



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Desarrollo de un dispositivo bifuncional (mesa sísmica
y excitador inercial) basado en el actuador LINMOT
P10-70x400U**

Autor: D. Adrián Terol Úbeda
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, septiembre de 2020



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Desarrollo de un dispositivo bifuncional (mesa sísmica
y excitador inercial) basado en el actuador LINMOT
P10-70x400U**

Autor: D. Adrián Terol Úbeda
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, septiembre de 2020

Resumen

Este Trabajo Fin de Máster se enmarca dentro de la línea de desarrollo de instrumentos de generación de señales de excitación de estructuras y tiene como objetivo elaborar un dispositivo bifuncional apto tanto para la realización ensayos EMA para la obtención de parámetros modales de una estructura real, como ser capaz de actuar como mesa sísmica para la reproducción de acelerogramas reales sobre estructuras maquetadas o de pequeño tamaño. A lo largo del proyecto se detalla todo el proceso de diseño de componentes, prototipado, configuración y puesta en marcha de un excitador inercial que hace uso del motor lineal LinMot P10-70x400U como actuador. Dicho dispositivo dispone de diversos modos de funcionamiento que han sido configurados a través del software LinMot-Talk 6.8. Para la reproducción de seísmos se ha hecho uso de un controlador externo con la premisa de aplicar al conjunto un control de aceleraciones en lazo abierto mediante la inversión del sistema, observando las limitaciones que pueden presentar este tipo de procedimientos.

Abstract

This Master Thesis is framed in the line of development of instruments which are able to generate excitation signals and his objective is to build a bifunctional device suitable for shaker modal testing in order to obtain modal parameters of a real structure, but also appropriate for reproducing accelerograms through his use as a earthquake shaking table applied to small or model structures. This project shows the entire process of design, prototyping and set up of a modal shaker which employs a linear motor LinMot P10-70x400U as actuator. This device has some operation modes that have been configured using the LinMot-Talk 6.8 software. For the simulation of artificial earthquakes, an external controller has been used with the goal of applying an open-loop acceleration control system through system identification methods, detecting some limitations during the process.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Marco Teórico	2
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
1.4. Descripción del proyecto	6
2. Componentes	7
2.1. Bastidor	8
2.1.1. Tubos	9
2.1.2. Testas	10
2.1.3. Sistema de apoyo	12
2.2. Motor Lineal	14
2.2.1. Vástago	15
2.2.2. Estátor	16
2.2.3. Camisa	17
2.3. Sistema de guiado lineal	19
2.3.1. Guía	20
2.3.2. Rodillos	21
2.4. Armazón	22
2.4.1. Placa T	23
2.4.2. Sistema de fijación	25
2.4.3. Placas de soporte de las masas	26
2.4.4. Placas de apoyo de mesa sísmica	28
2.5. Elementos auxiliares	30
2.5.1. Masas	30
2.5.2. Tubos de apoyo de masa fija	32
2.5.3. Sistema de fin de carrera	34
2.5.4. Sistema de suspensión	35
2.6. Tornillería utilizada	37
2.7. Maletín de control	40
3. Prototipado	51
3.1. Obtención de los materiales	51
3.1.1. Placas de acero	51
3.1.2. Tubos del bastidor	52
3.1.3. Sistema de fijación	53
3.1.4. Materiales proporcionados por el laboratorio	54
3.1.5. Componentes no fabricados	55
3.1.6. Otros materiales	55
3.2. Fabricación	56
3.2.1. Mecanizado guías	56
3.2.2. Fabricación bastidor	58

3.2.3.	Mecanizado masas	65
3.2.4.	Fabricación armazón original	66
3.2.5.	Fabricación armazón definitivo	68
3.2.6.	Fabricación de los soportes de gomas	74
3.2.7.	Fabricación de topes de goma y sistema de apoyo	76
3.3.	Montaje	77
3.3.1.	Bloque móvil	77
3.3.2.	Unión bloques fijo y móvil	81
3.3.3.	Sistemas auxiliares	85
4.	Control del movimiento	87
4.1.	Lazo de control	87
4.2.	Funcionamiento del Drive	91
4.2.1.	Estado máquina	94
4.2.2.	Interfaz de comandos de movimiento	101
4.3.	Configuración del Drive	106
4.3.1.	Conexiones del Drive	107
4.3.2.	LinMot-Talk 6.8: Project	110
4.3.3.	Control manual	126
4.4.	Control de aceleraciones: Inversión del sistema	127
4.4.1.	Identificación sistema	130
4.4.2.	Validación del sistema	133
5.	Experimentación	135
5.1.	Modo analógico	136
5.2.	Modo curva sinusoidal	139
5.3.	Modo corriente	143
6.	Conclusiones y líneas de futuro	149
	Referencias	151

