexibility - operates fixed body, free body, free armature
- Optimized to deliver power to resonant load with minimum shaker weight and drive power
- Adjustable armature re-centering for horizontal and vertical operation or other external pre-loads
- Two-Man Portability - 73 kg (160 lb) total weight

APS 400 ELECTRO-SEIS®

Long Stroke Shaker with Linear Ball Bearings

Description and Characteristics

The APS 400 ELECTRO-SEIS® shaker has been optimized for driving structures at their natural resonance frequencies. It is an electrodynamic force generator, the output of which is directly proportional to the instantaneous value of the current applied to it, independent of frequency and load response. It can deliver random or transient as well as sinusoidal waveforms of force to the load. The armature has been designed for minimum mass loading of the drive point. The ample armature stroke allows driving antinodes of large structures at low frequencies and permits rated force at low frequencies when operating in a free body mode.

The unit employs permanent magnets and is configured such that the armature coil remains in a uniform magnetic field over the entire stroke range - assuring force linearity. The enclosed, self-cooled construction provides safety and minimum maintenance. Attachment of the armature to the drive point is accomplished by a simple thrust rod like the APS 8610 - Modal Stinger.

An amplifier, such as the APS 145 - Power Amplifier, is required to provide armature drive power.



APS 400 with APS 0412
Reaction Mass Assembly

Modes of Operation

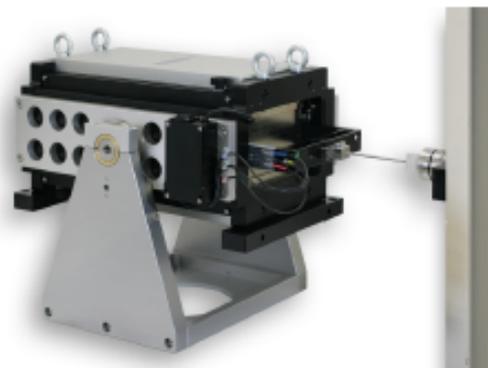
Free Armature Mode

In this mode, the armature provides the reaction mass for force delivered to the test structure via the shaker body. Auxiliary reaction mass may be added to the armature to decrease the low frequency limit for rated force operation.

The APS 400 shaker and APS 0412 - Reaction Mass may be used in a vertical or horizontal free armature mode with rated force down to less than 3 Hz. Feet and carrying handles are provided for ease in placement of the shaker on horizontal test surfaces.

Fixed Body Mode

By providing a rigid attachment between the body and ground, the full relative velocity and stroke capability is available for load motion. Maximum rated force can be delivered down to 0.01 Hz and 70 % maximum to 0 Hz.



APS 420 with APS 4222 - Trunnion
and APS 8610 Modal Stinger



APS 400 ELECTRO-SEIS® Long Stroke Shaker with Linear Ball Bearings

Page 3 of 5

Free Body Mode

In this mode, the body provides the reaction mass. Load and body motion are accommodated within the total relative velocity and stroke. Because of the high cross-axis stiffness provided by the armature linear guidance system, the shaker may be supported above ground level by means of suspension lines (APS 8612 - Steel Cable Kit) attached to the body. This provides a convenient mounting for introducing force parallel to a horizontal mounting surface. Examples of such surfaces include floors, roofs, platforms, cabinets, bridges and tanks.



APS 400 with APS 0452 - Auxiliary Table Kit - Horizontal



APS 420 with APS 8610 - Modal Stinger and APS 8612 - Steel Cable Kit prepared for Free Body Mode operation

Shaker Table Mode

Auxiliary Table Kits are available which, when installed on the basic shaker, enable the shaker to provide long stroke excitation to components or model structures mounted on the table.

The APS 0452 Auxiliary Table Kit provides horizontal motion, the APS 0477 Auxiliary Table Kit provides vertical motion and the APS 0478 Auxiliary Table Kit provides either the vertical or horizontal motion configuration.



APS 400 with APS 0477 - Auxiliary Table Kit - Vertical



APS 400 ELECTRO-SEIS®

Long Stroke Shaker with Linear Ball Bearings

Performance

The primary purpose of the APS 400 ELECTRO-SEIS® shaker is to determine the dynamic characteristics of mechanical structures. At resonance, a large amount of energy is contained in the structure, and the shaker must accommodate the resulting motion. However, it need only supply the real mechanical power dissipated by damping mechanisms within the structure.

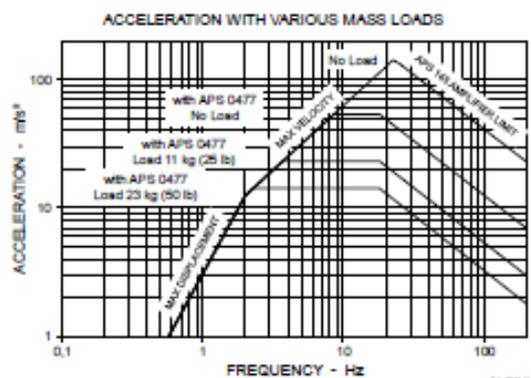
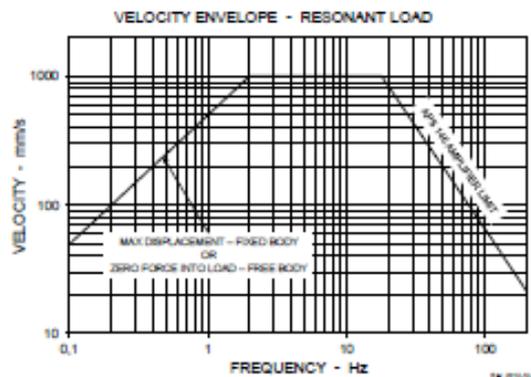
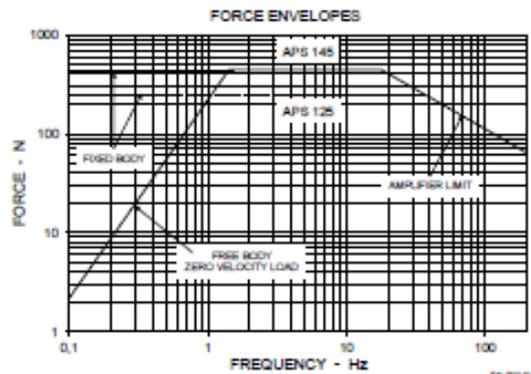
If a drive point on a structure in resonance is vibrating with a velocity of 1,000 mm/s (39 in/s) peak and a force of 445 N (100 lbf) peak is required to sustain the vibration level, then the shaker will be delivering approximately 220 W RMS to the structure. Such a load on the shaker is termed a matched resonant load, and it is purely resistive since the force is in a phase with the velocity.

If the resonant load input is other than 445 N x 1,000 mm/s, the full 220 watts of mechanical power cannot be delivered to the structure, the system being either force or velocity limited. If the resulting maximum response level is not great enough, the user may have the option of moving the shaker to a drive point having an impedance closer to the matched value, or adding more shakers to the array driving the structure.

Within the limitations of maximum force and velocity, the actual power delivered to a structure is a function of the input mechanical impedance at the drive point. In typical modal testing, this input impedance varies widely in magnitude and phase angle. At different frequencies, the input impedance of the drive point may appear predominately spring-like, mass-like, or resistive. Since the object of the tests is to establish resonant modes, at which the input mechanical impedance of all drive points are resistive, the shaker's maximum performance capability is most meaningful stated in terms of the force and velocity that can be obtained when driving a matched resistive load.

Therefore, performance is given in the form of graphs which present the envelopes of maximum force and velocity delivered to a resonant structure as functions of the resonance frequency of the structure.

Another application is the excitation for sensor calibration. Acceleration envelopes of the APS 400 ELECTRO-SEIS® shaker with various mass loads is shown in the lower graph for the 445 N rating.



APS 400 ELECTRO-SEIS®

Long Stroke Shaker with Linear Ball Bearings

Specifications

Shaker	APS 400
Force (Sine Peak)	445 N (100 lbf)
Velocity (Sine Peak)	1,000 mm/s (39 inch/s)
Stroke (Peak - Peak)	158 mm (6.25 inch)
Frequency Range	DC ... 200 Hz
Operation	horizontal or vertical
Armature Weight	2.8 kg (6.2 lb)
Max. Overhung Load at Armature Attachment Point	9.0 kg (20 lb)
DC Coil Resistance	1.6 Ω
Total Shaker Weight	73.0 kg (161 lb)
Shipping Weight	86.0 kg (190 lb)
Overall Dimension L x W x H	526 x 314 x 178 mm (20.7 x 12.4 x 7.0 inch)
Operating Temperature	5 ... 40 degrees C
Storage Temperature	-25 ... 55 degrees C

Accessories (optional)

Shaker	APS 400
Power Amplifier	APS 145
System Cable for Connecting Shaker to Amplifier	APS 0082-6E
Zero Position Controller for Vibration Exciters	APS 0109
Reaction Mass Assembly	APS 0412
Lifting Handles (Set of 4)	APS 0414
Carrying Handles and Tie-down Bars	APS 0421
Auxiliary Table Kit - Horizontal	APS 0452
Auxiliary Table Kit - Vertical	APS 0477
Auxiliary Table Kit - Horizontal and Vertical	APS 0478
Horizontal Reaction Mass System	APS 4001
Overtravel Switch	APS 8543
Modal Stinger Kit	APS 8610
Steel Cable Kit	APS 8612

Additional accessories available



Anexo 2: Guía de uso de Actuadores Linmot

Este anexo pretende ser una guía de ayuda para el manejo del motor lineal *Linmot* disponibles en el laboratorio de estructuras. Se describe brevemente a continuación:

- Motor lineal

Su utilización principal será como excitador inercial o *shaker* para ensayos de vibración de estructuras reales. Sus componentes principales son:

- Estator: Linmot PS10-70x400N-BL-QJ
- Vástago: Linmot PL10-28x890/840
- Preactuador-controladora o *Drive*: Linmot E1450-EC-QN-1S
- Fuente de alimentación de 24V
- Filtro de red trifásica.

Actualmente se dispone de tres alternativas para el manejo de los actuadores:

- Mediante el programa *Linmot-Talk*. Permite acceder a todas las funciones y parámetros del conjunto drive-actuador.
- Por medio de una botonera diseñada de forma personalizada para cada uno de los actuadores. Permite un funcionamiento autónomo sin intervención del programa *Linmot-Talk*, manejando el actuador en varios modos de funcionamiento: modo de consigna analógica en posición, modo corriente, modo manual con potenciómetro y modo con movimiento sinusoidal.
- Ambos *Drives* disponen de una *interface* de comunicaciones denominado *ETHERCAT*. Permite, mediante conexión con cable de red y el citado protocolo *ETHERCAT*, la configuración y manejo del actuador desde un PLC o un PC que disponga de este protocolo de comunicación. Está tercera alternativa no se ha abordado hasta el momento.

Anexo 2.1: Modos de funcionamiento de la controladora - Drive

En función del modelo de *Drive* disponible hay distintos modos de gobierno sobre el actuador:

- Control en posición. Es el funcionamiento por defecto y el que está disponible en todos los modelos de *Drive Linmot*. En este modo, el *Drive* envía al actuador una señal de consigna de posición.
- Modos especiales, (denominados *Special mode* en *Linmot-Talk*). Existen dos tipos:
 - Comando (o modo) en corriente. Es la forma más directa y rápida de gobernar el actuador. El *Drive* envía directamente la consigna de corriente al motor. No existe ningún control sobre la posición del actuador.

De los dos *Drives* disponibles en el laboratorio, sólo el del actuador grande, el E1450-EC-QN-1S, admite el comando en corriente.

- Comando en velocidad. En este caso el *Drive* envía una consigna de velocidad al actuador. No existe ningún control sobre la posición del actuador, pero sí sobre la velocidad. Es una forma gobierno intermedia de las anteriores en cuanto a rapidez de respuesta.

Ninguno de los dos *Drives* disponibles admite el comando en velocidad.

Anexo 2.2: Diagrama de bloques simplificado de los modos de funcionamiento del motor lineal

Antes de pasar a la descripción de los parámetros de configuración del *drive* es de utilidad entender el funcionamiento básico de los dos modos disponibles: control en posición y comando (o modo) en corriente.

- CONTROL EN POSICIÓN (modo por defecto).

En este modo, el *drive* recibe una consigna de posición del actuador. Un encoder situado en el actuador supervisa la posición y la realimenta al *drive* mediante un lazo cerrado interno. En función de la señal de consigna y la posición medida por el encoder, un PID interno al *drive* calcula la corriente necesaria y la envía al actuador.

En el diagrama de bloques de la Figura A2.1 se muestra un esquema simplificado de funcionamiento del control en posición.

- COMANDO EN CORRIENTE (modo especial)

En este modo, el *drive* recibe una consigna de corriente que envía directamente al actuador. El lazo interno de realimentación de posición, así como el control PID interno no intervienen.

En el diagrama de bloques de la Figura A2.1 se muestra un esquema simplificado de funcionamiento del comando en corriente:

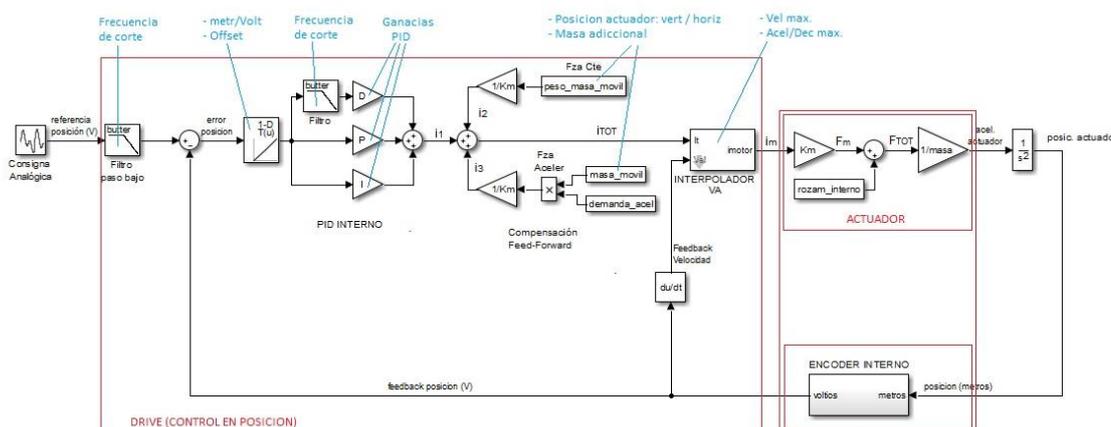


Figura A2.1. Diagrama de bloques simplificado del modo de funcionamiento: control en posición

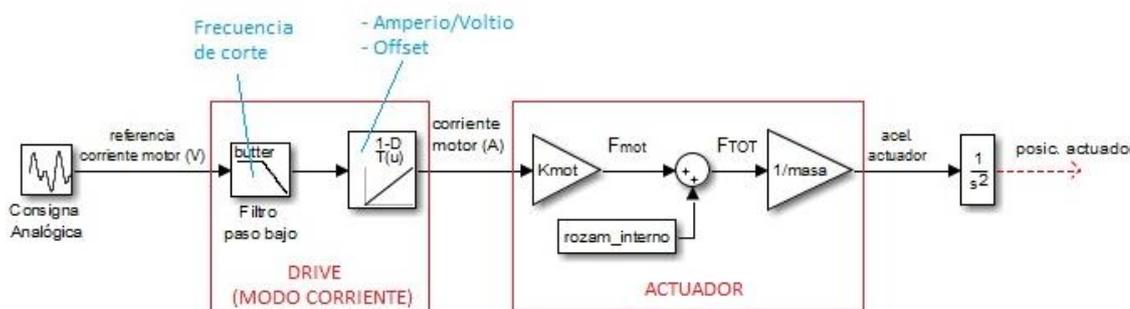


Figura A2.2. Diagrama de bloques simplificado del modo de funcionamiento: modo en corriente

En la zona superior de las Figuras A2.1 y A2.2, en color azul, se señalan los principales parámetros configurables vinculados con el bloque funcional sobre el que tiene efecto. Estos y otros parámetros adicionales se describirán en el Anexo 2.3.

Anexo 2.3: Configuración básica de parámetros en Linmot-Talk

En este anexo se describen los parámetros más importantes que conviene configurar para el funcionamiento de los actuadores.

La mayoría de los parámetros de configuración son comunes en ambos actuadores. En aquellos casos donde haya diferencias se particularizará para cada tipo.

Primeros pasos:

- Conexión con el Drive

Tras realizar correctamente las conexiones eléctricas y de comunicación, ejecutamos el *Linmot-Talk*. Para conectarse con el *Drive* hacemos *Login* en el menú y elegimos el interface de comunicación *RS232* con el puerto de comunicaciones correspondiente (*COM3*, para los ordenadores empleados en el laboratorio). Ver Figura A2.3.

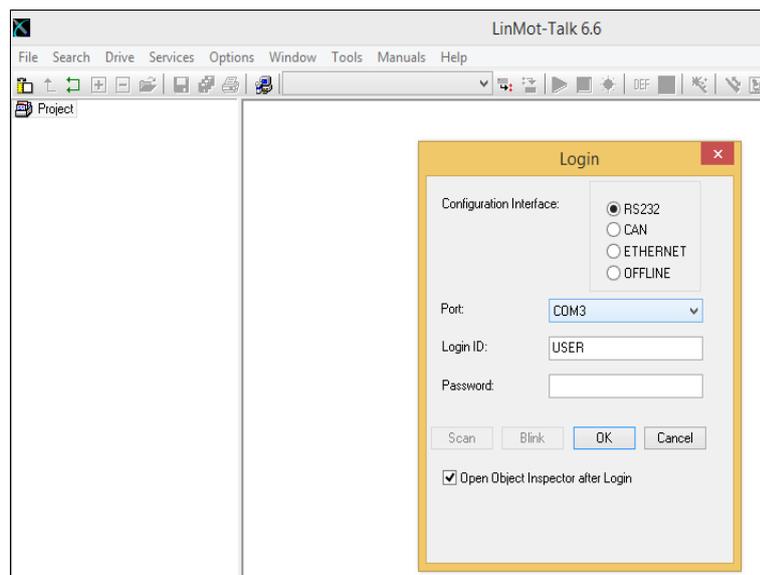


Figura A2.3.

- Instalación del Firmware

La primera vez que se utiliza el drive hay que instalar el Firmware. Se ejecuta esta opción en el menú *file* y se elige el archivo *Firmware_BuildXXX*. Durante la instalación, cuando se solicite *User Name* hay que escribir *SERVICE*.

Hay que instalar también la aplicación *EasySteps* en caso de que éste no se instale directamente con el firmware. Puede hacerse ejecutando de nuevo el archivo *Firmware_BuildXXX* y posteriormente el archivo *EasyStepsXXXXX* que se encuentra en la ruta: *Applications/EasySteps*.

- Añadir motor

El siguiente paso consiste en añadir nuestro actuador a la configuración del *Drive*.

Ejecutamos la opción “*Motor Wizard..*” (*Ctrl+W*) del menú y elegimos:

- Modelo de estator y de vástago.
- Tipo y longitud de cable de conexión entre *drive* y actuador
- *External position sensor* es la opción para utilizar un sensor de posición externo. No lo utilizamos por el momento.

El siguiente menú es importante (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En él se elige:

- Parte móvil del actuador: estator o vástago
- Ángulo de la posición de trabajo: 0°, 90°, etc.
- Masa añadida a la parte móvil.
- Fuerzas de fricción, en caso de que se conozcan.

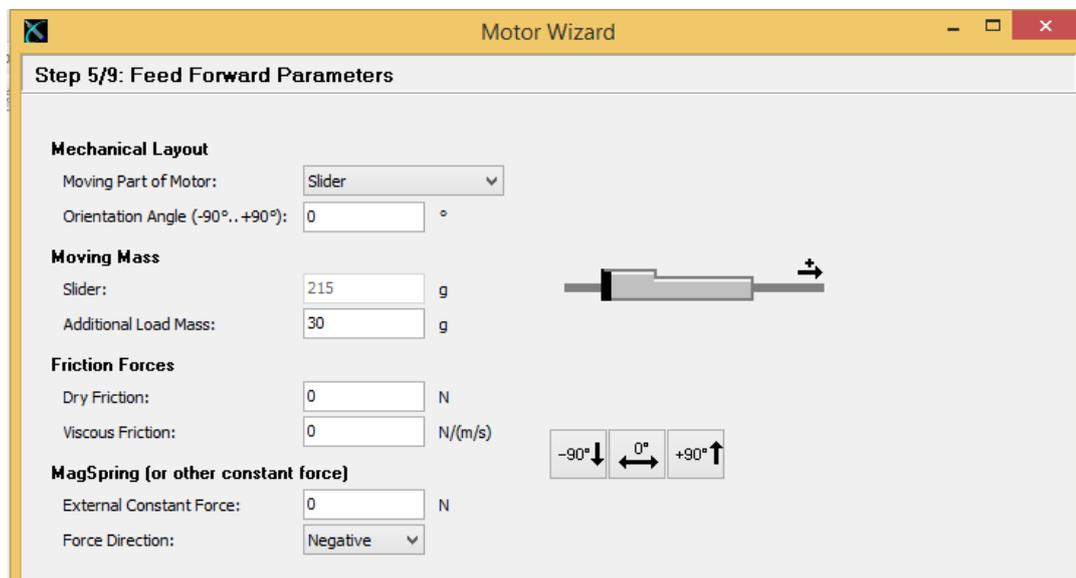


Figura A2.4.