Índice de figuras

1.1.	Descomposición de la respuesta vibratoria en los diferentes modos propios [6].	1
1.2.	Ejemplo de FRF; magnitud en dB referenciada a $1ms^{-2}N^{-1}$ [8].	2
1.3.	Excitador electrodinámico [4].	3
1.4.	Modelo CAD del excitador inercial.	4
2.1.	Bloque fijo.	7
2.2.	Bloque móvil.	8
2.3.	Bastidor.	8
2.4.	Tubo tipo pilar.	9
2.5.	Disposición de los roscados del pilar.	10
2.6.	Tubo tipo basa.	10
2.7.	Testa inferior.	11
2.8.	Testa superior.	11
2.9.	Placa de atornillamiento.	12
2.10.	Sistema de apoyo.	12
2.11.	Apoyos de la posición vertical.	13
2.12.	Apoyos de la posición horizontal.	13
2.13.	Desgaste presente en la goma debido al desgaste.	14
2.14.	Motor Lineal.	14
2.15.	Vástago.	15
2.16.	Estátor.	16
2.17.	Sistema de cableado.	17
2.18.	Camisa.	18
2.19.	Canales de la camisa de aluminio.	18
2.20.	Guía completa con carril y rodamientos.	19
2.21.	Guía.	20
2.22.	Rodillos.	21
2.23.	Componentes internos del rodillo [32].	21
2.24.	Tipos de perno de los rodillos del sistema de guiado [32].	22
2.25.	Armazón.	23
2.26.	Placa T.	23
2.27.	Posición de los armazones con respecto al motor lineal.	24
2.28.	Tuerca de martillo deslizante.	25
2.29.	Placa de soporte para masas.	26
2.30.	Placa de soporte original.	26
2.31.	Unión de las masas móviles con los armazones definitivos.	27
2.32.	Unión de las masas móviles con el armazón original.	27
2.33.	Diseño de los armazones.	28
2.34.	Placa de apoyo de mesa sísmica.	28
2.35.	Uso del excitador inercial como mesa sísmica.	29
2.36.	Masa fija.	30
2.37.	Masa móvil.	31

2.38. Armazón con adición de gran cantidad de masa móvil.	32
2.39. Tubos de apoyo de masa fija.	33
2.40. Disposición de la masa fija en el modo vertical.	33
2.41. Disposición de la masa fija en el modo horizontal.	34
2.42. Sistema de fin de carrera.	35
2.43. Sistema de suspensión.	36
2.44. Soporte de las gomas.	37
2.45. Tornillos utilizados.	38
2.46. Arandelas utilizadas.	38
2.47. Tuercas utilizadas.	39
2.48. Ubicación de los espárragos provisionales M12.	39
2.49. Drive LinMot serie E1400 [18]	40
2.50. Drive serie E1400.	41
2.51. Vista en planta del maletín de control.	41
2.52. Cable Ethernet con adaptador USB.	42
2.53. Vista frontal del maletín.	43
2.54. Seta de emergencia.	44
2.55. Botonera externa.	46
2.56. Perfil derecho del maletín de control.	47
2.57. Perfil izquierdo del maletín de control.	48
2.58. Vista trasera del maletín de control.	49
2.59. Conexión a la red trifásica de 400V.	49
3.1. Placa de la testa superior en formato DWG.	51
3.2. Regleta de unión de perfiles [10]	53
3.3. Tuerca de martillo deslizante para unión de perfiles [10].	54
3.4. Corte del carril mediante el uso de la sierra de cinta.	56
3.5. Comparación del los carriles tras el mecanizado.	57
3.6. Posición de los taladros en la cara exterior.	58
3.7. Posición de los taladros en la cara inferior.	58
3.8. Mecanizado de los pilares mediante la taladradora en columna.	59
3.9. Taladro en columna de grandes dimensiones [28]	60
3.10. Colocación de las testas en el bastidor.	61
3.11. Ensamblaje del bastidor.	62
3.12. Cordones de soldadura empleados en las testas.	63
3.13. Cordones de soldadura empleados en el bastidor.	63
3.14. Taladrado de la base del bastidor.	64
3.15. Taladrado de la base del bastidor.	65
3.16. Posición de los agujeros de las masas móviles.	66
3.17. Plano de montaje del armazón principal.	67
3.18. Cordones de soldadura sobre el armazón original.	68
3.19. Fabricación de las placas soporte definitivas.	69
3.20. Alzado de la placas de apoyo de mesa sísmica.	70
3.21. Taladrado de las placas T.	71