Estos parámetros sirven para compensar efectos como la orientación del actuador, la masa móvil, etc y permiten al PID interno un cálculo más preciso de la corriente necesaria que debe enviar al actuador.

El siguiente menú permite escoger entre dos ajustes del PID interno. De momento lo dejamos por defecto y en un apartado posterior se describirá con más detalle.

Los tres menús siguientes hacen referencia al “*Homing*” o proceso de búsqueda de la posición 0 del sistema de referencia.

- En el primer menú se elige la velocidad del actuador durante este proceso y el modo. En cuanto al modo, habitualmente se elegirá “*Mechanical Stop Positive Search*” o “*Mechanical Stop Negative Search*”.
- El segundo menú hace referencia a distancias en el “*Home position*”.
- En el tercer menú se introducen los valores:
 - *Home position*: Será generalmente la mitad de la carrera del actuador con signo + si se elige el modo “*Mechanical Stop Positive*”, o con signo - si se elige el modo “*Mechanical Stop Negative*”.
 - *Initial position*: 0 mm generalmente

NOTA. El proceso de *Homing* consiste en que el actuador se mueve en un sentido (positivo o negativo dependiendo del modo elegido) hasta que encuentra una oposición mecánica (detectada cuando la corriente del motor supera un % de su corriente máxima). En este punto, el actuador establece como su posición el valor introducido en “*Home position*” e inmediatamente se mueve hasta que encuentra su “*Initial position*” (0 mm generalmente).

- Arranque y Home

Una vez terminado el proceso de añadir el motor se pulsa en las dos casillas junto a *Switch On*. En este momento el actuador queda alimentado y funcionando con control en posición. A continuación, se pulsa en las dos casillas junto a *Home* (Figura) y el actuador realiza el proceso de búsqueda de su posición cero, o proceso de *Homing*, descrito en el párrafo anterior.

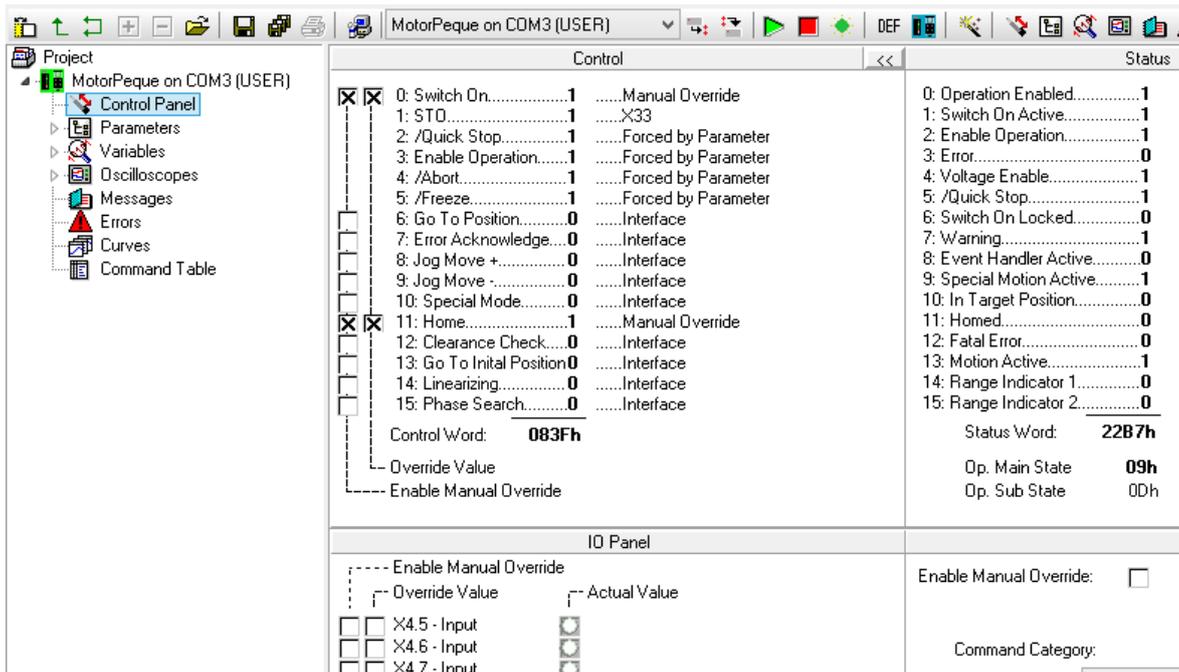


Figura A2.5.

Una vez finalizado el proceso se deselecciona alguna de las casillas de *Home* y el actuador está listo para trabajar.

Si el actuador no ha quedado bien centrado en la posición 0 mm, hay que modificar el parámetro “*Home position*”. Se encuentra en el árbol de carpetas de la izquierda de la pantalla en la ruta siguiente (ver Figura A2.6):

Parameters/Motion Control SW/State Machine Setup/Homing/Homing Position Config

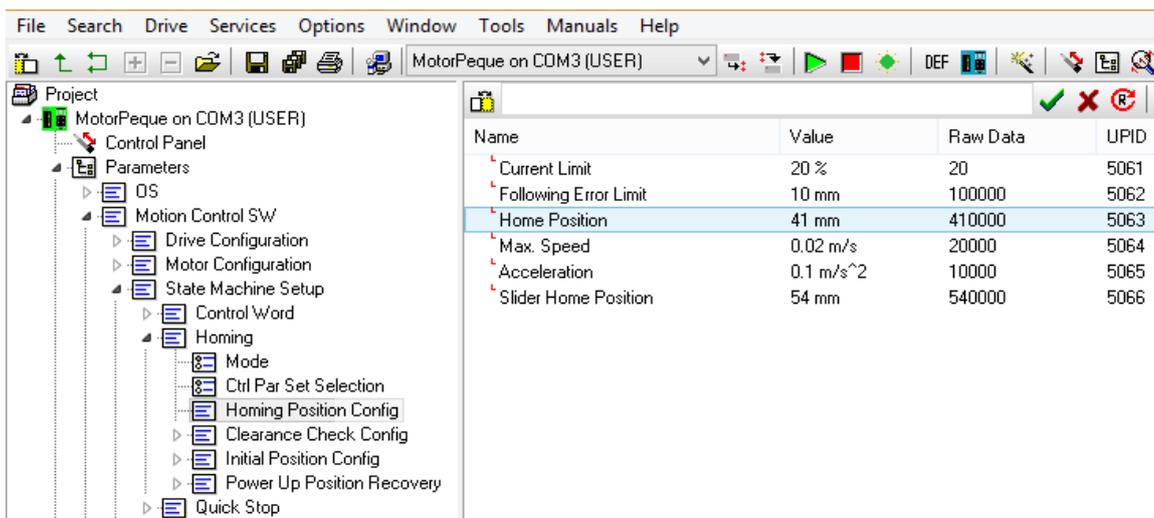


Figura A2.6.



También conviene reducir el valor de *Current Limit* al 20% por ejemplo. Con el valor de 100% que el programa asigna por defecto, el proceso de *Homing* es más brusco. No obstante, hay que tener la precaución de que el valor de corriente introducido no sea demasiado pequeño, ya que, si el actuador encuentra una resistencia mecánica importante al inicio del *Homing*, debido por ejemplo a un rozamiento estático grande, y para vencerlo el motor supera el valor introducido de *Current Limit*, el sistema entenderá que ha llegado al “*Mechanical Stop*”, asignará el valor de *Home position* y buscará la supuesta posición cero. Cuando se da esta situación, el usuario percibe que el actuador se mueve en sentido contrario al que debería, pero en realidad ya está en la fase de búsqueda de la supuesta posición cero. Si esto ocurre, lo normal es que el actuador llegue a hacer tope mecánico antes de encontrar ese “cero”, por lo que, por seguridad, se debe parar el proceso de *Homing*, revisar posibles agarrotamientos del actuador y aumentar si es preciso el valor de *Current Limit*.

Anexo 2.4: Parámetros básicos

A continuación, se describirán los parámetros más importantes para configurar el funcionamiento del actuador. Se describirán por el orden en que aparecen en el árbol de carpetas de la zona izquierda del menú.

- Motion Control SW / Drive Configuration / I/O Definitions (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

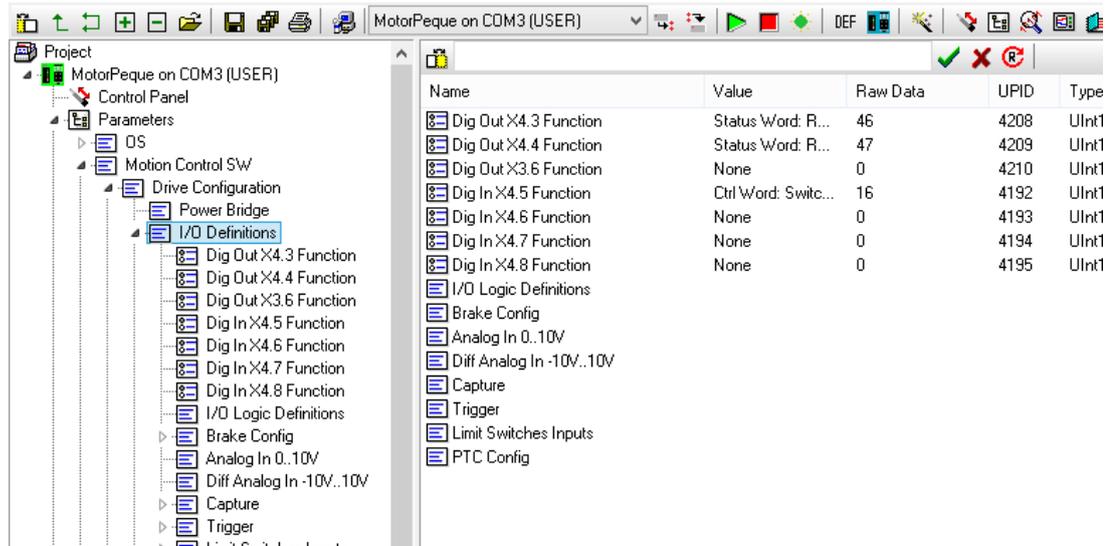


Figura A2.7.

- Dig In/Out X4.X Function.

Definen funciones específicas de las entradas y salidas digitales:

- *Dig In X4.5*: Asociada a *Ctrl Word Switch On*. Se emplea para activar el Switch On a través de la botonera externa.
- *Dig Out X4.3*: *Range Indicator 1*. Se activa esta salida digital cuando se cumple la condición de *Range Indicator 1*.
- *Dig Out X4.4*: *Range Indicator 2*. Se activa esta salida digital cuando se cumple la condición de *Range Indicator 2*.

Las condiciones de *Range Indicator* se definen en “*State Machine Setup*” del árbol de carpetas, y se detallará más adelante. Cada salida activa uno de los dos leds indicativos situados en la botonera. Estos leds informan sobre el modo de funcionamiento que se encuentra activo (entrada analógica o curva sinusoidal).

- Analog In 0..10V

Aquí se selecciona el *offset* y el filtro paso bajo de primer orden (definido en microsegundos de periodo de filtrado) de la señal de consigna introducida por la entrada analógica X4.9 en el *drive* pequeño o por la entrada X4.4 en el *drive* grande. Dichas entradas admiten valores entre 0 y 10 V respecto al común DGND (entrada X4.1 en ambos *drives*).

- Diff Analog In -10V..10V

Similar a la anterior (es decir *offset* y filtrado paso bajo) pero referido a la señal de consigna introducida por la entrada analógica diferencial (X20.3 – X20.6 en el *drive* grande). La entrada analógica diferencial admite valores entre +/-10 V.

El filtrado citado anteriormente corresponde al primer filtro paso bajo que aparece en el diagrama de bloques de la

Figura y Figura En función de la entrada analógica que se seleccione (0...10V o -10V..10V) se hará efectivo el filtrado y *offset* definidos para dicha entrada. El tipo de entrada analógica se selecciona en la carpeta "Motion Interface" y se describirá posteriormente.

Experimentalmente se ha comprobado que conviene elegir el periodo de filtrado más alto posible compatible con la frecuencia máxima que se quiere reproducir en el actuador. A mayor periodo de filtrado menor es el ruido que se percibe durante el funcionamiento del mismo.

- Motion Control SW/Motor Config. /Monitoring/Position Monitoring/Position Lag Always (Figura A2.8)

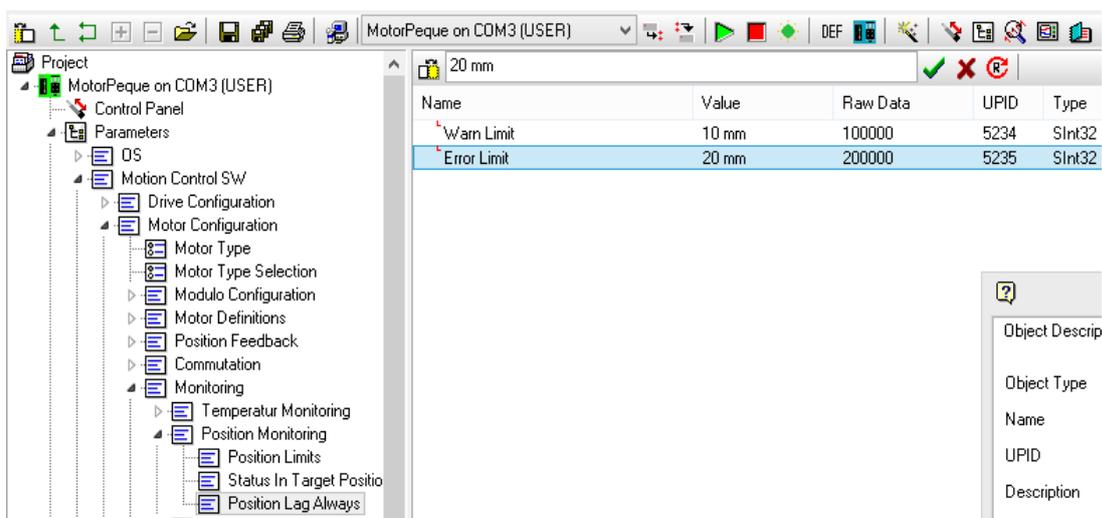


Figura A2.8.

Definen las desviaciones máximas permitidas entre la posición actual y la demandada.

- Warn Limit. Cuando esta desviación supera el valor introducido (10 mm en el caso de la Figura A2.8), se envía un mensaje de aviso.
- Error Limit. Cuando esta desviación supera el valor introducido (Figura A2.8, 20 mm), aparece el mensaje “*Error: Position Lag Always Too Big*” y se interrumpe la alimentación del motor. En caso de que aparezca este error durante el funcionamiento normal del actuador, con la consiguiente interrupción de su movimiento, se puede definir un valor de *Error Limit* más alto.
- Motion Control SW/State Machine Setup/Homing (Figura A2.9)

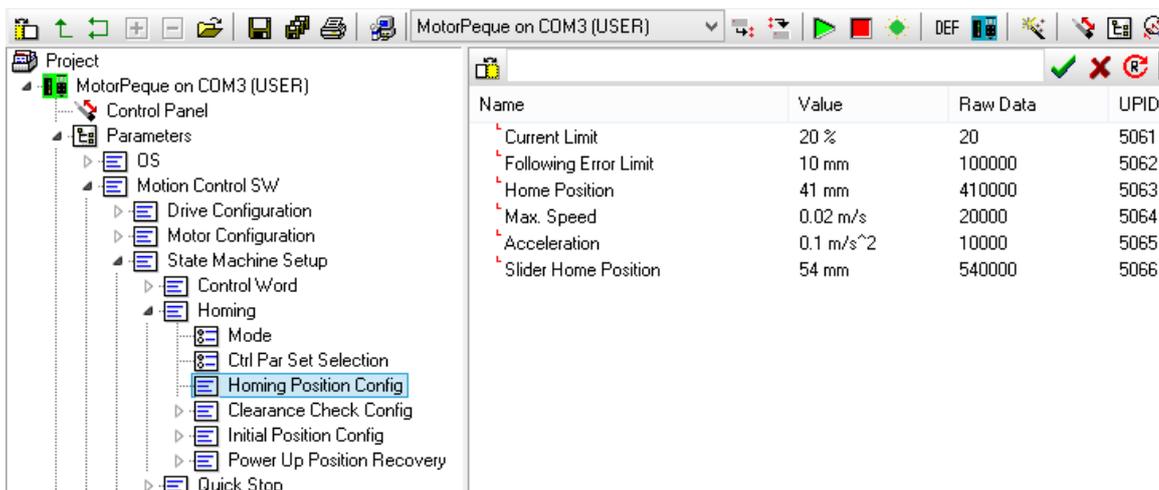


Figura A2.9.

Aquí se definen los parámetros del *Homing* en caso de que sea necesario modificarlos, según se señaló en el Anexo 2.3 apartado “Arranque y Home”.

- Mode. *Mechanical Stop Positive, Mechanical Stop Negative, etc.*
- Homing Position Config
 - *Current Limit*. Es el porcentaje de la corriente máxima.
 - *Home position*. Posición que asigna al actuador al alcanzar el “*Mechanical Stop*”. Generalmente será la mitad de la carrera.

- Motion Control SW/State Machine Setup / Special Mode

Aquí se elige los “*modos especiales*” citados en el Anexo 2.2, siempre y cuando el *drive* disponga de ellos. En el caso del *drive* disponible en el laboratorio para el actuador grande (E1450), sólo admite el comando en corriente.

En la Figura A2.10 se muestra el árbol de carpetas correspondiente al *drive* del actuador grande. En él aparecen los parámetros de ajuste del comando en corriente.

- *Mode*. Aquí se selecciona o no, la entrada analógica +/-10V como señal de consigna del comando en corriente (entradas X20.3 y X20.6 del drive E1450).
- *Current Command Config*. Sirve para definir la corriente de comando en amperios que corresponderían a 10 voltios en la señal de consigna. Este ajuste aparece en el diagrama de bloques de la Figura etiquetado como *Amperio/Voltio*

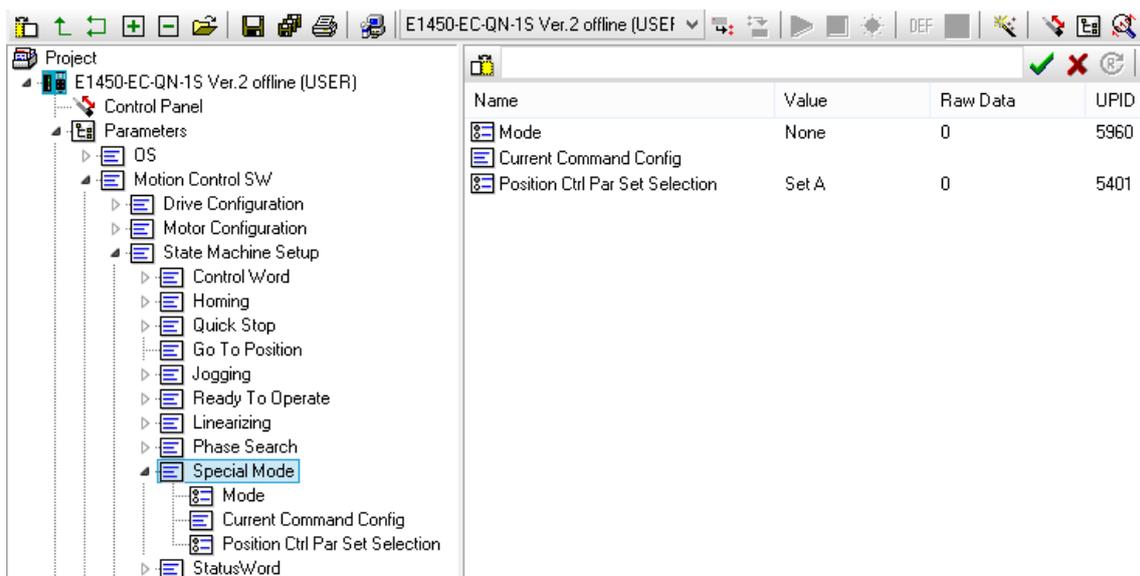


Figura A2.10.

- Motion Control SW/State Machine Setup / StatusWord

Aquí se definen los “*Range Indicator 1 y 2*”. Cada “*Range Indicator*” es un indicador de que un valor (definido como la diferencia de dos parámetros: *Minuend UPID – Subtrahend UPID*) está comprendido entre dos límites: *Low limit* y *High limit*. Cuando se cumple dicha condición se activa el *Range Indicator* correspondiente y la salida digital asignada a él. Las salidas asignadas a los *Range Indicator 1 y 2* son X4.3 y X4.4 en el drive pequeño y X4.5 y X4.6 en el *drive* grande.

En el caso particular de un *drive* pequeño, la configuración del *Range Indicator 1* ha sido la siguiente (Figura):

- *Minuend UPID*: 5200 (UPID correspondiente al *Run Mode*)
- *Subtrahend UPID*: 0 (No necesito restar ningún parámetro)
- *Low limit*: 4
- *High limit*: 5

De esta forma, *Range Indicator 1* se activa cuando el parámetro 5200: *Run Mode* adopta el valor 4 (señal de consigna de posición por la entrada analógica). Los distintos *Run Mode* se describen en la carpeta “*Motion Interface*”.

Al cumplirse la condición *Range Indicator 1* se activa también la salida X4.3, que está conectada a un led indicador de la botonera.

De manera similar *Range Indicator 2* está definido para activarse cuando se selecciona el modo de curva continua (parámetro 5200: *Run Mode* = 5).

Name	Value	Raw Data	UPID
Range Indicator 1 Minuend UPID	5200 (Run Mod...	5200	5256
Range Indicator 1 Subtrahend UPID	0	0	5257
Range Indicator 1 Low Limit Raw ...	4	4	5240
Range Indicator 1 High Limit Raw ...	5	5	5241

Figura A2.11.

- Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings (Figura A2.12)

Esta carpeta contiene parámetros de funcionamiento del *drive* con control en posición.

- *Run Mode Selection*: Permite elegir entre distintas formas de comando en posición. Sólo se han empleado las siguientes:
 - *Run Mode 1: Motion Command Interface*. El comando de posición se realiza desde una interface externa. Dado que hasta la fecha no hay configurado ninguno, esta opción se utiliza como modo de reposo del actuador.

- *Run Mode 4: Analog.* La consigna de posición es definida mediante la señal de consigna analógica (0..10V o bien -10V..10V)
- *Run Mode 5: Continuous curve.* El comando en posición es definido mediante una curva almacenada en la memoria del Drive, la cual se ejecuta continuamente. En la carpeta *Curves* (al final del árbol de carpetas) se pueden crear distintas curvas, y la elegida para ser ejecutada se selecciona en la ruta: *Motion Control SW/Motion Interface/Time Curve Settings*.

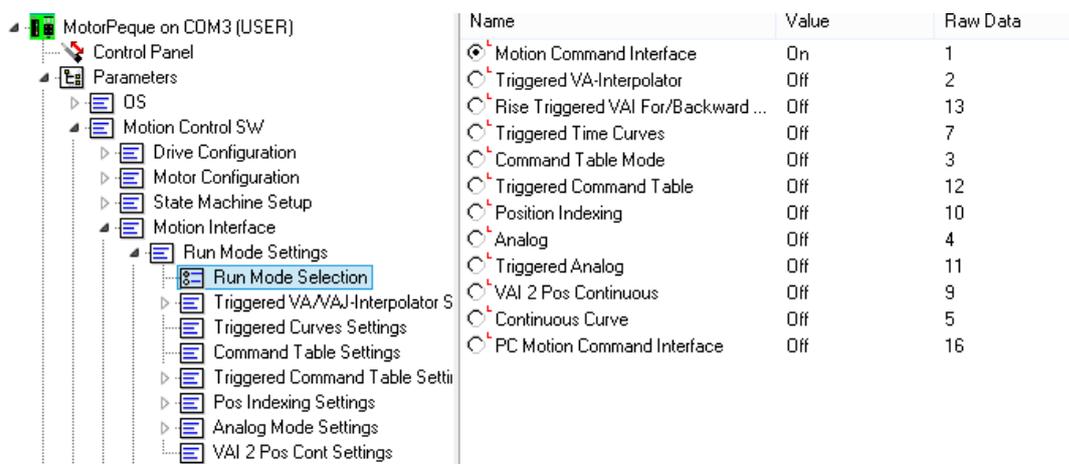


Figura A2.12.

En el momento en que se selecciona un Run Mode concreto, este comenzaría a ejecutarse siempre que estén activos los bits de estado “Operation Enabled” y “Homed” (visibles en la zona “Status” del panel de control). Figura A2.13.

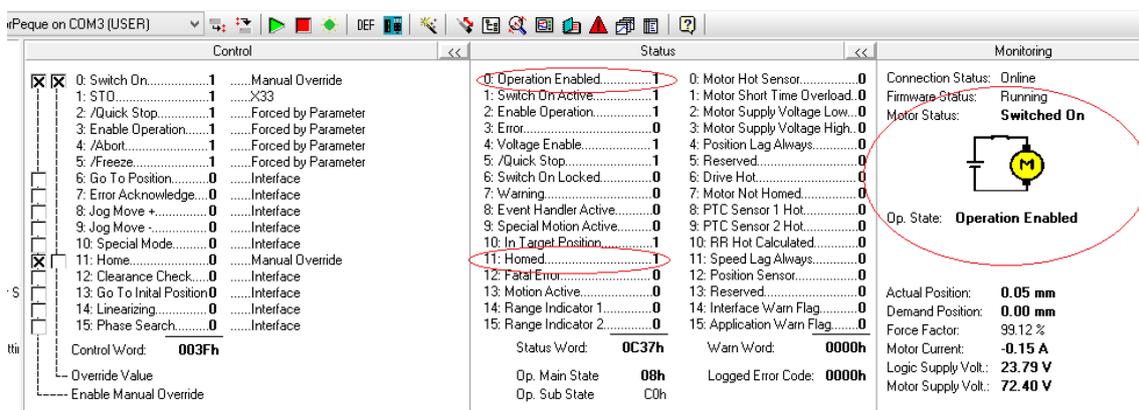


Figura A2.13.

○ *Analog Mode Settings*

- *Source Selection.* Aquí se elige la entrada de consigna analógica que se quiere utilizar:
 - 0..10V Entrada X4.9 respecto a DGND (X4.1)
 - -10V..10V Entrada diferencial X4.10, X4.11

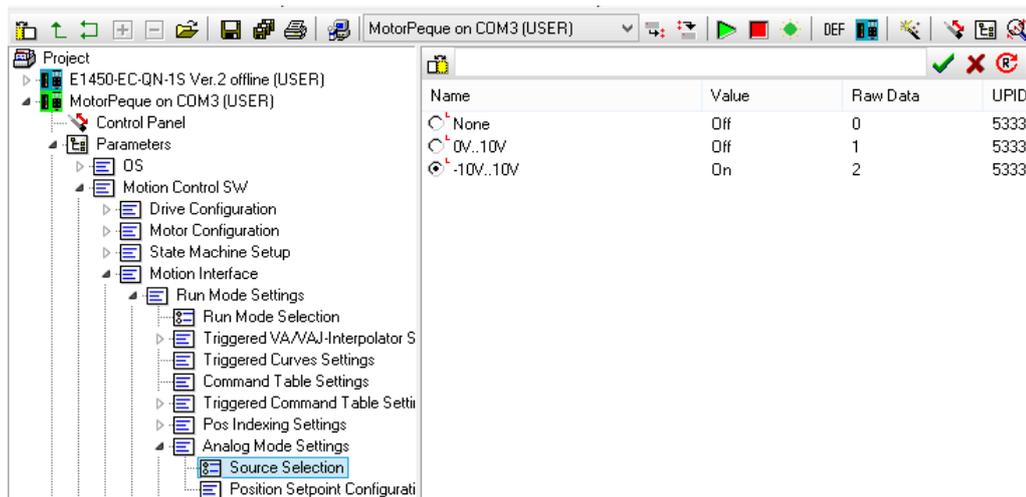


Figura A2.14.

- *Position Setpoint Configuration.* Se definen los valores de posición en mm correspondientes a los valores de tensión mínimo y máximo de la entrada analógica:
 - Valor mínimo: 0/-10V (según el *Source Selection* elegido)
 - Valor máximo: 10V.

Este ajuste aparece etiquetado como “metr/Volt” en la Figura A2.1.

- Motion Control SW/Motion Interface/Predef VA/VAJ Interpolator (Figura A2.15)

Aquí se seleccionan los valores de velocidad, aceleración y deceleración máximas del actuador. Dentro del diagrama de bloques de la Figura, se localiza este ajuste en la parte derecha asociado al bloque “INTERPOLADOR VA”.

Estos parámetros, especialmente aceleración y deceleración máximas, pueden emplearse como filtros paso bajo. Se aconseja utilizar el menor valor posible de aceleración y deceleración máximas para reducir el ruido en el funcionamiento del actuador, pero sin llegar a limitar los requerimientos de la dinámica propia del movimiento del actuador.

- Para un actuador pequeño se utilizaría 10 m/s de velocidad máxima y 50 m/s² de aceleración y deceleración máximas.
- Para nuestro actuador grande, debido a su mayor inercia, se han utilizado valores menores: 2 m/s de velocidad máxima y 15 m/s² de aceleración y deceleración máximas.

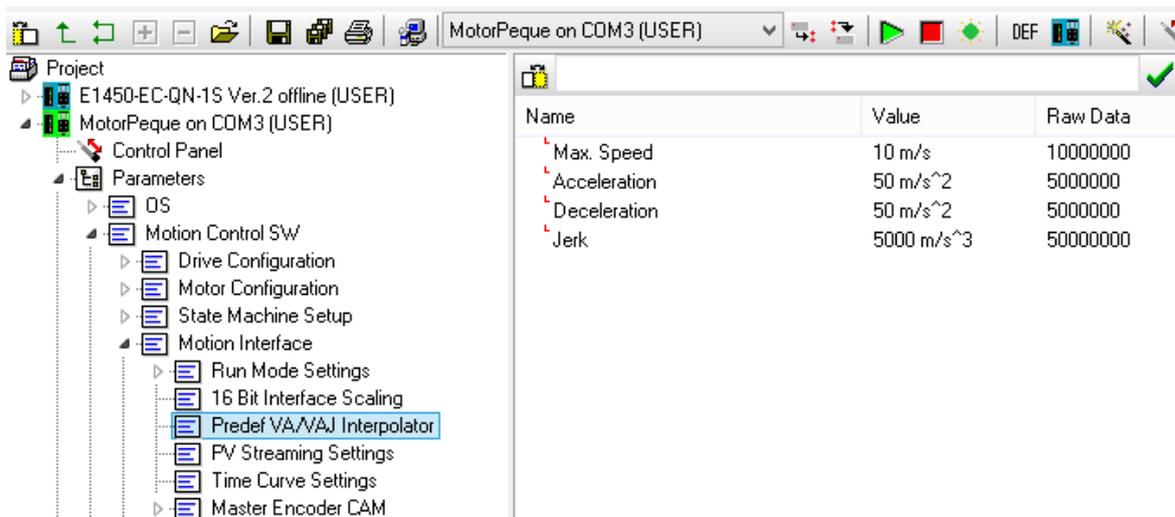


Figura A2.15.

- Motion Control SW/Motion Interface/Time Curve Settings (Figura A2.16)

En este menú se selecciona cuál de las curvas creadas en la carpeta “Curve” será ejecutada cuando se seleccione el *Run Mode 5: Continuous Curve*.

- *ID*: Numero de curva de entre las existentes en la carpeta “Curve”
- *Offset*: Offset de la curva seleccionada
- *Amplitude Scale*: Ajuste de amplitud respecto a la de la curva original. El máximo valor permitido es 2000%
- *Time Scale*: Ajuste de la escala de tiempo. Suponiendo una curva sinusoidal, a mayor valor, mayor es la frecuencia de la curva. El máximo valor permitido es 200% (doble de la frecuencia de la señal original).

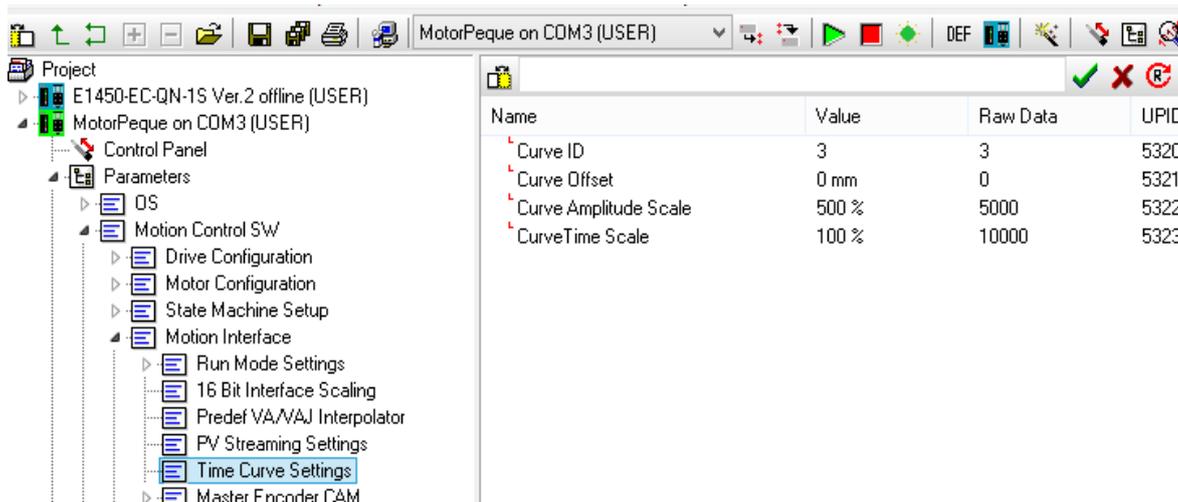


Figura A2.16.

- Motion Control SW/Position Controller

Este apartado hace referencia al PID del lazo de control interno de posición.

- *Ctrl Par Set Selection* (Figura A2.17).

Existen dos configuraciones por defecto del PID: Set A y Set B. Set A ofrece una respuesta más rápida del actuador, pero se ha experimentado que genera demasiado ruido, por lo que es preferible escoger Set B.

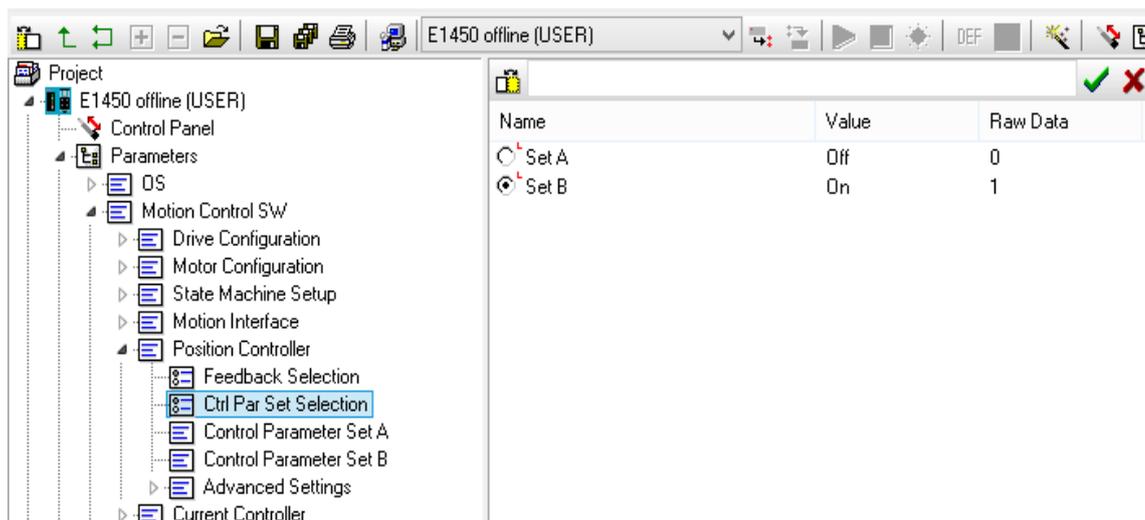


Figura A2.17.

- *Control Parameter Set X* (Figura A2.18). Aquí aparecen todos los parámetros de ganancias y otros ajustes del lazo de control, para cada una de dos configuraciones.

Name	Value	Raw Data
FF Constant Force	0 A	0
FF Friction	0 A	0
FF Spring Compensation	0 A/m	0
FF Damping	0 A/(m/s)	0
FF Acceleration	0.052 A/(m/s ²)	52
Spring Zero Position	0 mm	0
P Gain	8.5 A/mm	85
D Gain	5 A/(m/s)	50
D Filter Time	20000 us	20000
I Gain	0 A/(mm*s)	0
Integrator Limit	34 A	34000
Maximal Current	34 A	34000
Maximal Current Positive	40 A	40000
Maximal Current Negative	40 A	40000
Noise Deadband Width	0 mm	0

Figura A2.18.

Los parámetros más importantes se describen a continuación.

- *P Gain, D Gain, I Gain*: Ganancias del controlador Proporcional, Derivativo e Integral respectivamente. En el Set A las ganancias son mayores que en el Set B. Estos valores pueden modificarse buscando una mejor respuesta del actuador. Por lo que experimentado se aconseja que, una vez elegido Set B, se redefinan las ganancias P, I, D a un valor intermedio entre las de Set A y Set B que aparecen por defecto.
- *D filter Time*. Se establece el periodo de filtrado (definido en términos de microsegundos) del filtro paso bajo de la señal de error. Este filtro sólo se aplica al componente derivativo.

Puede dejarse el valor que aparece por defecto o establecer el mismo valor de filtrado que el definido en el filtro de la señal de consigna (localizado en: *Motion Control SW / Drive Configuration / I/O Definitions*).

Las ganancias citadas anteriormente, así como el filtro anterior aparecen en el diagrama de bloques de la Figura, vinculados al conjunto PID INTERNO.

- *FF Constant Force*. Corriente que se añade a la salida del PID para compensar la fuerza constante debida al peso propio de la masa móvil cuando el actuador trabaja en posición vertical (masa móvil = masa de la parte móvil del actuador + masa adicional).
- *FF Acceleration*. Corriente que se añade a la salida del PID para compensar las fuerzas de inercia debidas a las aceleraciones de la masa móvil (parte móvil del actuador + masa adicional)

Estas dos componentes *FF* (Feed-forward), son calculadas por el *Linmot-Talk* automáticamente al configurar el actuador en el Anexo 2.3 “Añadir motor”.

(“Motor Wizard..” (Ctrl+W)) cuando se introducen las opciones: *Moving Part of Motor*, *Orientation Angle* y *Additional Load Mass*.

Hay que señalar que sólo la configuración Set A, incorpora estas componentes *FF*. No obstante, y dado que es recomendable elegir la configuración Set B, se aconseja incorporar a dicha configuración el valor de la componente *FF Constant Force* que aparece en la configuración Set A. No se recomienda, sin embargo, definir ningún valor para *FF Acceleration* ya que se ha constatado que introduce un ruido desagradable.

Ambos parámetros de ajuste *FF* se muestran etiquetados en el diagrama de la

Figura encima del conjunto “Compensación Feed-Forward”.

- *FF Friction*, *FF Spring Compensation* y *FF Damping*. Parámetros que hacen referencia respectivamente a la compensación de fuerzas de rozamiento, fuerzas elásticas y fuerzas de amortiguamiento. Pueden definirse en el caso de que sean conocidos.

- Easy steps

Es una aplicación complementaria de Linmot-Talk y contiene funciones adicionales de mucha utilidad. Para poder disponer de esta aplicación es necesario instalar el módulo adicional “Easy Steps” en el proceso de instalación del Firmware, o añadirlo posteriormente tal como se citó en el Anexo 2.3/PRIMEROS PASOS / Instalación del Firmware.

Una vez instalado, las funciones de “Easy Steps” aparecen en el árbol de carpetas dentro de la sección “Parameters” (Figura A2.19).

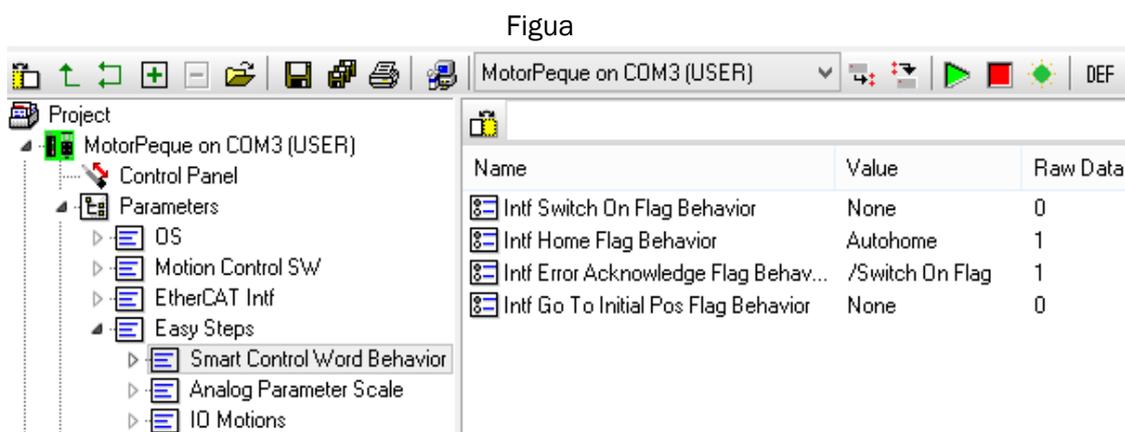


Figura A2.19.