3.22. Avellanado de las placas T.	71
3.23. Sujeción del armazón durante el proceso de soldado.	72
3.24. Plano de montaje del armazón principal.	73
3.25. Lijado de las placas soporte para masas.	73
3.26. Cordones de soldadura sobre el armazón definitivo.	74
3.27. Archivo .STL del casquillo.	75
3.28. Taladrado de la base del bastidor.	75
3.29. Colocación del cabezal de estátor con respecto a la camisa.	76
3.30. Taladrado de la base del bastidor.	78
3.31. Montaje de los rodillos.	79
3.32. Preajuste del sistema de guiado lineal.	80
3.33. Colocación del bastidor y el bloque móvil previa al ensamblaje.	83
3.34. Adición de masa móvil al armazón.	85
3.35. Sistema de suspensión instalado para el modo corriente.	86
4.1. Esquema de control lazo cerrado del motor lineal.	87
4.2. Estructura del sistema de control de posición [21]	88
4.3. Encoder lineal seno coseno [17].	90
4.4. Control del movimiento mediante PLC [24].	91
4.5. Software de configuración del drive LinMotTalk 6 [22].	92
4.6. Diagrama de control de movimiento del motor [23].	93
4.7. Estados máquina del excitador inercial [15].	94
4.8. Desplazamiento mediante interpolador VA [23].	103
4.9. Modo curva sinusoidal [23].	104
4.10. Conexiones del controlador E1400 [18].	106
4.11. Colocación de los conectores del drive E1400 [20].	107
4.12. Árbol del proyecto.	110
4.13. Panel de Control.	111
4.14. Palabras de intercambio.	112
4.15. Sub paneles de control.	112
4.16. Interfaz de comandos de movimiento [28].	113
4.17. Desplegables principales.	114
4.18. Directorio OS.	114
4.19. X4 I/O Definitions.	115
4.20. Position Lag Always.	116
4.21. Home Position Configuration.	117
4.22. Run Mode Selection.	118
4.23. Control Parameter Set A.	119
4.24. Módulo EasySteps.	121
4.25. MC SW Overview.	122
4.26. Osciloscopio.	123
4.27. Panel de curvas.	124
4.28. Curva compuesta.	124
4.29. Tabla de comandos.	125

4.30. Control manual del encendido y el Homing.	126
4.31. Visualización de los parámetros de escala a tiempo real.	126
4.32. Sistema de control de posición.	127
4.33. Sistema de control en aceleración.	127
4.34. Sistema de control en lazo abierto ideal.	128
4.35. Controlador CompactRIO.	129
4.36. Conexionado para la identificación del sistema.	130
4.37. Aplicación Real Time.	131
4.38. Módulo de identificación.	131
4.39. Bloque de señal UWN de entrada.	132
4.40. FRF obtenida en la identificación del sistema.	132
4.41. Módulo de replicación.	133
4.42. Señal de entrada al shaker.	133
4.43. Perfil de aceleraciones obtenido.	134
5.1. Posicionamiento del láser.	135
5.2. Sistema de fijación del bastidor.	136
5.3. Visualización del modo analógico en el osciloscopio LinMot.	136
5.4. Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 1.5 Hz.	137
5.5. Modo analógico con amplitud 50 mm y frecuencia 1.5 Hz.	138
5.6. Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 4 Hz.	138
5.7. Desfase entre la señal de consigna y de salida del actuador.	139
5.8. Visualización del modo curva en el osciloscopio LinMot.	139
5.9. Modo curva con amplitud 10 mm y frecuencia 1.5 Hz.	140
5.10. Modo curva con amplitud 50 mm y frecuencia 1.5 Hz.	140
5.11. Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 4 Hz.	141
5.12. Comparación en el ensayo 3 de los modos analógico y curva.	141
5.13. Configuración del análisis modal en Dewesoft X3.	142
5.14. Aceleración modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 1.5 Hz.	143
5.15. Desplazamiento modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 1.5 Hz.	144
5.16. Aceleración modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 6 Hz.	144
5.17. Desplazamiento modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 6 Hz.	145
5.18. Aceleración modo corriente con amplitud 5 V y frecuencia 6 Hz.	145
5.19. Desplazamiento modo corriente con amplitud 5 V y frecuencia 6 Hz.	146
5.20. Modo especial con corriente max. 9 A y señal de 4.6 V y 6.5 Hz.	147

Índice de tablas

2.1. Esquema de conexión de la regleta.	46
3.1. Procesos del montaje entre los bloques fijo y móvil	82
4.1. State Var [23].	95
4.2. Comando de movimiento [15].	101
4.3. Bits del Command ID [15].	102
4.4. Conector X4 [18].	108

1. Introducción

El avance en la tecnología y el desarrollo de nuevos materiales y diseños en estas últimas décadas ha propiciado la construcción de estructuras cada vez más esbeltas y ligeras. Los largos puentes y rascacielos, característicos de las grandes ciudades de la actualidad, son claros ejemplos de este tipo de estructura esbelta en la construcción civil. En contrapartida, el aumento de la esbeltez y ligereza en dichas estructuras, debida a la imposición de fuertes criterios estéticos y reducción de costes, las hace muy susceptibles de experimentar vibraciones y desplazamientos al ser sometidas por cargas dinámicas, ya que presentan un alto nivel de flexibilidad y poco amortiguamiento [8].

Acciones dinámicas como el viento, los terremotos o el tráfico de vehículos y personas son capaces de inducir desplazamientos y aceleraciones indeseables sobre la estructura, generando incomodidad en los viandantes y llegando incluso a superar el estado límite de servicio en vibraciones, problemática que no existía antiguamente debido principalmente al sobredimensionamiento tradicional en las construcciones [26]. Cuando el espectro de frecuencias de las cargas dinámicas aplicadas a una estructura engloba alguno de sus modos propios (Figura 1.1), se produce un efecto de resonancia que incrementa el nivel de vibraciones que experimenta dicha estructura en relación a las cargas aplicadas.

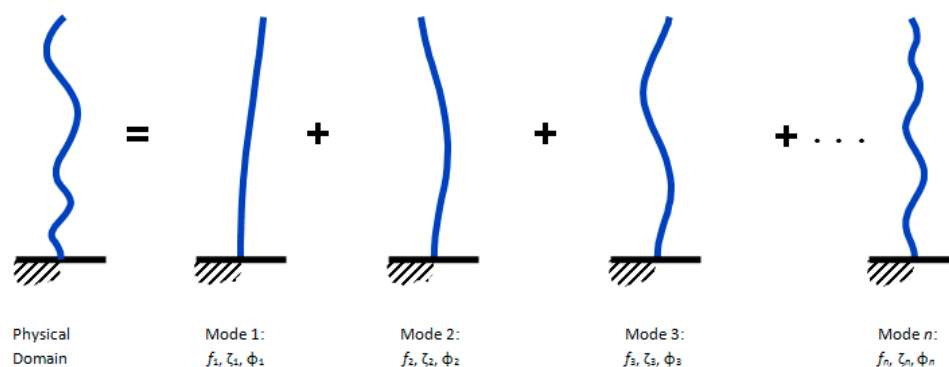


Figura 1.1: Descomposición de la respuesta vibratoria en los diferentes modos propios [6].