Las funciones más útiles se describen a continuación:

- *Smart Control Word Behaviour.*

Son funciones que permiten automatizar ciertos procesos básicos. Las más útiles se describen a continuación:

- *Intf Switch On Flag Behaviour.*

Al activar esta opción, cuando se enciende el *drive* se activa automáticamente “Switch On”. Esta función no se ha utilizado.

- *Intf Home Flag Behaviour.*

Al habilitar esta opción, cuando se activa “Switch On” por primera vez después de encender el *drive*, el actuador realiza automáticamente el proceso de *Home* y lo deja en estado operativo con el *Run Mode* que tuviera configurado por defecto.

- *Intf Error Acknowledge Flag Behaviour*

Al habilitar esta opción, se reconocen automáticamente los errores existentes al desactivar “Switch On”.

- Analog Parameter Scale

Es una función muy interesante que permite ajustar parámetros de configuración del actuador mediante las entradas analógicas del *drive*. En los dos *drives* disponibles, *Linmot-Talk* sólo permite modificar dos parámetros de este modo. En el caso del *drive* pequeño, *C1250*, dado que una de las entradas analógicas ya se emplea como señal de consigna (habitualmente X4.10/X4.11), sólo quedaría disponible una entrada analógica (X4.9) para ser utilizada con esta finalidad.

Utilizando la entrada X4.9, se configura de la siguiente manera: (Figura A2.20)

- *UPID*: Código del parámetro que se quiere modificar
- *0V Scale*: Valor del parámetro cuando la entrada X4.9 es 0V
- *10V Scale*: Valor del parámetro cuando la entrada X4.9 es 10V

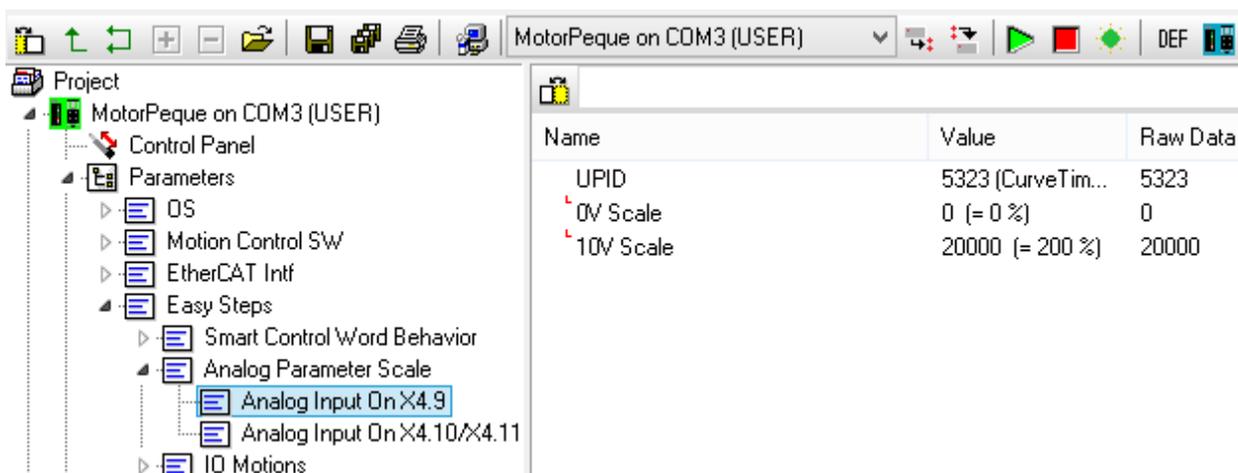


Figura A2.20.

- IO Motions

Sirve para asignar ciertas funciones a las entradas digitales. Es algo similar a la definición de funciones que se realiza en la sección Motion Control SW / Drive Configuration / I/O Definitions, aunque se diferencian de estas en las funciones que aparecen disponibles, y en que la función seleccionada se activa con un flanco ascendente en la entrada digital correspondiente. En el caso de que la misma entrada se haya definido en ambas secciones, tiene prevalencia la definición realizada en esta última frente a la definición realizada en EASYSTEPS / IO Motions.

En nuestro caso, sólo se ha empleado esta funcionalidad para ejecutar la tabla de comandos (Command Table), una herramienta muy útil que se describirá posteriormente. Para ello se selecciona la entrada que se quiere utilizar (por ejemplo, la X4.5) y se configura de la siguiente manera:

- 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*”.
- Variables
 - En esta sección pueden visualizarse todas las variables existentes. Están agrupadas por carpetas. Activando el icono  se muestra en tiempo real el valor de las variables de la carpeta seleccionada.
 - La carpeta “*MC SW Overview*” contiene variables generales de funcionamiento del actuador como posición y velocidad real, valores de comando de posición, velocidad, aceleración y corriente, etc.
 - En la carpeta “*User Defined*” el usuario elige las variables que quiere visualizar, introduciendo su código de identificación *UPID*.
 - Una opción interesante es poder visualizar variables en la parte derecha del panel de control. Para ello hay que pulsar “*Add Variable*” en esta zona del panel de control, seleccionar la carpeta correspondiente y pulsar dos veces en la/s variable/s deseada/s.
- Curves
 - Aquí se crean las curvas que posteriormente, se utilizan como consigna de posición del actuador cuando se selecciona *Run Mode 5: Continuous Curve*.
 - El menú existente permite crear curvas sencillas, aunque resulta más práctico importar un archivo *.csv* con una curva previamente creada con otros programas (*Excel, Matlab, etc*).
 - Una vez creadas o importadas las curvas deseadas, deben “arrastrarse” a la ventana inferior del menú para posteriormente ser cargadas en el *drive* con la opción *Download into Drive*.

Anexo 2.5: Tabla de comandos (command table)

Está compuesto por una serie de líneas de órdenes o comandos, que permiten programar secuencias de movimientos u otras acciones.

En cada línea de la tabla de comandos se define la acción a realizar y así como la siguiente línea de comando en ser evaluada. Esto último permite ejecutar una sucesión de acciones.

Los comandos están clasificados en grupos. Algunos de los más utilizados han sido:

- Comandos de movimiento: Go to Pos., Go to Analog Pos
- Comandos de asignación de parámetros y/o variables temporales:
 - *Write Live Parameter*. Para modificar el valor de un parámetro, el cual se define por su UPID.
 - *Write UPID RAM value to CMD Table Var1*. Guarda en la variable temporal *Var1*, el valor de un determinado parámetro, definido por su UPID.
 - *Write CMD Table Var1 to UPID RAM value*. Asigna a un parámetro, definido por su UPID, el valor guardado en la variable temporal *Var1*
- Comandos de condiciones:
 - *If CMD Table Var1 Less Than*. Ejecuta una línea de comando u otra dependiendo si se cumple una determinada condición. En este caso particular, la condición es que la variable temporal *Var1* es menor que un determinado valor.
 - *Wait Time*. Espera un tiempo antes de ejecutar la siguiente línea de comando definida en la secuencia.

La tabla de comandos se ha empleado para programar secuencias de acciones que son activadas por medio de las entradas digitales del drive a través de la botonera externa. Cuando se modifica la tabla de comandos hay que cargarla al drive (Upload into drive) para que se haga efectiva.

Las funciones implementadas mediante la tabla de comandos han sido:

- Activación de un *Run mode* u otro
- Modificación de la amplitud de la señal sinusoidal de consigna en el modo “Curva Continua”.

De las líneas 1 a la 8 y de la 31 a la 35, se define una secuencia de comandos que modifican de forma cíclica el Run Mode por cada pulsación que se hace de la entrada digital X4.6. La secuencia de los distintos Run Mode que se van activando por cada pulsación de dicha entrada digital es la siguiente:

- UPID 5200 = 1 (*Run Mode: Motion Command Interface*). Modo Reposo.
- UPID 5200 = 4 (*Run Mode: Analog*) & UPID 5333 = 1 (*Source Selection: 0..10V*). Modo Analógico manejado con la señal de consigna a través de la entrada X4.9, procedente del potenciómetro de la botonera externa.
- UPID 5200 = 4 (*Run Mode: Analog*) & UPID 5333 = 2 (*Source Selection: -10V..10V*). Modo Analógico con señal de consigna a través de las entradas X4.10/X4.11, procedente de una consigna externa (cable con conector BNC)
- UPID 5200 = 5 (*Run Mode: Continuous Curve*). Modo Curva Continua.
- Vuelve de nuevo al primer Modo.

De la línea 10 a la línea 18, cuando está activo el modo Curva Continua, con cada pulsación de la entrada digital X4.7 se incrementa un 10% la amplitud de la curva, hasta llegar a un máximo del 2000% de la amplitud de la curva original. De la línea 20 a la línea 29, cuando está activo el modo Curva Continua, con cada pulsación de la entrada digital X4.8 se disminuye un 10%, la amplitud de la curva, hasta llegar a un mínimo del 10% de la amplitud de la curva original.

Anexo 2.6: Manejo del estator con Linmot-Talk

Arranque y homing

A continuación, se enumeran los pasos para arrancar y dejar el estator operativo desde el panel de control de Linmot-Talk:

- Conectar la alimentación del *drive*
- Activar “*Switch On*”. Desde el panel de control, hay que seleccionar las dos casillas que aparecen junto a dicha acción (dentro de la zona etiquetada como “*Control*”). Si no ha habido ningún conflicto debe visualizarse “*Motor Status: Switched On*” en la parte derecha del panel de control, etiquetada como “*Monitoring*” (ver Figura A2.13).
- Activar “*Home*”. Desde el panel de control, igual que antes, es necesario seleccionar las dos casillas correspondientes.
- Una vez finalizado el proceso de *Homing*, se deselecciona “*Home*”.
- A partir de este momento el estator queda operativo en el modo de funcionamiento que esté seleccionado en el parámetro *Run Mode*.
- Para detener el motor hay varias alternativas:
 - Desactivar *Switch On*. De este modo el actuador se queda sin alimentación, por lo que hay que tenerlo en cuenta especialmente si está trabajando en posición vertical.
 - Seleccionar “*Go to Initial Position*” o “*Go to Position*”. El actuador se mueve a la posición 0 o la que se le defina previamente y se mantiene en ella. Estas órdenes prevalecen por encima de otras consignas de posición que reciba el actuador.
 - Seleccionar un *RunMode* inactivo. Por ejemplo, si el actuador está funcionando en modo Analógico o Curva Continua, y se selecciona “*Motion Command Interface*” o “*PC Motion Command*”, el actuador se detendrá y se mantendrá inactivo, pero manteniendo su posición.

Las dos últimas alternativas mencionadas permiten una parada más segura que la desactivación del *Switch On*, cuando el actuador trabaja en vertical, ya que en ellas el motor sigue alimentado y mantiene su posición.

Anexo 2.7: Configuración por defecto para uso normal del actuador

La configuración que debería tener el drive por defecto es aquella que permite su manejo indistintamente mediante el programa Linmot-Talk o mediante la botonera. Para ello, el modo de funcionamiento por defecto debe ser el modo analógico con consigna de posición a través de BNC y por la entrada $\pm 10V$ del drive. El drive debería conservar esta configuración si el usuario no ha hecho ninguna modificación.

Si algo no funciona como se espera, hay que revisar los parámetros siguientes:

- *Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings/RunMode.*
Debe estar en “Analog”.
- *Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings/ Analog Mode Settings /Source Selection.*
Debe estar en “-10...10V”.
- *Motion Control SW/Motion Interface/Predef VA/VAJ Interpolator.*
 - Los valores comunes para el Linmot grande son:
 - Vel. Max: 2 m/s
 - Acel. Dec. Max: 15 m/s²
 - Los valores comunes para el Linmot pequeño son:
 - Vel. Max: 10 m/s
 - Acel. Dec. Max: 50 m/s²

Anexo 3: Cambios de configuración del actuador

Es frecuente que se desee cambiar el ángulo de orientación del actuador (por ejemplo, de posición horizontal a vertical o viceversa), o se quiera añadir o reducir peso adicional a la masa móvil. En estos casos el proceso para ajustar la configuración es el siguiente:

1. Ir a la carpeta “*Motion Control SW/Position Controller/Control Parameter Set B*” y apuntar los valores existentes de “P Gain, D Gain, I Gain”.
2. Ejecutar la opción “*Motor Wizard..*” (*Ctrl+W*) del menú (icono  en la barra superior) y modificar estos parámetros tal como se señaló en el Anexo 2.3: “*Configuración básica de parámetros en Linmot-Talk/PRIMEROS PASOS/Añadir motor*”.

Justo antes de finalizar la configuración del actuador dentro de “*Motor Wizard..*” (*Ctrl.+W*), aparece una ventana donde nos avisa que la configuración seleccionada es diferente a la que el programa asigna por defecto respecto a los parámetros siguientes:

- *Ctrl. Par Set*. Nos informa que está seleccionada Set B mientras que el valor por defecto es Set A
- *Home Current Limit*. Nos informa que está seleccionada como límite de corriente para el proceso de *Home* un valor distinto al que tiene por defecto, que es 100%.

Si no hacemos nada y aceptamos los cambios, el programa retornará a los valores por defecto. Dado que queremos conservar estos parámetros como están, hay que deseleccionar estos cambios antes de pulsar aceptar/finalizar.

3. Ajustar los parámetros del PID interno de posición:

Ir a la carpeta: *Motion Control SW/Position Controller/Control Parameter Set*

- *FF Constant Force*.

Si hemos cambiado la configuración referida a la orientación del actuador o la referida a la masa móvil, el sistema habrá recalculado el parámetro *FF Constant Force*. Cuando el actuador trabaja en vertical es recomendable tenerlo en consideración, y dado que el Set B no lo incluye, habrá que copiar el valor que aparece en: *Motion Control SW/Position Controller/Control Parameter Set A* y pegarlo en el de *Set B*.



- P Gain, D Gain, I Gain.

Si estos valores de ganancias han cambiado al haber modificado la configuración del actuador (compararlos con los apuntados en el Anexo 2.1), es recomendable redefinir las ganancias P, I, D a un valor intermedio entre las de Set A y Set B que aparecen por defecto. Si no se han modificado, dejarlos como están.

- SETA DE EMERGENCIA: Interrumpe la alimentación del actuador. En caso de que el actuador trabaje en posición vertical, debe preverse una sujeción de la parte móvil (con resortes, por ejemplo), para evitar su caída brusca en caso de activar la “Seta”
- INTERRUPTOR BOTONERA: Al conectarlo, se enciende el LED indicador en color verde, se inicia el proceso de *Home*, y al terminar este, el actuador queda activo en el modo *analógico-BNC*. También queda encendido el LED indicador del modo *BNC*.
- SELECTOR DE MODO: Con cada pulsación de éste, se va pasando de forma cíclica por los distintos modos de funcionamiento y siempre con control en posición. Los modos que van apareciendo con cada pulsación son los siguientes:

- Modo Analógico-BNC (modo por defecto)

En este modo, la consigna de posición del motor es definida a través de la señal en voltios introducida por el puerto BNC, el cual está cableado directamente a la entrada analógica diferencial -10V...10V del *drive*. Las posiciones extremas del actuador para -10 y 10 V se definen en la ruta: *Motion Control SW / Motion Interface / Run Mode Settings / Analog Mode Settings / Position Setpoint Configuration*. Los valores introducidos en la última configuración realizada en el programa fueron de -150 y 150 mm respectivamente, los cuales abarcan prácticamente la totalidad de la carrera sin llegar a sus topes.

- Modo Analógico Manual

En este modo, la posición del estator se define con la posición del “POTENCIOMETRO MANUAL/FRECUENCIA”, (ver la figura anterior). Dicho potenciómetro envía un voltaje de 0 a 11 V (*) por la entrada analógica X4.4. (*Nota aclaratoria: La entrada X4.4 admite valores de 0 a 10V, pero se ha empleado una fuente de alimentación de 12V, regulando su voltaje de salida al mínimo: 11V).

Las posiciones extremas del estator para 0 y 10 V coinciden con los de la entrada BNC, y se definen en la misma carpeta: *Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings/Analog Mode Settings/Position Setpoint Configuration*.

Cuando está activo este modo, no se enciende ningún LED indicativo.

- Modo Curva Continua o Curva Sinusoidal.

En este modo, la posición del estator sigue, de forma continua, la curva número 2, previamente cargada en el *Drive*. Dicha curva corresponde a una función sinusoidal de frecuencia 5 Hz y amplitud 10mm. Por ello a veces se referirá a este modo como *Curva Sinusoidal*. Además, se enciende el LED indicativo *modo Curva*.

- **POTENCIOMETRO MANUAL/FRECUENCIA:** En el modo de funcionamiento Curva, este potenciómetro modifica la frecuencia de la señal sinusoidal. Los valores correspondientes al máximo y mínimo del potenciómetro se configuran en la carpeta: EASY STEPS/Analog Parameter Scale/Analog Input on X4.4.
- **AMPLITUD – AMPLITUD +:** Sirven para modificar la amplitud de la señal sinusoidal. Por cada pulsación de uno de los botones, la amplitud disminuye o aumenta un 20% respecto a la amplitud de la curva original. Se puede cambiar el valor de este incremento de amplitud modificando la tabla de comandos.

Por razones de seguridad, en el caso de que el potenciómetro se encontrase en una posición de una frecuencia elevada en el momento de activar el modo sinusoidal, para evitar situaciones inesperadas este modo comienza con la amplitud mínima.

- **INTERRUPTOR MODO CORRIENTE.** Al accionar dicho interruptor con la botonera encendida, el actuador pasa a modo de funcionamiento en corriente, sea cual sea el modo de control en posición que se encuentre activo (BNC, manual o sinusoidal). Con el modo en corriente activo:
 - Se enciende el LED indicativo de dicho modo.
 - La señal de consigna queda definida exclusivamente por la entrada BNC.
- **POTENCIOMETRO AMPLITUD MODO CORRIENTE:** Modifica la relación amperios motor/voltios de consigna BNC. Sólo tiene efecto cuando está activado el modo corriente. Los valores mínimo y máximo de dicha relación se determinan en la carpeta EASY STEPS/Analog Parameter Scale/Analog Input on X4.7.

Dado que en el modo en corriente no hay control sobre la posición del actuador, resulta difícil prever el recorrido que va a efectuar este para una señal de consigna determinada (consigna de corriente). Por ello es recomendable, por seguridad, colocar este potenciómetro en una posición baja antes de enviar la señal de consigna al *drive*. Una vez enviada, se irá aumentando la relación *amperios/voltios* en función de cuanto se mueva el actuador. Con el potenciómetro en posición máxima dicha relación corresponde a: 10 Voltios consigna ↔ 10 Amperios motor, es decir la corriente que realmente le llega al motor coincide con la señal en la entrada BNC.

Anexo 4.2: Precauciones de uso

1. Antes de arrancar la botonera, el puerto BNC debe estar siempre conectado, bien a un puerto de salida del SIRIUS o bien al conector BNC macho que lleva incorporado en el maletín. La finalidad es garantizar un valor de consigna 0 V en dicha entrada analógica, en el momento en el que el sistema arranca en su modo de funcionamiento por defecto. Si se deja el puerto BNC “al aire”, no se pueden garantizar 0V de consigna y según la experiencia previa, el actuador arranca bruscamente tras el proceso de *Home*.
2. Antes de activar el modo *Curva sinusoidal*, hay que revisar la posición del potenciómetro de frecuencia, ya que el actuador se moverá, desde el primer momento, a la frecuencia definida por dicho potenciómetro.

Para corregir posibles despistes a este respecto, la primera vez que se activa el modo *Curva*, (entendiendo como primera vez, la primera activación después del encendido del *drive*) la curva comienza con amplitud mínima, pero las posteriores veces que se active el modo *Curva*, la amplitud inicial será la que haya quedado fijada la última vez.

3. Consideraciones al pasar de *modo corriente* a control en posición o al desconectar el *modo corriente*:
 - Si se desconecta el interruptor de modo corriente con la botonera encendida, el actuador pasa a control en posición de forma muy violenta.
 - La manera de evitar este golpe es seguir la secuencia siguiente:
 - Apagar la botonera (apagar interruptor *SWITCH ON*)
 - Desactivar el modo en corriente
 - Encender de nuevo la botonera (si se desea trabajar con control en posición).

Anexo 4.3: Mejoras futuras de diseño

1. El golpe experimentado al desactivar el modo en corriente descrito en el Anexo 4.2, puede eliminarse añadiendo dos relés en el cableado de la botonera, de forma que el interruptor del modo corriente solamente tenga función de activación, y su desactivación sólo sea posible desconectando la botonera. Con esta modificación sería más lógico reemplazar el interruptor del modo corriente por un pulsador.
2. Como se mencionó en el Anexo 4.2, en la primera activación del modo *Curva Sinusoidal* el actuador comienza con amplitud mínima, pero no así en las siguientes activaciones de dicho modo. Esto puede ser solucionado modificando la programación de la tabla de comandos.
3. Se prevé añadir un display a la botonera que, con ayuda de un Arduino indique al usuario la siguiente información:
 - Frecuencia de la señal sinusoidal en el modo Curva
 - Relación *amperios motor/voltios de consigna* en el modo en corriente.



Anexo 5: Guía de usuario del programa DEWESoftX3

En este anexo se procederá a dirigir los pasos para el arranque del programa DEWESoftX3, para poder configurar el estado de funcionamiento del propio estator. Los pasos a seguir son los explicados a continuación:

1. Se enciende el Sirius, tarjeta E/S, enchufándolo directamente a la corriente (Figura A5.1), a través del puerto situado en su parte posterior (Figura A5.2).



Figura A5.1: Conexión del Sirius a la corriente.



Figura A5.2: Puerto responsable de la conexión a la red eléctrica.

2. El cable BNC se conecta del Sirius al maletín de control.



Figura A5.3: Conexión del cable BNC en el puerto de salida 2 del Sirius.

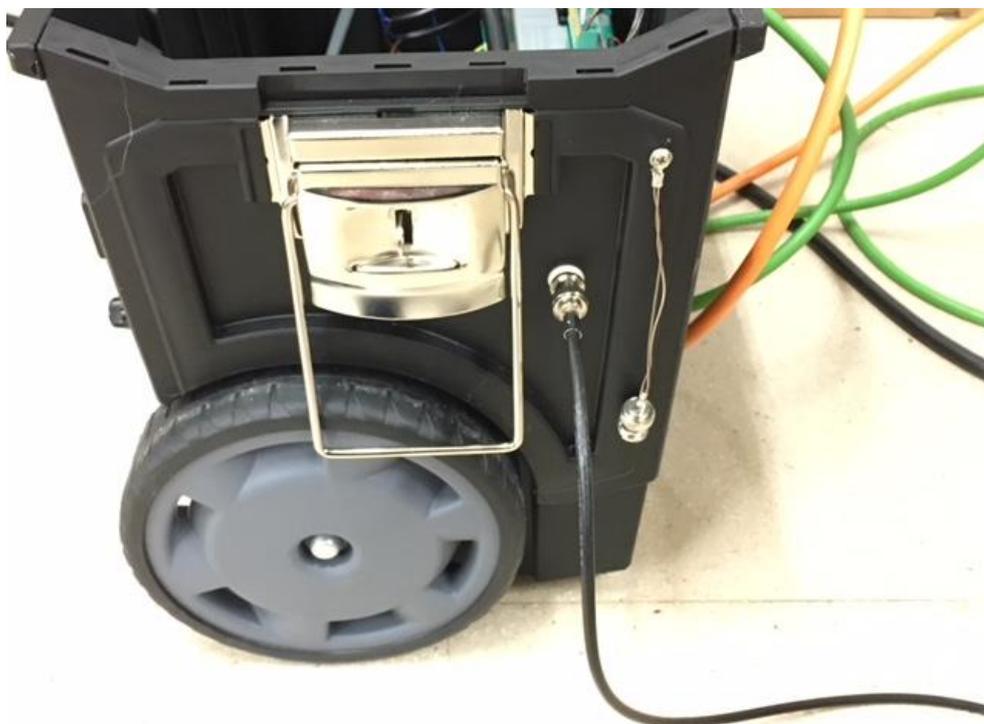


Figura A5.4: Conexión del cable BNC al maletín de control.

3. El Sirius se conecta a la computadora, por medio del puerto USB.



Figura A5.5: Cable USB conectado al Sirius.

Una vez conectado completamente el Sirius, se dispone a abrir el programa de configuración DEWESoftX3 del ordenador (doble clic), que maneja y configura el equipo de adquisición de datos Sirius.

4. El programa DEWESoftX3 arranca directamente en la opción “Setup Files”, en este apartado no hay que seleccionar ningún modelo, ni configurar ninguna operación.

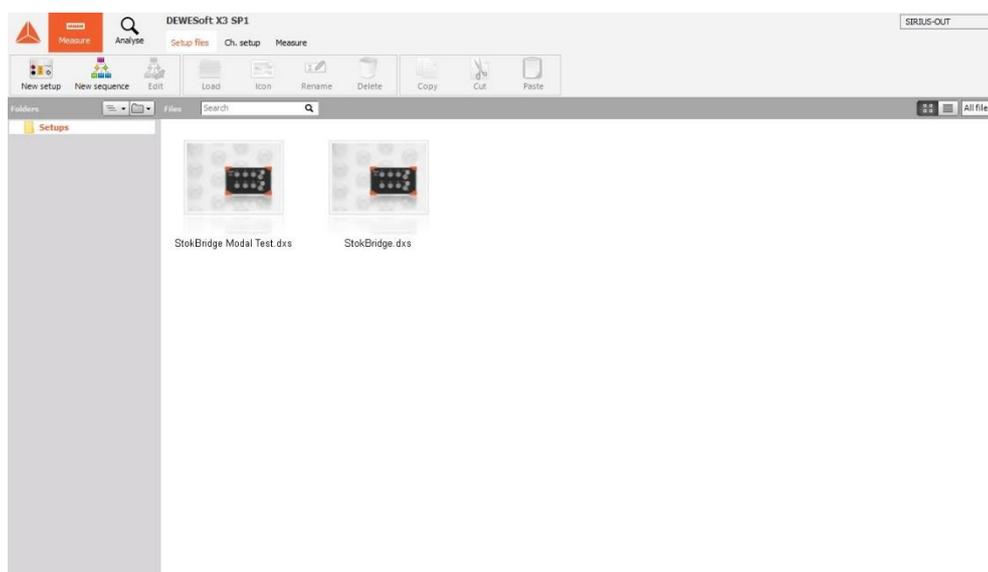


Figura A5.6: Ventana de entrada del programa DEWESoftX3.

- Se selecciona la opción “Channel setup” en la ventana inicial del programa. Seguidamente pulsamos la subopción “Analog in”, y nos situamos en “Dynamic acquisition rate”. En dicha casilla la frecuencia viene por defecto una frecuencia de 20000Hz siendo una frecuencia demasiado elevada. En nuestro caso se elige una frecuencia de 100Hz.

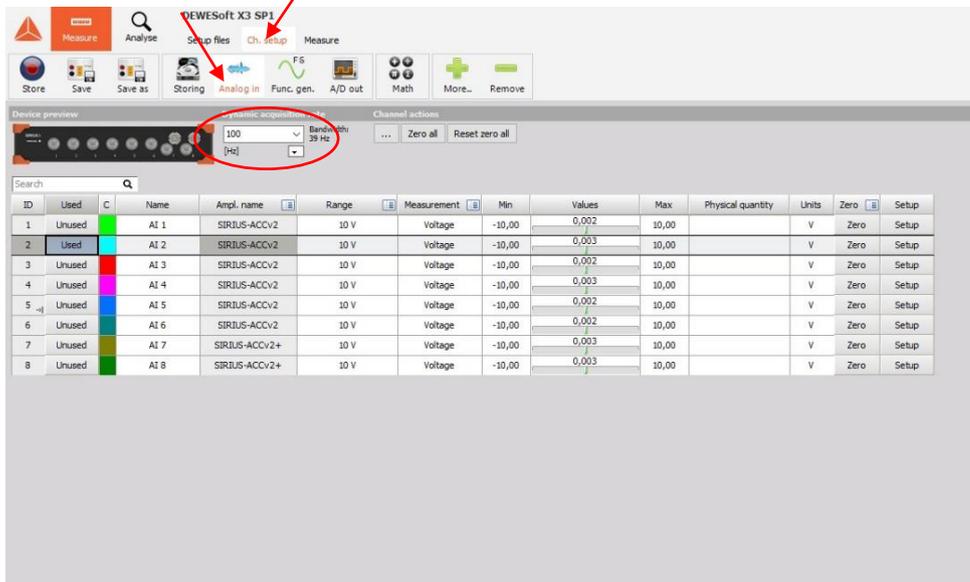


Figura A5.7: Configuración de la frecuencia a 100Hz.

- Como se puede apreciar en la Figura A5.8 el cable BNC está conectado en el puerto de salida 2 del Sirius. Hay que marcar en la columna “Used”, el ID número 2 para que aparezca en estado “Used” y así se encuentre activada la salida del puerto 2 del Sirius.

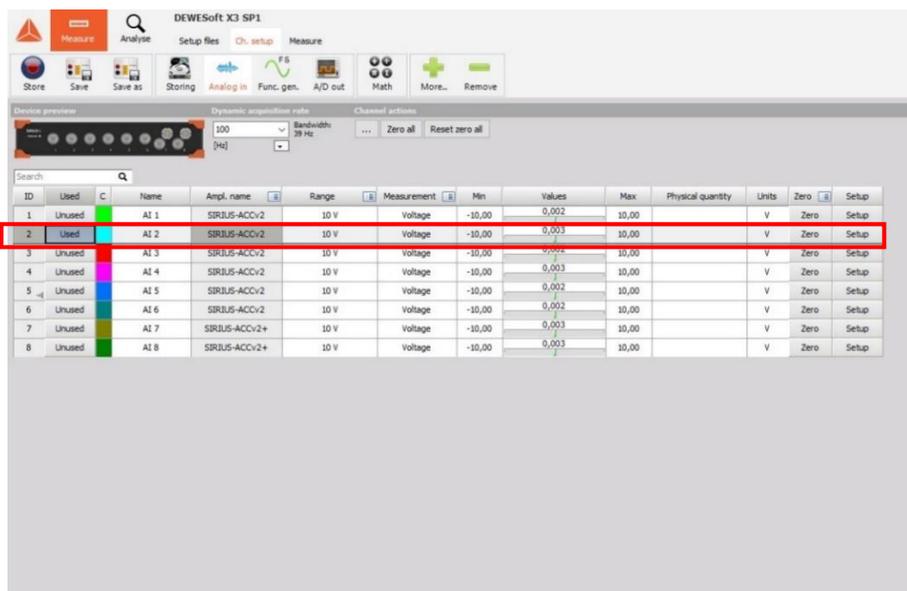


Figura A5.8: Activación del puerto de salida 2 del Sirius.

- Se continua en la opción “Channel setup”, pero ahora seleccionamos la subopción “Function generator”.

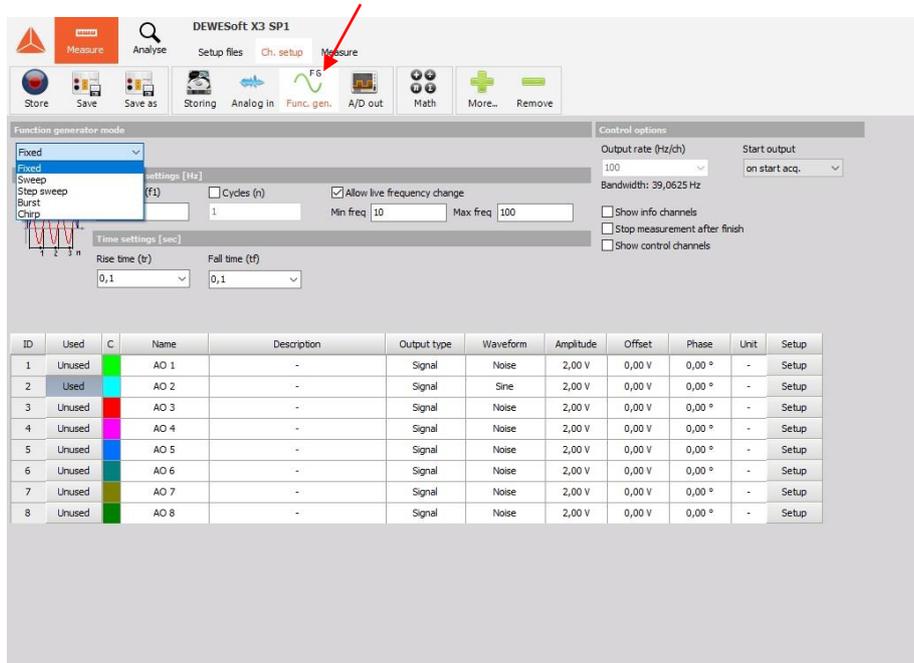


Figura A5.9: Selección de la subopción Function generator.

- A continuación, nos situamos en el apartado “Function generator mode” y se selecciona en el despliegue de la casilla el tipo de función que se va a generar, en nuestro caso es “Fixed” (señal fijada).

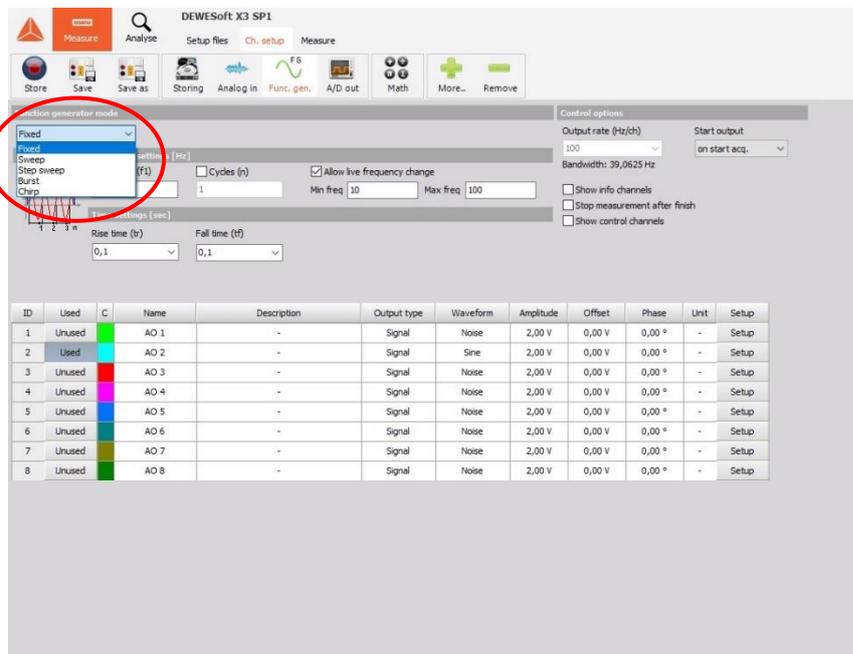


Figura A5.10: Selección del tipo de función que genera el Sirius.

- En el apartado de “Frequency settings [Hz]”, nos situamos en la casilla “Frequency (f1)” e introducimos 1 Hz. En el apartado “Time settings (sec)” no se configura nada

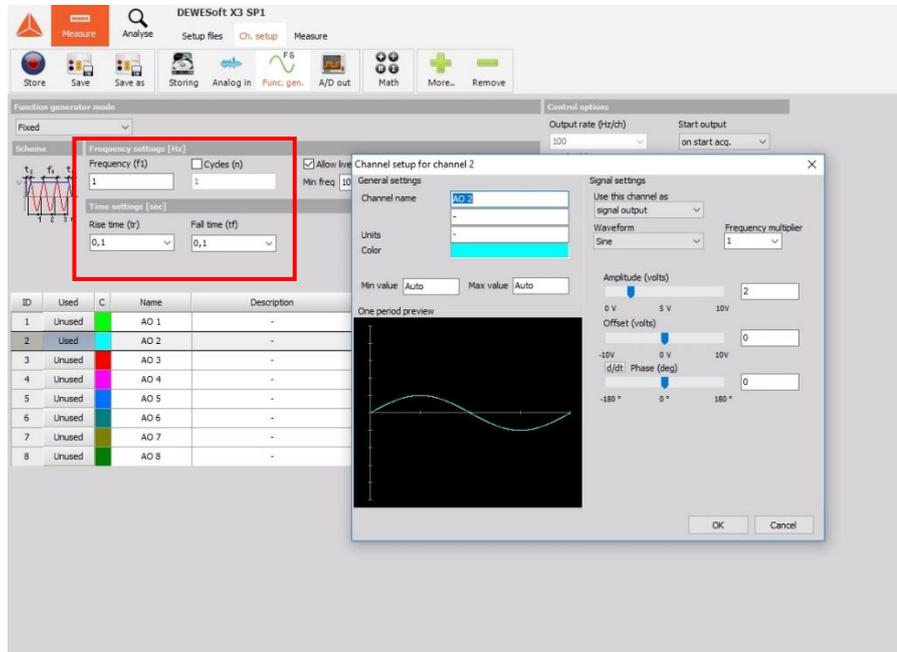


Figura A5.11: Introducción del valor de la frecuencia generada por el Sirius.

- Siguiendo en la misma subopción “Function generator”, se encuentra una tabla en la parte inferior indicando los números de los puertos de salida del Sirius. Se selecciona, en nuestro caso, el puerto número 2 en la posición “Used”, y en la columna “Setup” correspondiente al puerto 2 se hace clic en el botón “Setup”.

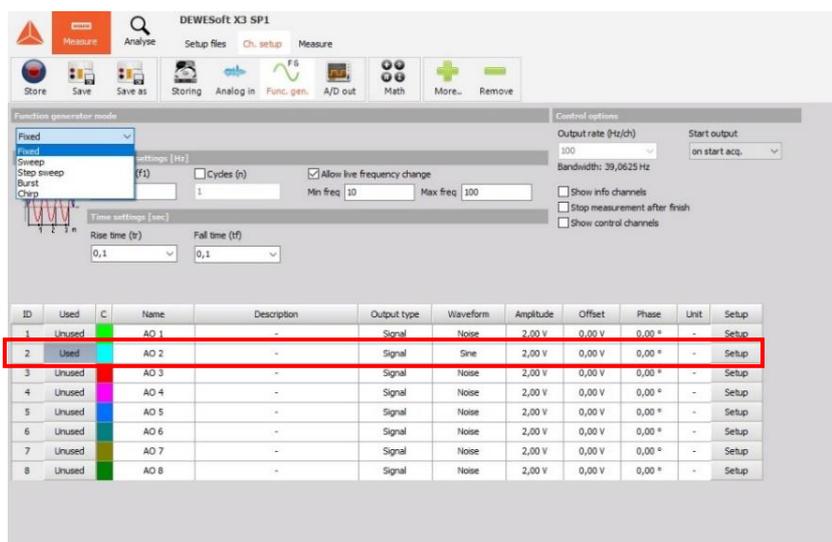


Figura A5.12: Selección del puerto 2 para generar la función.

11. Posteriormente aparece una ventana para seleccionar el tipo de función que queremos introducir en el puerto de salida 2 del Sirius. En la parte derecha de la ventana aparece el apartado “Signal settings”. Inmediatamente debajo en el subapartado “Use this channel as” y desplegando la casilla se selecciona la opción “Signal output”, para que sea una señal de salida. Debajo del subapartado anterior se encuentra “Waveform”, que es la forma que se quiere dar a la onda, y volviendo a desplegar la casilla elegimos la función de tipo seno “Sine”. Terminando esto no se requiere de más configuración.

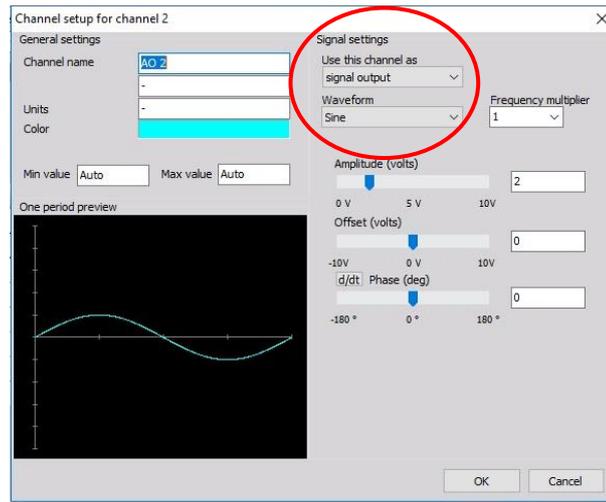


Figura A5.13: Ventana de configuración del tipo de señal y la forma de onda que sale a través del puerto 2 del Sirius.

12. Dentro de “Channel setup” nos situamos en la subopción “Analog / Digital out”. Se necesita que este activado el puerto número 2 dónde tiene lugar la salida de la señal. En la columna “Used” de ID 2 seleccionamos la opción “Used” para activar dicho puerto de salida.

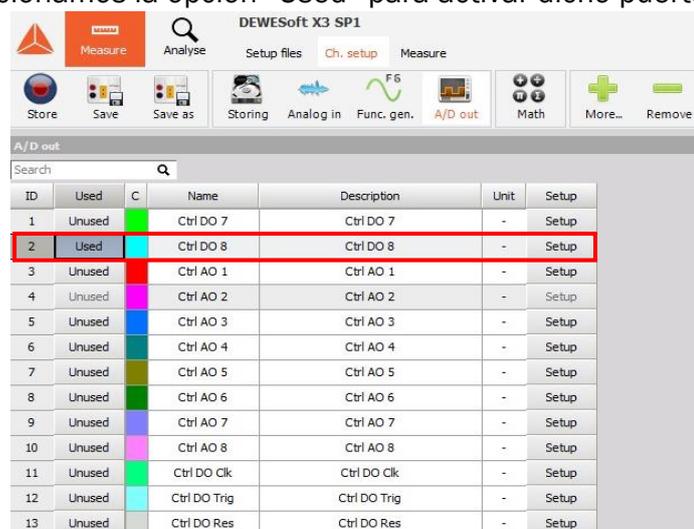


Figura A5.14: Activación del puerto de salida 2 para la señal de salida analógica o digital.