Si bien en la arquitectura moderna y la ingeniería civil tiene en cuenta limitar el nivel de vibraciones a la hora de diseñar una estructura, es posible que debido a errores, incertidumbre o fenómenos no contemplados en la fase de concepción de la estructura, esta no cumpla con las especificaciones de partida una vez puesta en servicio. Un ejemplo conocido al respecto es la pasarela *Millennium Bridge* en Londres, la cuál requirió de la instalación de una serie de amortiguadores de masa y viscosos, sintonizados para disminuir las vibraciones verticales y laterales [7]. Este fenómeno pone de manifiesto la importancia de la caracterización experimental del comportamiento dinámico de la estructuras, con el objetivo de identificar los parámetros dinámicos de la estructura para posteriormente aplicar medidas de respuesta dinámica que eliminan los niveles de vibración no deseados.

1.1. Marco Teórico

Además de la masa, la rigidez y el amortiguamiento, las estructuras cuentan con una serie de parámetros modales, como son las frecuencias propias (f , ω), los modos propios (ϕ) y los factores de amortiguamiento (ξ), que se encuentran fuertemente ligadas a las propiedades físicas anteriormente mencionadas y que a su vez son los parámetros que modulan el comportamiento de las estructuras ante una excitación dada [26].

A la hora de determinar los parámetros modales de una estructura ya construida, el método de análisis modal experimental, también conocido como *modal testing* o EMA, se ha perfilado en los últimos años como uno de los métodos más fiables y empleados para la caracterización de estructuras, ya no solo dentro del campo de los métodos experimentales, sino englobando también los métodos analíticos y numéricos mediante el uso de elementos finitos [6].

El método EMA obtiene los parámetros modales a partir de las curvas FRF (Frequency Response Function) o respuesta en frecuencia, que se obtiene de relacionar la ganancia de amplitud entre la respuesta y la excitación con la frecuencia de excitación armónica del sistema en ese punto (Figura 1.2). Hay que tener en cuenta que para este método de análisis modal es necesario conocer los valores tanto de la entrada (excitación) como de la salida (respuesta) del sistema [4].

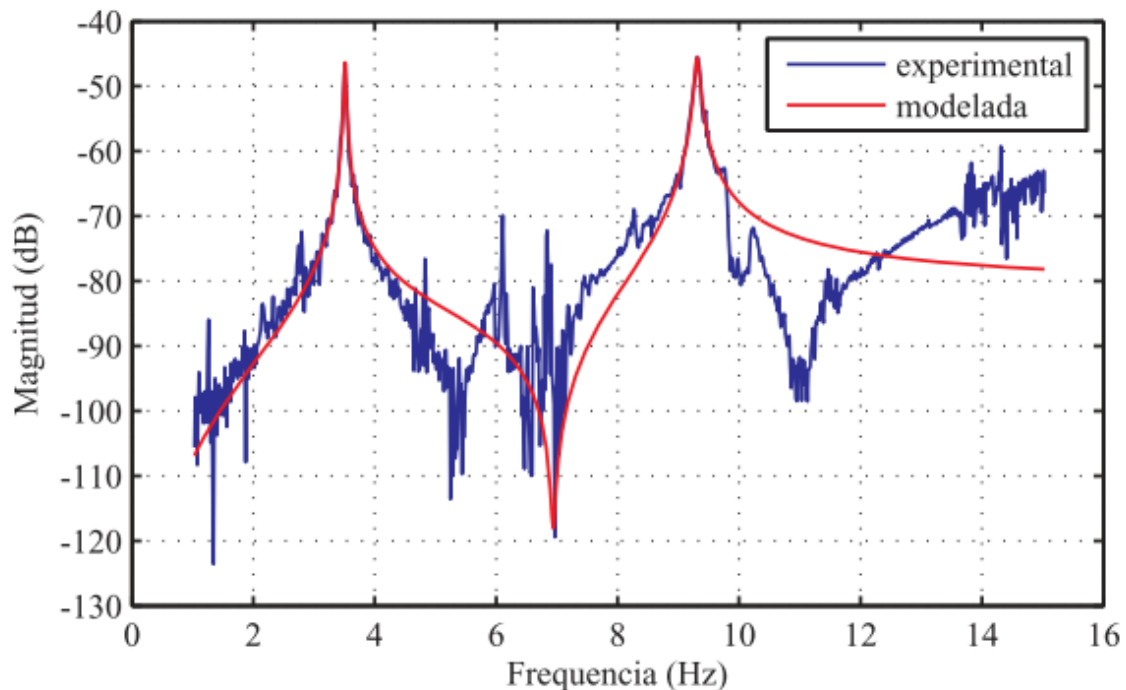


Figura 1.2: Ejemplo de FRF; magnitud en dB referenciada a $1ms^{-2}N^{-1}$ [8].

Para la medición de la respuesta se realiza un registro mediante el uso de transductores tanto de los movimientos como de las fuerzas en diversos puntos de la estructura. El acelerómetro es el transductor más utilizado en los ensayos de vibraciones debido a su tamaño contenido, y a su rango de sensibilidad y frecuencias útiles. Finalmente se necesita de una fuente de excitación conocida que sea capaz de inducir vibraciones en la estructura. En cuanto a las técnicas de excitación se pueden distinguir entre aquellas que permanecen en contacto con la estructura y proporcionan una señal de excitación continua (senoidal, aleatoria ect.) mediante el uso de excitadores electromagnéticos, electromecánicos o electrohidráulicos (Figura 1.3), y aquellas que por el contrario solo permanecen en contacto con la estructura un reducido espacio de tiempo, como en el caso de los excitadores de tipo martillo.



Figura 1.3: Excitador electrodinámico [4].

Si el estudio se centra más específicamente en el comportamiento de una determinada estructura ante terremotos, el análisis de respuesta en el tiempo (ART) es un método de análisis estructural dinámico el cual es capaz de reproducir una respuesta más real ante excitaciones dinámicas de esta naturaleza [30]. Este método hace uso de acelerogramas de registros sísmicos reales que se pueden obtener a través de distintas bases de datos, aplicándoles previamente un correcto reescalado para su aplicación.

Para estructuras de pequeño tamaño o que se pueden probar en escala reducida sin que haya una gran variación de las propiedades, el ensayo mediante mesa vibratoria es una de las técnicas de ensayo más adecuadas para este tipo de análisis, pudiendo conseguir una respuesta dinámica verdadera ante un terremoto especificado, debido a que la estructura es verdaderamente deformada por las fuerzas de inercia distribuidas debidas a la masa [29]. Este tipo de ensayos consisten en el uso de una plataforma rígida de 1 o más ejes que se desplaza de acuerdo a la consigna en aceleración propia del acelerograma utilizado, deformando la estructura asentada en la base de la plataforma [28].

Al igual que en método de análisis experimental con contacto continuo, el ensayo de mesa sísmica hace uso de una fuente de excitación capaz de generar una fuerza de módulo y frecuencia variable. Hay que tener en cuenta que es posible utilizar la mesas sísmica para realizar ensayos EMA, pero que se encuentran limitados a estructuras muy pequeñas en tamaño, debido a que los modelos a escala difieren en propiedades físicas y modales con respecto a las estructuras reales, de tamaño demasiado elevado para realizar un ensayo sísmico de mesa vibrante.

1.2. Motivación

En la línea mostrada en el apartado anterior, el presente trabajo se centra en el desarrollo de un dispositivo que pueda ser capaz de generar señales de excitación continua y que sea perfectamente compatible tanto para la realización de ensayos EMA para grandes estructuras reales, como para la aplicación de ensayos ART para maquetas y pequeñas estructuras gracias al uso de una placa sísmica que pueda ser acoplada al dispositivo.

El diseño y construcción de un excitador inercial bifuncional, capaz de adaptarse a ensayos de muy distinta naturaleza, supone una alternativa interesante a tener en cuenta para su uso dentro del campo de la investigación de la ingeniería estructural gracias a su flexibilidad operativa, además del ahorro en costes que supone no tener que adquirir un dispositivo específico para cada ensayo.

Para tal empresa se ha escogido el actuador lineal P10-70x400U, un motor electromagnético capaz de proporcionar una señal continua de excitación de gran magnitud. Partiendo de dicho actuador, este trabajo se pretende diseñar, ensamblar y configurar un excitador bifuncional que sea totalmente operativo y adaptable tanto para realizar el análisis modal experimental de estructuras reales como para la simulación de seísmos (Figura 1.4).