Una vez configurado el Sirius, pasamos a la opción “Measure” que representará la función seno definida anteriormente.

13. Se selecciona el modo “Scope” para una mejor aclaración de la señal.

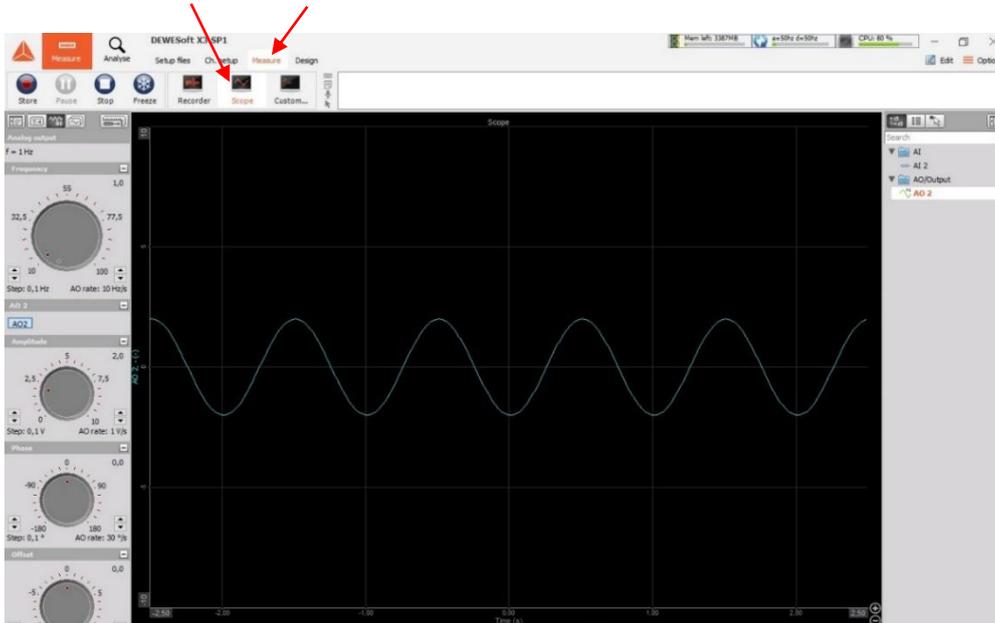


Figura A5.15: Representación de la función senoidal.

14. En la columna situada a la izquierda de la ventana del programa, podemos regular la frecuencia y la amplitud, que son los parámetros más importantes que vamos a manejar.

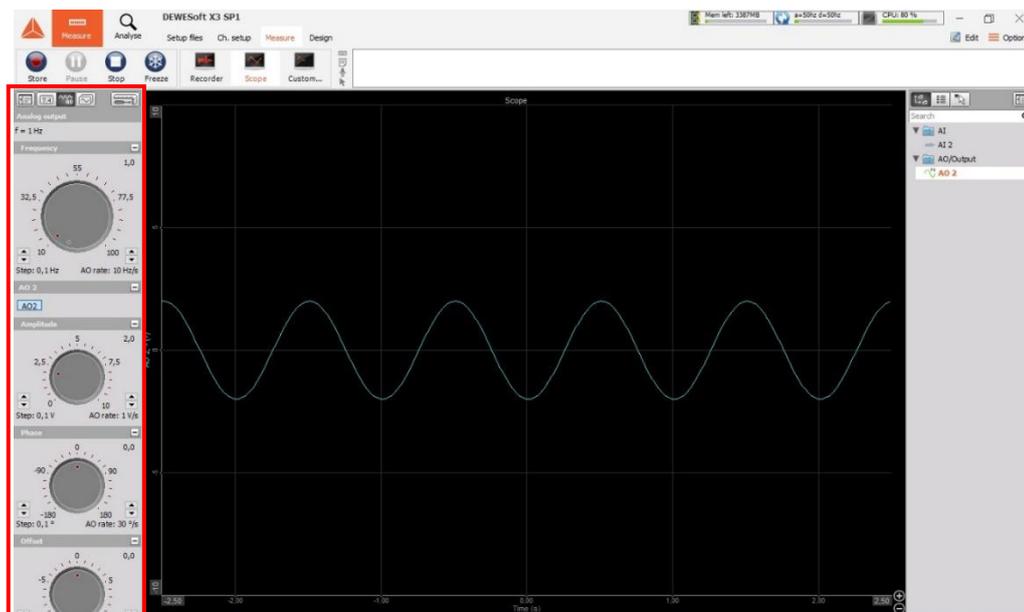


Figura A5.16: Manipulación de la frecuencia y amplitud en la onda senoidal.

15. En el apartado de “Frequency”, se hace clic en la esquina superior derecha donde se sitúa el valor de la frecuencia para modificar el valor de la frecuencia.



Figura A5.17: Modificación de la frecuencia a 10Hz.

16. Con la frecuencia corregida, se puede modificar la amplitud de la señal. Para ello nos situamos en el apartado “Amplitude” y al igual que en el apartado anterior, se hace clic en el valor de la esquina superior y se cambia el valor de los voltios de entrada.



Figura A5.18: Modificación de la amplitud a 2V.



Anexo 6: Conexión del excitador inercial al maletín de control

Primeramente, se describen los componentes que lleva incorporados el maletín de control. También se detalla la conexión de los dispositivos de control externos, y la conexión de los cables de señal de posición o control (cable verde) y alimentación del estator (cable naranja) al maletín de control. Más adelante, se explica la conexión del excitador inercial al maletín de control, cuando ambos se encuentran separados a una elevada distancia.

Los elementos de los que se componen el maletín de control tienen un desempeño fundamental en el funcionamiento del excitador inercial. Figura A6.1.

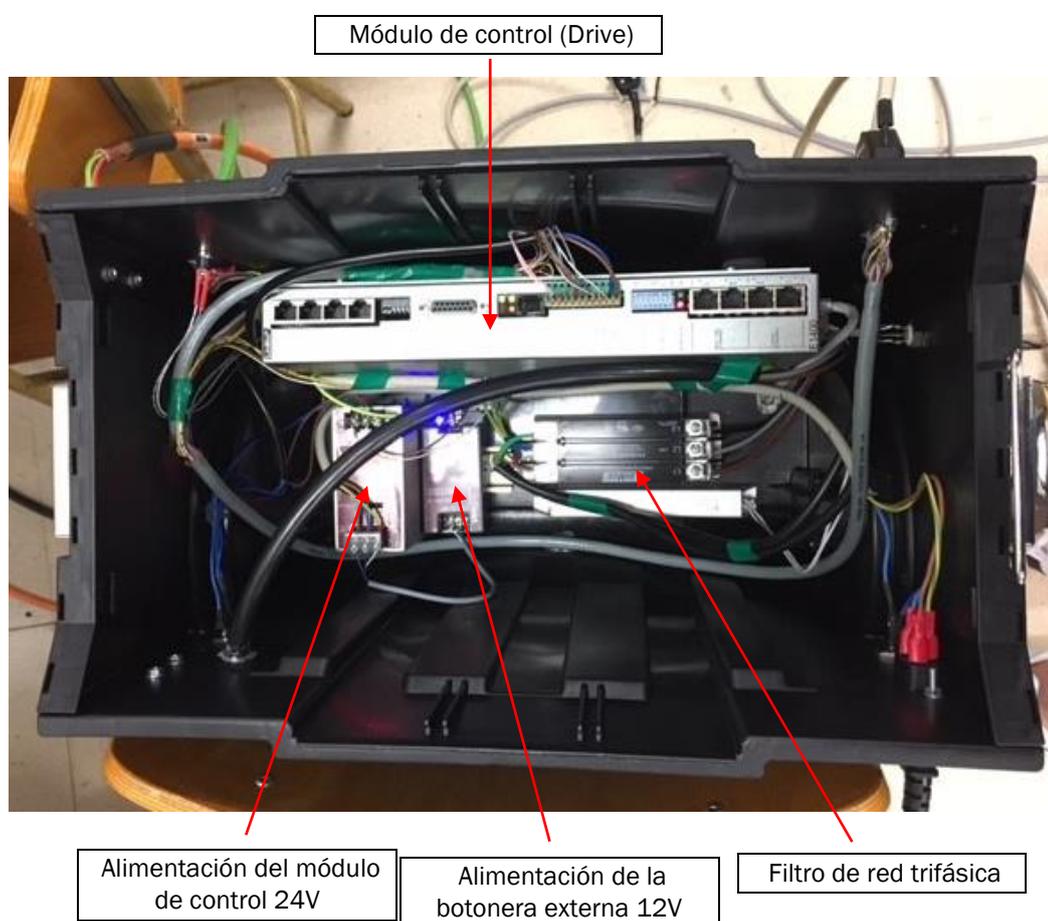


Figura A6.1: Presentación de los componentes que componen el maletín de control. Vista superior.

A continuación, se presenta la vista frontal del maletín, mostrando las conexiones donde se conectan los distintos dispositivos.

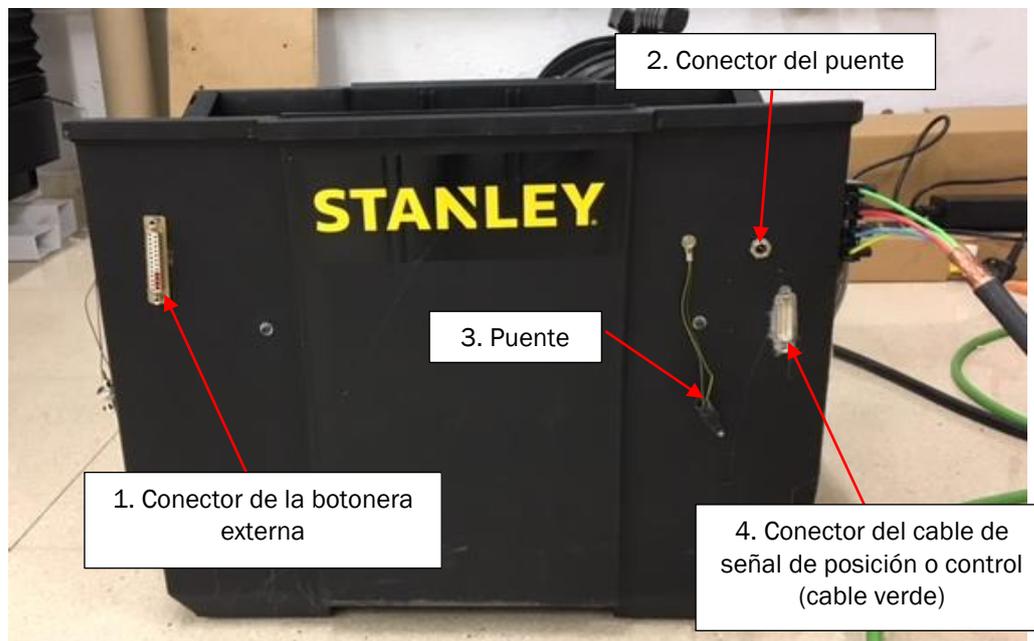


Figura A6.2: Vista frontal del maletín de control

En cuanto al conector del puente (2) también sirve de conexión para una segunda seta de emergencia, cuando se proceda a realizar una experimentación del conjunto excitador inercial a una distancia elevada del maletín de control. El puente (3) debe ir conectado en todo momento al conector puente cuando se realice la experimentación a poca distancia del maletín de control. La desconexión del puente de dicho conector puede suponer un problema a la hora de poner en funcionamiento el excitador inercial, ya que dicha desconexión produce la misma acción que tener activada la seta de emergencia.

El maletín de control visto desde su perfil izquierdo presenta el conector BNC y el tapón de seguridad del conector BNC. El objetivo de dicho tapón de seguridad es asegurar que haya un potencial de 0V cuando el conector BNC no se encuentre en uso. Por lo tanto, una vez desconectado el cable BNC del maletín de seguridad, acto seguido se introduce el tapón de seguridad en dicho conector.



5. Conector BNC

6. Tapón de seguridad
del conector BNC

Figura A6.3: Vista del perfil izquierdo del maletín de control.

La conexión del maletín de control a la red de alimentación se realiza a través de su parte posterior, dónde se encuentran dos conectores. Uno de dichos conectores es el responsable de alimentar la potencia del motor lineal por medio de la red trifásica a 400V. El otro conector brinda alimentación al módulo electrónico a 220V. Además, el maletín tiene dispuestos dos fusibles, uno de 24V y otro de 220V, a modo de evitar el aumento de intensidad de corriente y que pueda dañar algún componente del interior del maletín de control.

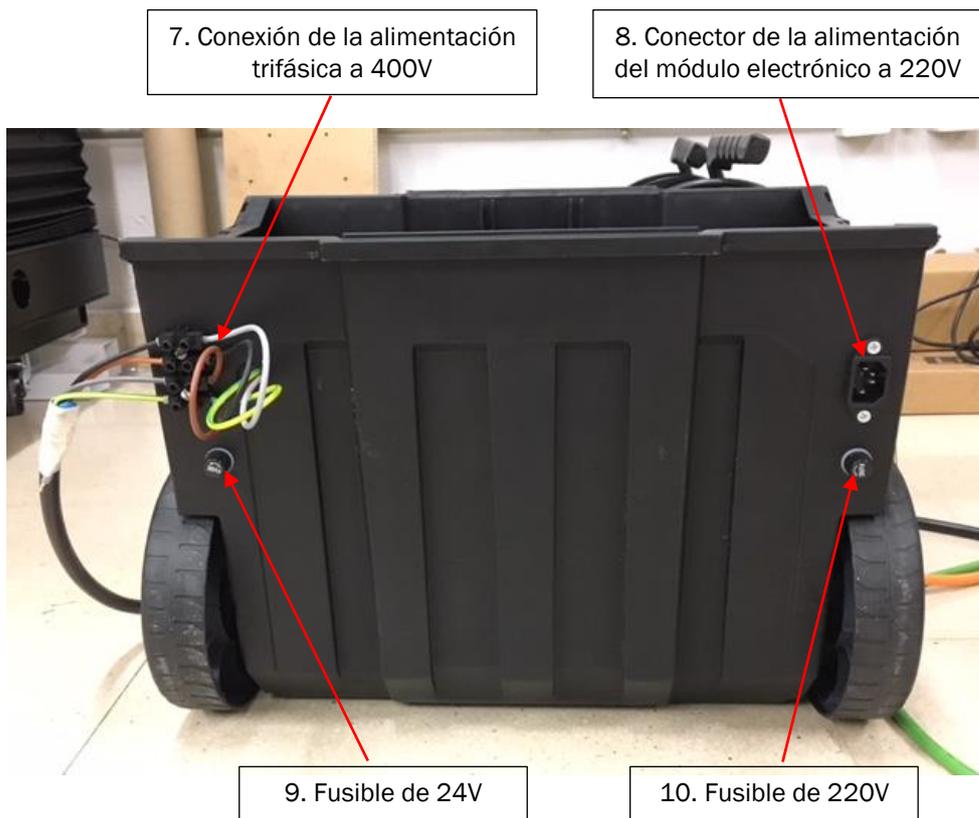


Figura A6.4: Vista posterior del maletín de control.

Por último, en la parte lateral derecha del maletín de control se encuentra la conexión del cable de alimentación del motor lineal (cable naranja) a través de una regleta de cuatro de conexiones. En dicha regleta se unen los cables que componen el cable de alimentación del motor lineal con cables conectados al módulo de control (drive). La conexión de los diferentes cables es importante, debido a los colores de los cables que componen el cable de alimentación deben estar conectados con los cables correspondientes provenientes del módulo de control. Se tiene que seguir el esquema de colores de la Tabla 7.1. La ventaja de tener la conexión en regleta es para cuando se realicen los ensayos en estructuras con grandes dimensiones y el maletín de control se encuentre a gran distancia del excitador inercial, este tipo de conexión se detallará posteriormente.

Verde	→	Gris
Rojo	→	Marrón
Azul	→	Negro
Amarillo / Verde	→	Amarillo / Verde

Tabla A6.1: Esquema de colores.

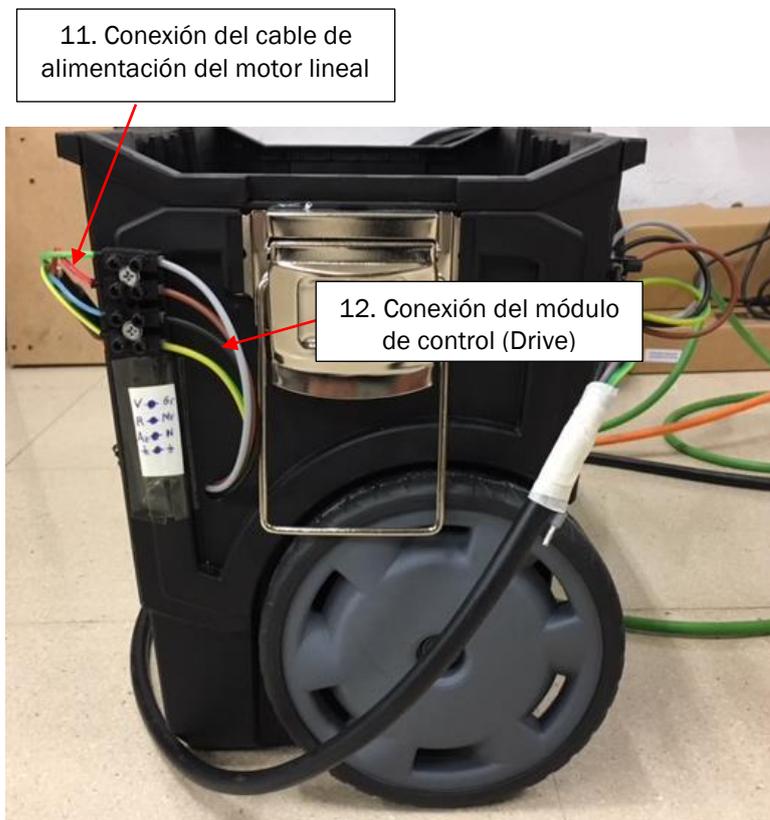


Figura A6.5: Vista del perfil derecho del maletín de control.

Anexo 6.1: Conexión del maletín de control y el excitador inercial a corta distancia

Una vez descritas y situadas todas las conexiones de las que dispone el maletín de control necesarias para el funcionamiento el excitador inercial, se detalla a continuación las conexiones del maletín de control con la red de alimentación y con los distintos dispositivos.

El primer paso es conectar el maletín de control a la red trifásica de 400V y a la red eléctrica de 220V, a través de los conectores 7 y 8 (Figura A6.4).

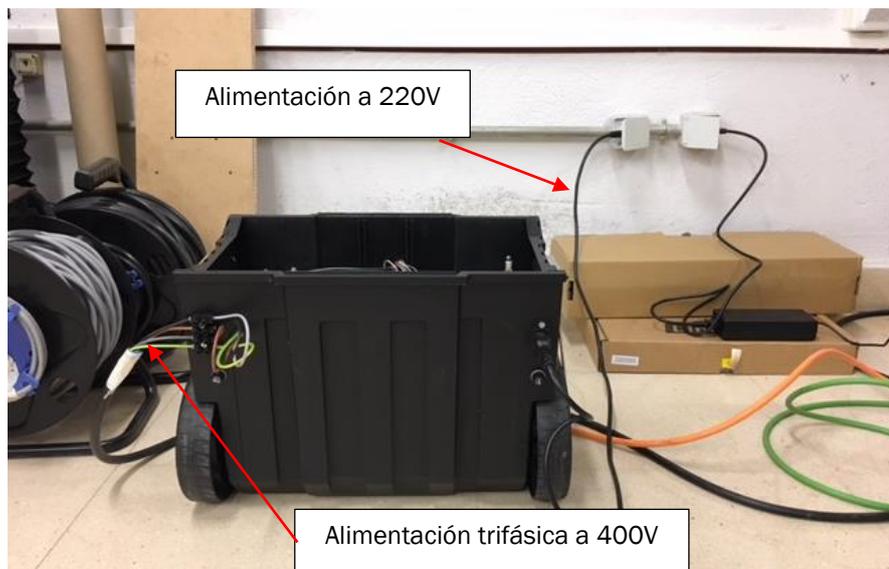


Figura A6.6: Conexión del maletín de control a la red eléctrica 220V.



Figura A6.7: Conexión a la red trifásica 400V.

A continuación, se conectan el enchufe del cable de señal de posición (cable verde) y el cable de alimentación del motor lineal (cable naranja) al maletín (Figura A6.8) y posteriormente a los conectores independientes del motor lineal (Figura A6.9). Con todo ello conectado se conecta el puente al conector puente.

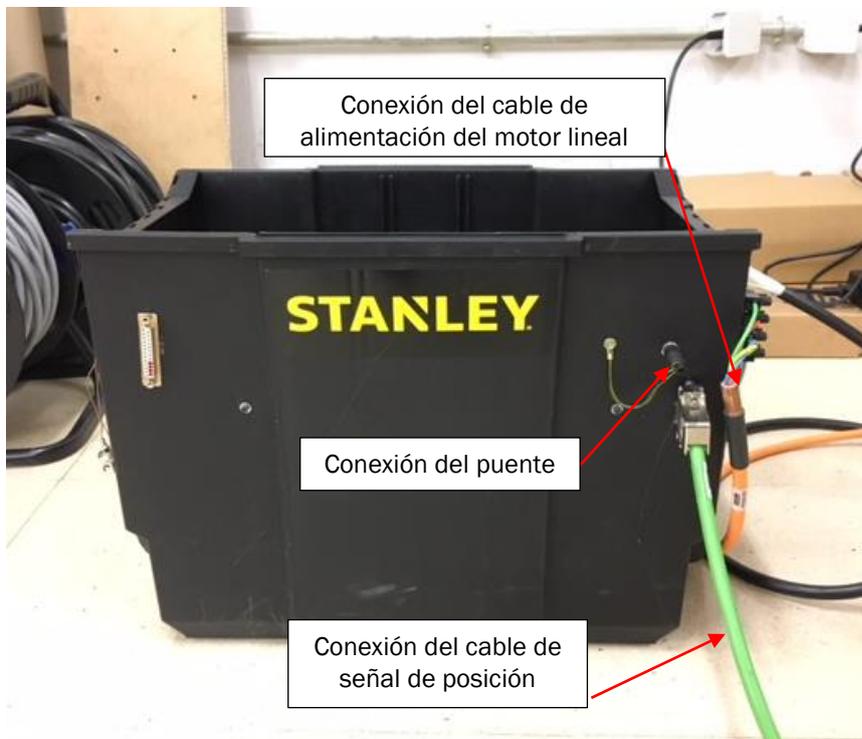


Figura A6.8: Conexión de los cables de señal de posición y de alimentación del motor lineal, al maletín de control.

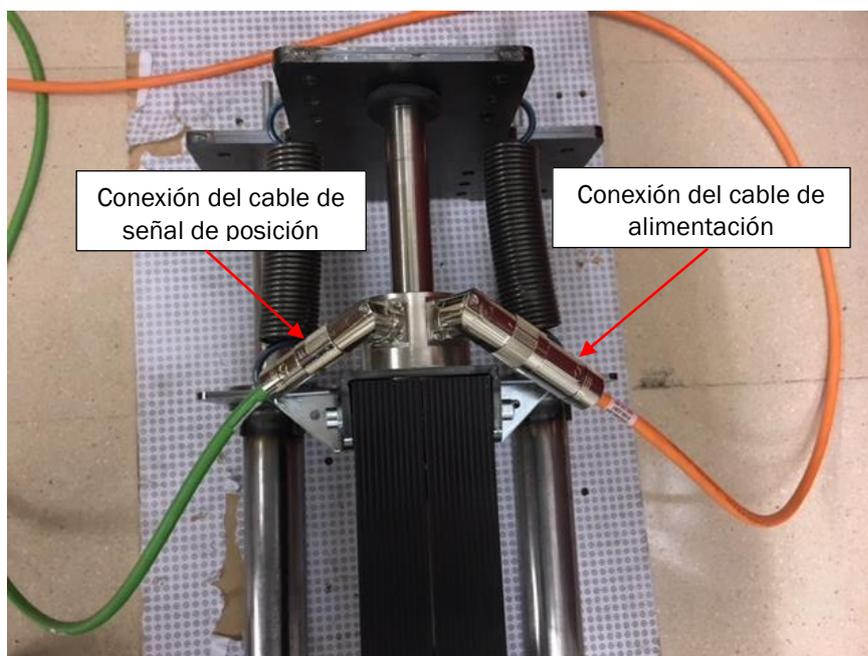


Figura A6.9: Conexión de los cables de señal de posición y de alimentación del motor lineal, a los conectores del motor lineal.

El siguiente paso, es la conexión del puerto BNC con el puerto del equipo de adquisición de datos Sirius, pero antes desconectando el tapón de seguridad del conector BNC (Figura A6.10). En nuestro caso y tal como se menciona en el Anexo 5, el puerto que se utiliza para introducir la señal del programa DEWESoftX3 al motor lineal es el puerto número 2 (Figura A6.11).

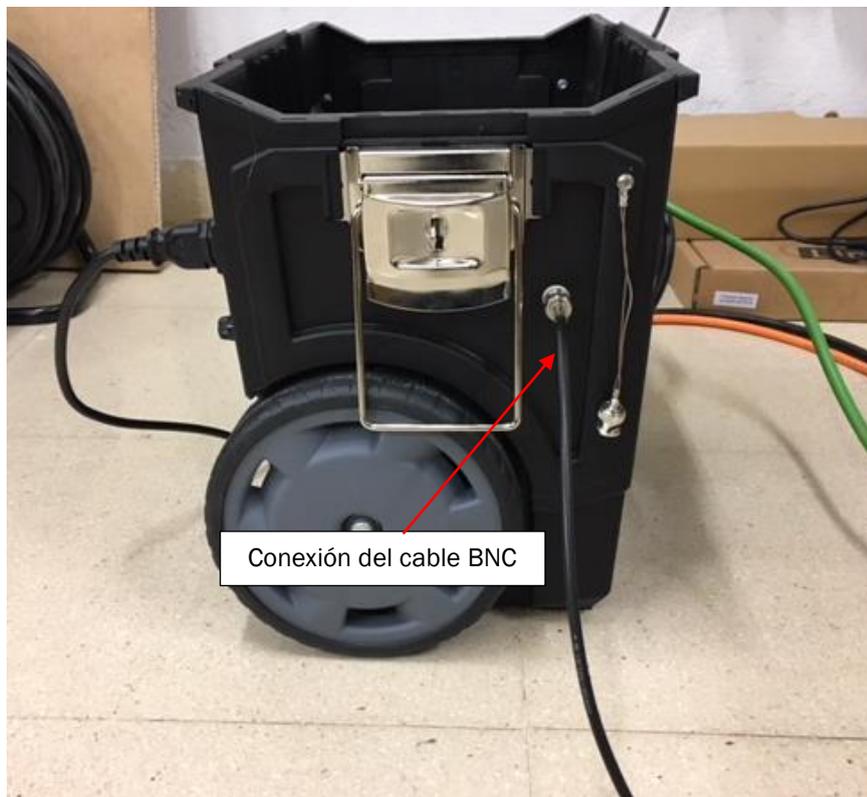


Figura A6.10: Conexión del cable BNC al maletín de control.



Figura A6.11: Conexión del cable BNC al puerto número 2 del Sirius.

Para finalizar la conexión del maletín al excitador inercial a corta distancia, se conecta la botonera externa al maletín de control. Hay que observar en la botonera externa que “Switch on” se encuentre en luz verde y la seta de emergencia desconectada para poder empezar el arranque del excitador inercial.

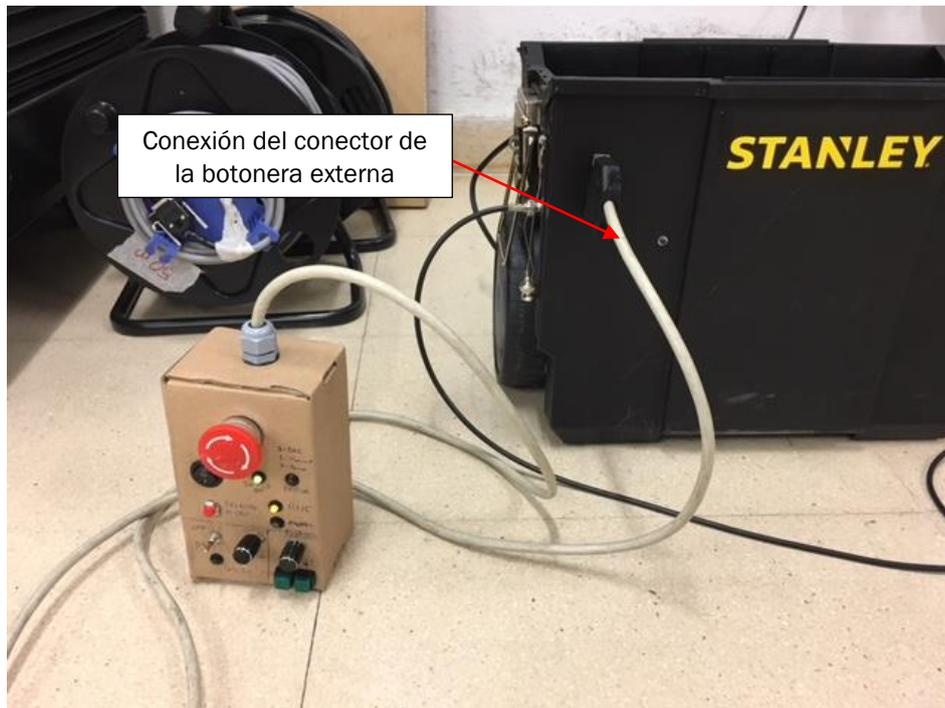


Figura A6.12: Conexión de la botonera externa al maletín de control.

Una vez finalizada esta conexión, es conveniente que la botonera se encuentre apagada para poder realizar una inspección previa y comprobar que todas las conexiones al maletín de control se encuentren conectadas de manera adecuada. Revisadas todas las conexiones, se procede a encender la botonera externa y como consecuencia el motor lineal comenzará a desplazarse en todo el recorrido del vástago, realizando el “homing”, y posicionándose finalmente en el punto medio del recorrido. En el momento que el motor lineal se encuentre estático se podrá pasar por los diferentes estados con el botón “Selector modo” de la propia botonera.

Anexo 6.2: Conexión del maletín de control y el excitador inercial a larga distancia

Esta conexión tiene lugar cuando se trata de una estructura de gran longitud y la longitud de los cables del motor lineal limita la conexión con el propio maletín de control. Por lo tanto, se necesita una extensión de cables considerable, que brinde conexión entre el cable de alimentación y el cable de sensor de posición, ambos pertenecientes al motor lineal y conectados al maletín de control.

Para realizar dicha conexión a larga distancia, se hace uso de dos tambores de cable, de 50 metros cada uno. El objetivo de dichos tambores de cables es situarse de manera intermedia entre el maletín de control y el cable de alimentación además del cable de sensor de posición.

Los tambores llevan enlazados en sus extremos conectores similares al cable de alimentación del motor lineal y al cable de sensor de posición para poder realizar la conexión con el maletín de control y los dos cables pertenecientes al motor lineal.

En la Figura A6.13 se pueden observar los dos tambores de cables. El tambor situado a la izquierda conecta el cable de sensor de posición del motor lineal con el maletín de control. Y el tambor de cable adyacente sirve de conexión entre el cable de alimentación del motor lineal con el maletín de control.



Figura A6.13: Tambores de cables de 50 metros de longitud.

La conexión a larga distancia del cable de sensor de posición a través de su correspondiente tambor de cables se puede apreciar en la Figura A6.14.



Figura A6.14: Conexión de larga distancia del cable de sensor de posición del motor lineal.

En los dos extremos del cable del tambor tienen ensamblados conectores similares y con el mismo número de pines que el conector del cable de sensor de posición. Además, se ha incluido también un conector puente adicional, realizando el empalme al cable del tambor. Este conector hace la conexión puente en el maletín de control (Figura A6.15).



Figura A6.15: Conexión de un extremo del cable del tambor al maletín de control.

Como se ha mencionado previamente en la Figura A6.2, el puente (3) tiene que estar conectado en el conector puente (2) en todo momento. En este caso no necesitará que esté introducido en dicho conector, porque el empalme adicional realizado al cable del tambor (cable gris) tiene el mismo tipo de conector que el conector puente (Figura A6.17). La introducción del puente que proviene del empalme realizado en el cable del tambor (cable gris) al conector puente, proporciona en el otro extremo del cable una conexión a la seta de emergencia, por medio de un conector puente similar (Figura A6.16). De esta manera se puede accionar la seta de emergencia a una distancia prudencial del excitador inercial, sin necesidad de estar pendiente de la botonera externa junto al maletín de control a demasiada distancia de la ubicación del excitador inercial.

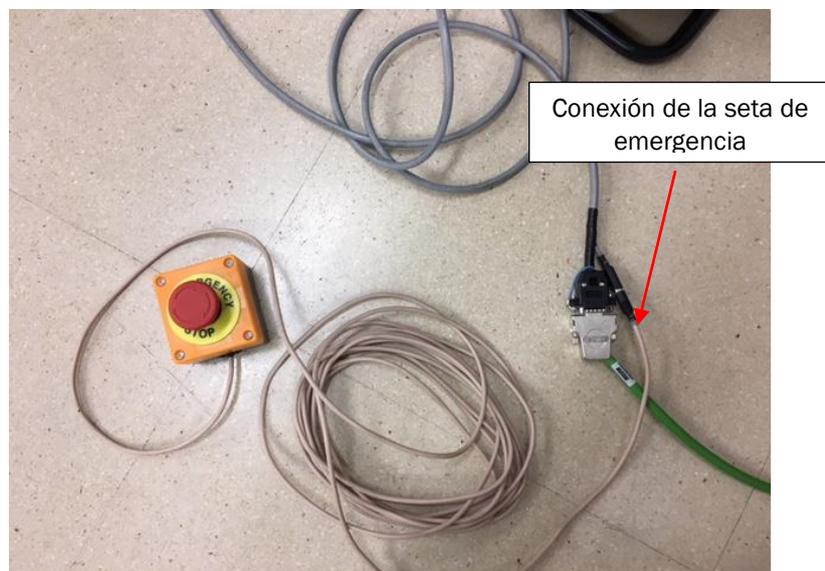


Figura A6.16: Conexión de la seta de emergencia mediante el conector puente.



Figura A6.17: Conexión del conector del cable de sensor de posición al cable del tambor.

La siguiente unión que se realiza es el tambor de cable que se utiliza de intermediario entre el maletín de control y el cable de alimentación (cable naranja) del motor lineal (Figura A6.18). Esta conexión a larga distancia del cable de alimentación no tiene ningún conector tipo puente, como la conexión a larga distancia del cable del sensor de posición, debido a que este cable (cable naranja) solo se encarga de la alimentación del motor lineal, administrando la potencia de este.

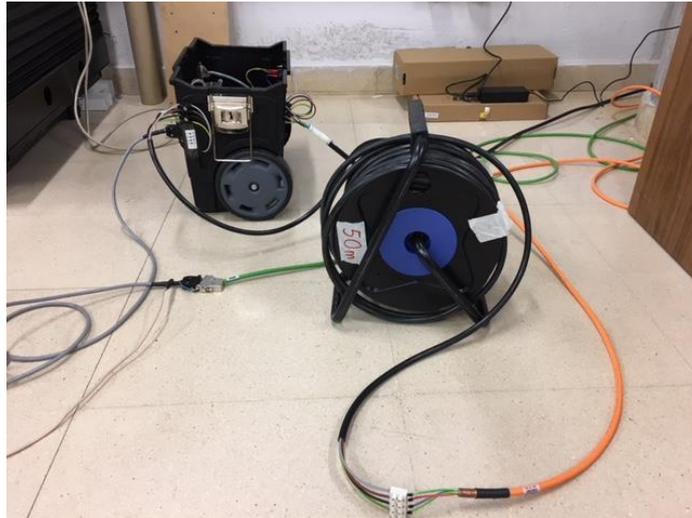


Figura A6.18: Conexión de larga distancia del cable de alimentación del motor lineal.

Primeramente, se desconecta el cable de alimentación (cable naranja) del maletín de control. Seguidamente, se alcanza uno de los extremos del cable del tambor y se conecta a la regleta del maletín de control. En esta conexión con el maletín de control, no se necesita seguir ningún código de colores, porque los cables que contiene el cable del tambor son de idéntica codificación de colores (Figura A6.19).

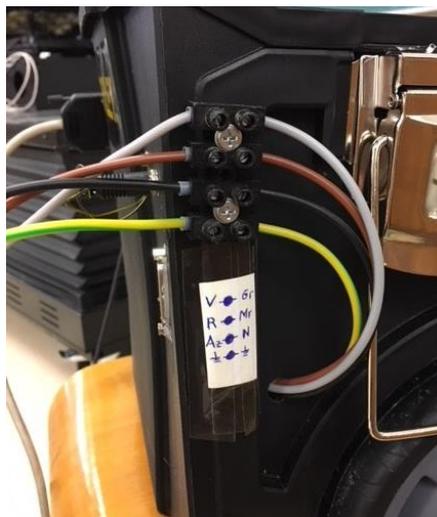


Figura A6.19: Conexión de un extremo del cable del tambor a la regleta del maletín de control.

El resultado de la conexión del tambor del cable y el maletín de control se puede apreciar en la Figura A6.20.



Figura A6.20: Vista general de la conexión intermedia del maletín de control y el tambor de cable.

A continuación, se conecta el cable de alimentación del motor lineal al otro extremo del cable del tambor, en el que dicho extremo lleva ensamblada una regleta. En este caso hay que tener precaución de seguir la codificación de colores como en el caso de la conexión a corta distancia (Figura A6.21).

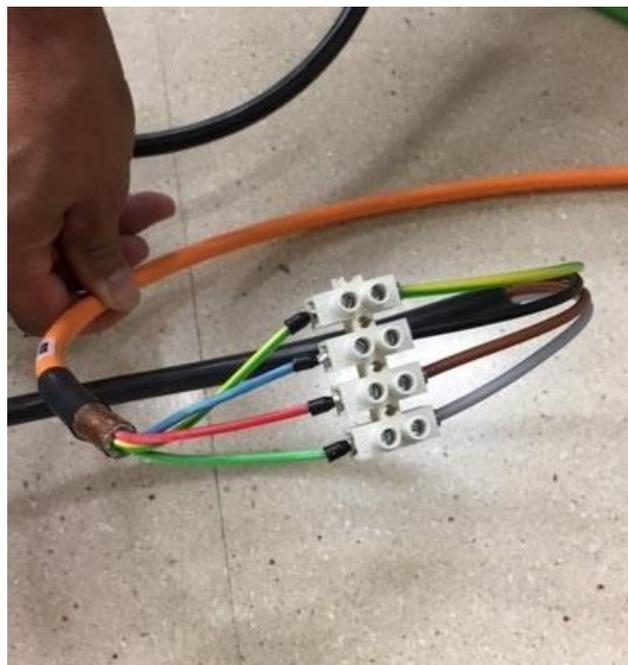


Figura A6.21: Conexión del cable de alimentación del motor lineal al extremo del cable del tambor, siguiendo el código de colores.

Finalmente, el resultado obtenido de esta última conexión se puede examinar con mejor detenimiento en la Figura A6.22.

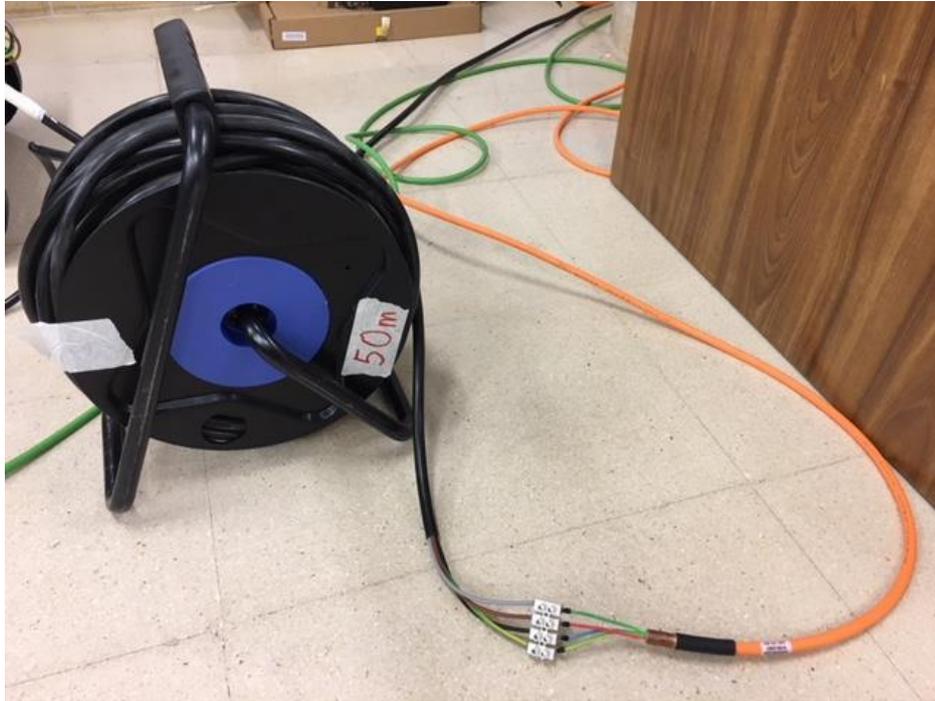


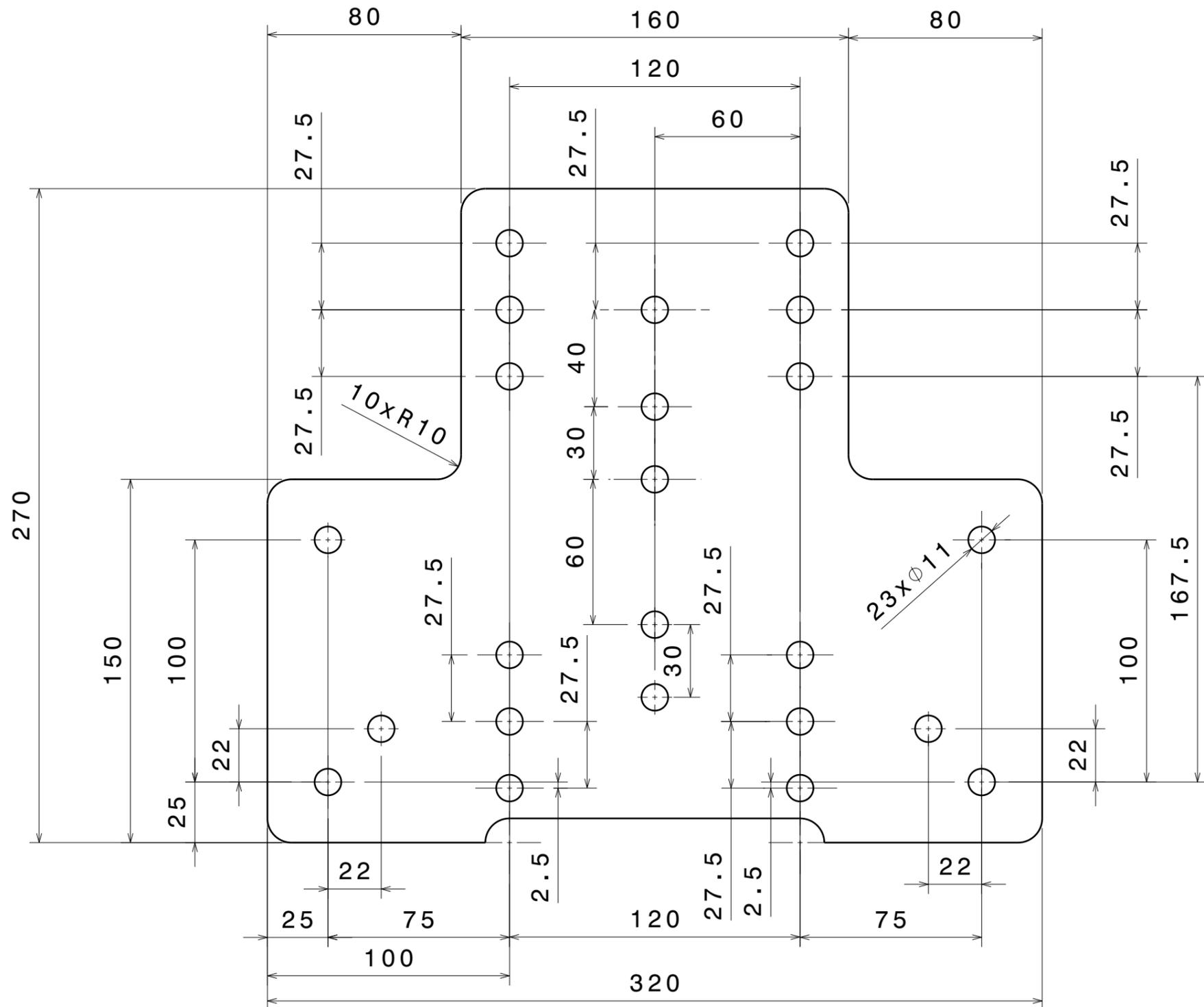
Figura A6.22: Vista general de la conexión intermedia del cable de alimentación del motor lineal y el tambor de cable.

Con esta última conexión, se daría por finalizada la conexión del excitador inercial y maletín de control a larga distancia.

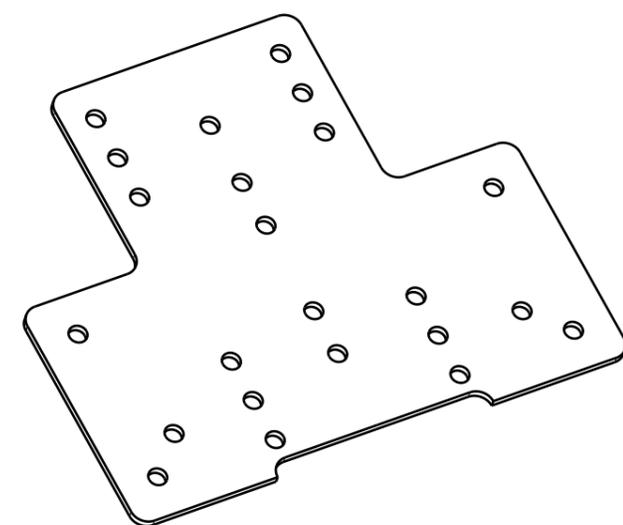




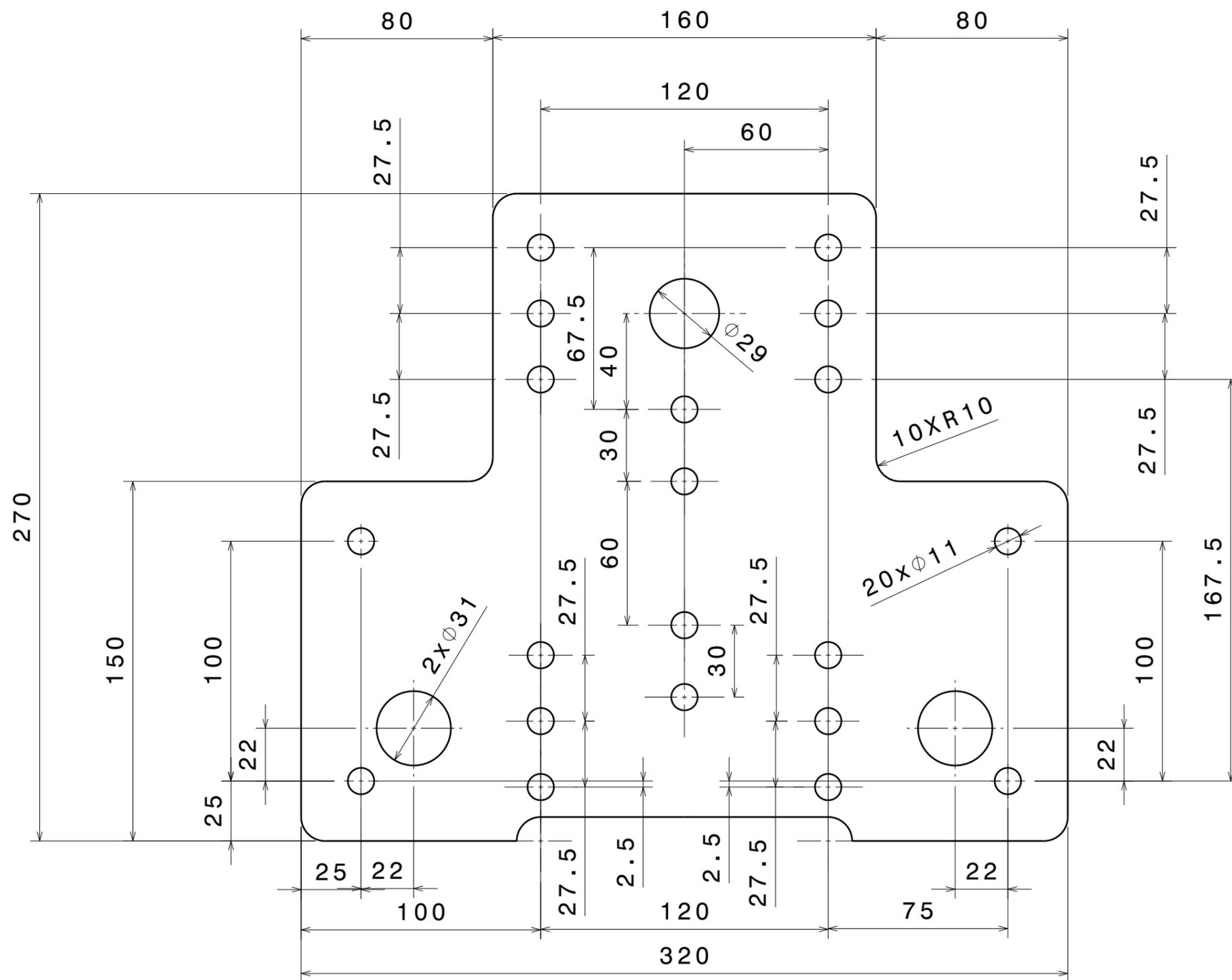
Anexo 7: Planos de fabricación



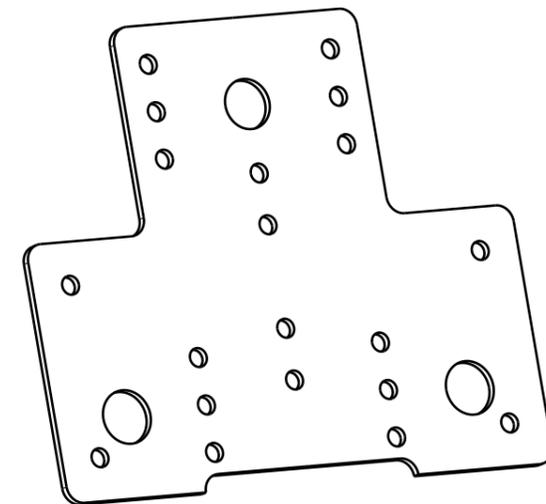
espesor: 5mm

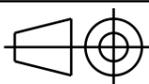


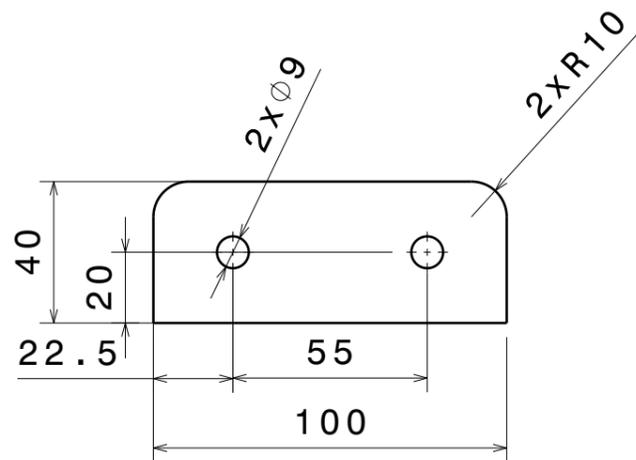
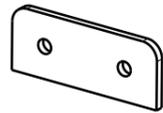
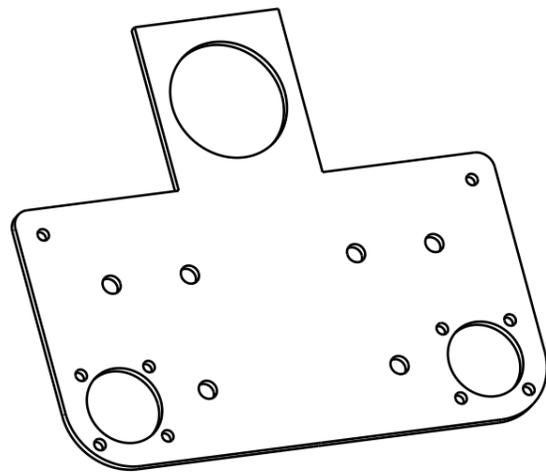
Fecha	09/10/2018	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	I	-
Nombre:	Víctor Carmona Martín		H	-
Tamaño	A3 	Excitador Inercial	G	-
Escala	1:1		F	-
Designación	Base exterior		E	-
Nº de Plano	1/4	D	-	
		C	-	
		B	-	
		A	-	



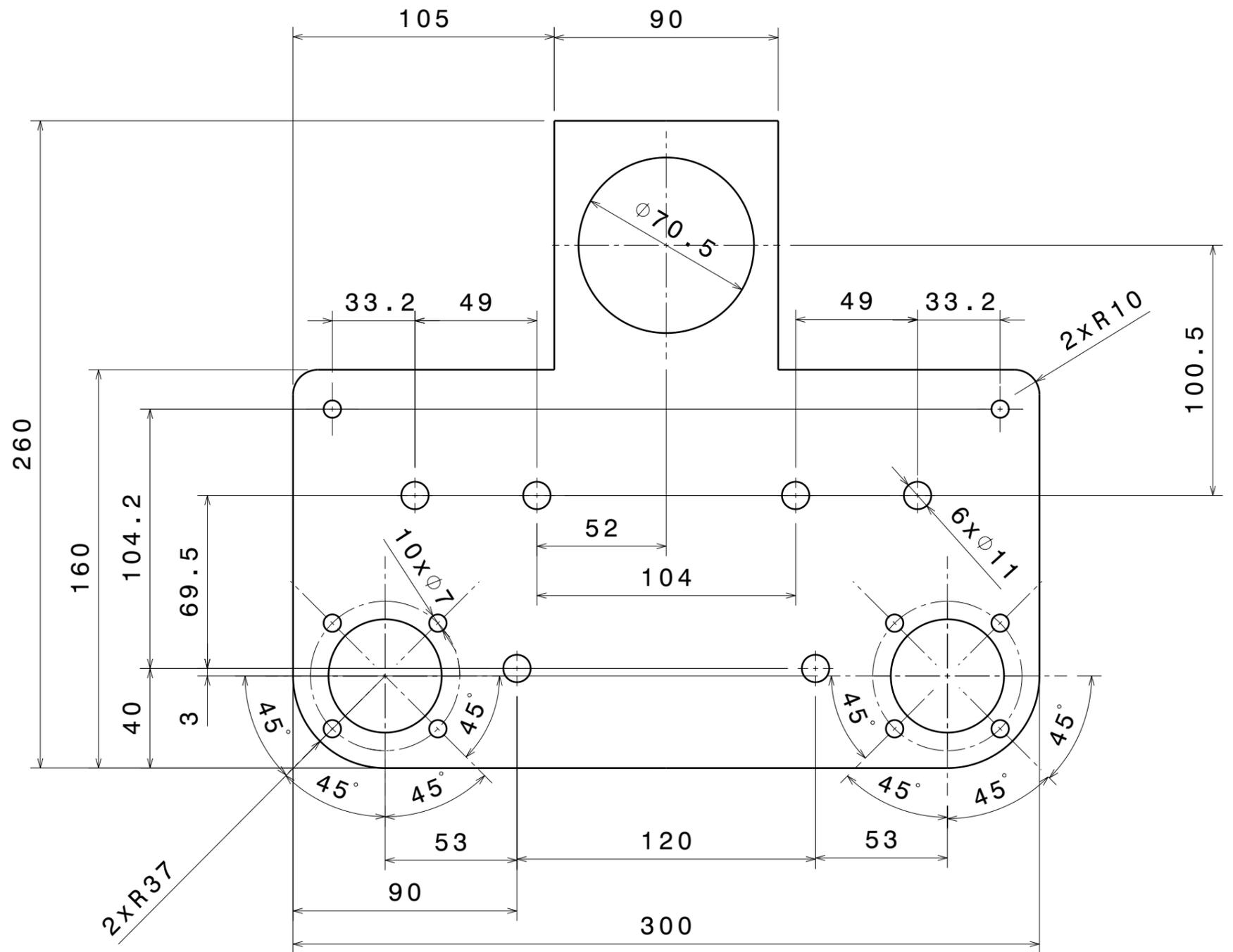
espeso: 5mm



Fecha:	09/10/2018	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	I	-
Nombre:	Víctor Carmona Martín		H	-
Tamaño:	A3 	Excitador Inercial	G	-
Escala:	1:1		F	-
Designación:	Base interior	Nº de plano 2/4	E	-
			D	-
		C	-	
		B	-	
		A	-	



espesor: 5mm



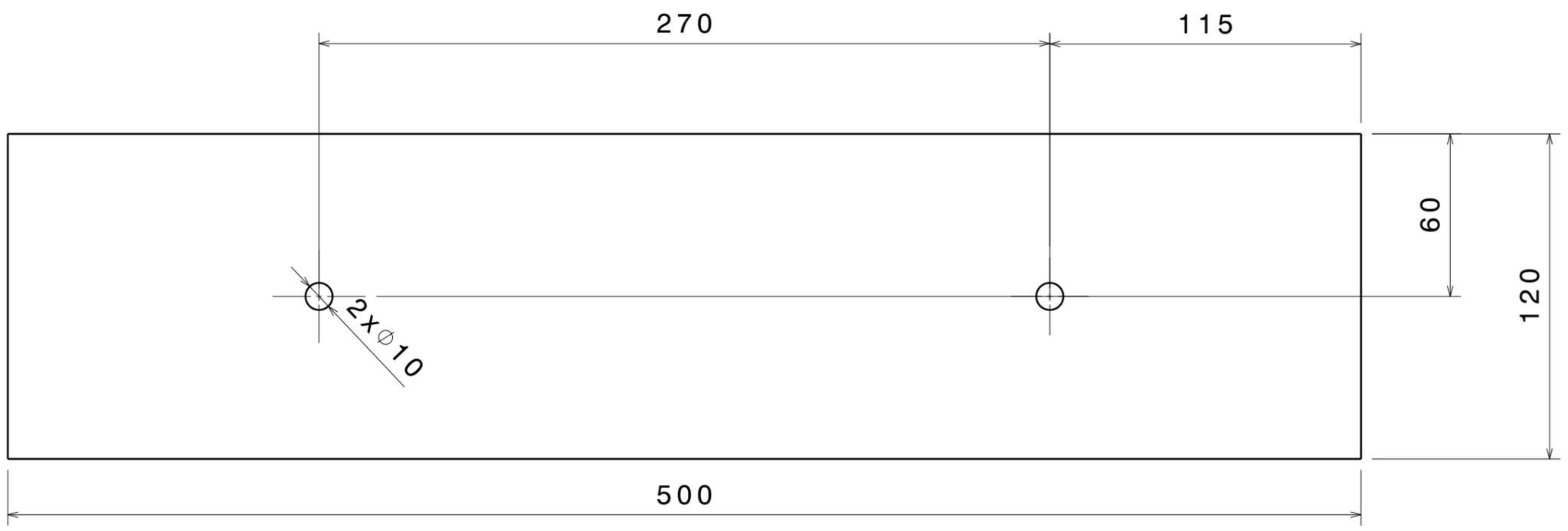
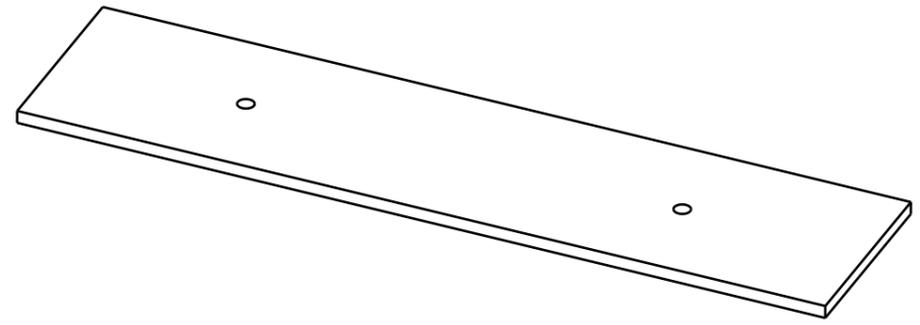
espesor: 5mm

Fecha:	09/10/2018	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	I	-
Nombre:	Víctor Carmona Martín		H	-
Tamaño:	A3 	Excitador Inercial	G	-
Escala:	1:1		F	-
Designación:	Base intermedia - Brida base intermedia	Nº de plano 3/4	E	-
			D	-
		C	-	
		B	-	
		A	-	

H G F E D C B A

4

4



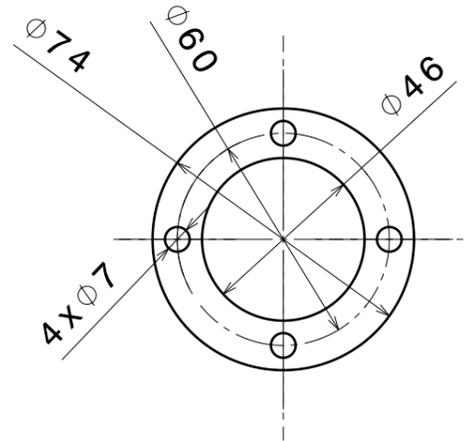
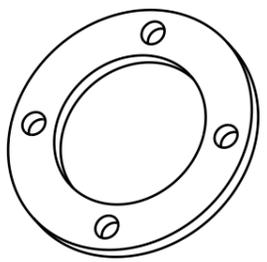
espesor : 8 mm

3

3

2

2

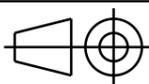


espesor : 5 mm

1

1

H G B A

Fecha: 09/10/2018		 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	I	-	
Nombre: Víctor Carmona Martín			H	-	
Tamaño: A3		Excitador Inercial		G	-
Escala: 1:1		Designación: Soporte lastre - Brida soporte intermedio	Nº de plano: 4/4	E	-
			D	-	
			C	-	
			B	-	
			A	-	