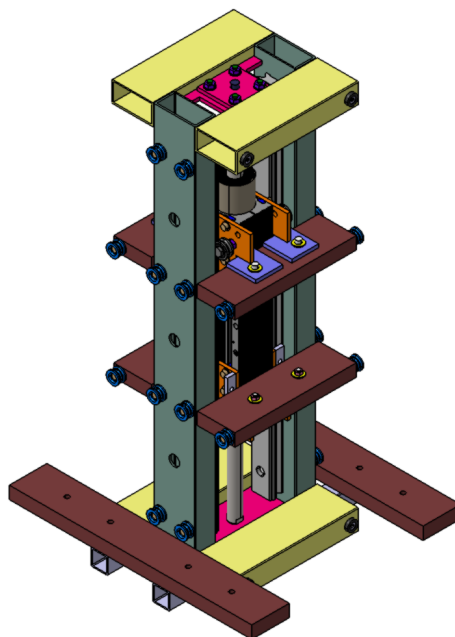


Figura 1.4: Modelo CAD del excitador inercial.

1.3. Objetivos

Visto el objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster se han determinado los objetivos particulares de cara al prototipado completo del excitador inercial bifuncional y que ha definido el alcance final de este proyecto. En cuanto la parte mecánica que engloba al sistema, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- El diseño del excitador inercial debe ser lo más compacto posible, capaz de ser introducido en un maletero de un utilitario convencional.
- El montaje debe poseer un peso contenido que permita ser transportado por una persona con una carretilla manual sin grandes dificultades.
- El movimiento del actuador debe estar perfectamente guiado y restringido, con la inclusión de un sistema de guiado lineal que permita un desplazamiento preciso con bajo grado de vibraciones entre los bloques fijo y móvil pero con un valor de las fuerzas de rozamiento limitada.
- El diseño debe hacer énfasis en un correcto alineamiento entre el vástago del motor y el sistema de guiado que reduzca en lo posible la aparición de momentos inducidos aplicados al sistema.
- El excitador inercial debe de poder disponerse tanto en horizontal como en vertical.
- Inclusión de un sistema que mantenga el bloque fijo del excitador totalmente inmóvil y apoyado sobre la superficie de trabajo, impidiendo la aparición de vibraciones por todo el bastidor.
- El contacto entre el excitador y el suelo debe ser libre de golpes y ralladuras, mediante la inclusión de un sistema de apoyo tanto en la disposición vertical como horizontal.
- El montaje debe ser capaz de adicionar gran cantidad de masa al bloque móvil con el objetivo de modificar las prestaciones del excitador inercial.
- El bloque móvil asociado al estátor debe contar con un sistema que permita acoplar la mesa sísmica al montante.
- Implementar un sistema de fin de carrera que evite colisiones entre los bloques fijo y móvil del excitador inercial.
- El excitador inercial debe contar con un sistema auxiliar que mantenga el bloque móvil de actuador en suspensión en todo momento cuando el sistema trabaje en modo vertical, evitando colisiones. Este mismo sistema debe encargarse de mantener el actuador alejado de la zona de fina de carrera cuando el control de posición esté desactivado (modo corriente).
- El diseño de las piezas que componen el montaje deben permitir una fabricación sencilla y de coste reducido.

- Aplicar un diseño del excitador inercial que permita un protocolo de montaje y ensamblaje de todas las piezas sin grandes complicaciones y que no necesite de herramientas muy específicas.

En lo referente al funcionamiento del propio excitador y su control operacional, se han definido los siguientes objetivos:

- El motor lineal debe ser capaz de proporcionar altas prestaciones en cuanto a la amplitud de movimiento, velocidad y aceleración, dentro del rango de frecuencias de uso en para este tipo de ensayos estructurales (0-10 Hz).
- El perfil de movimiento del bloque móvil del excitador debe ajustarse de forma fiel a las señales de consigna continua que le proporciona al usuario, ya sea en desplazamiento o en aceleraciones.
- Realizar las configuraciones oportunas del motor lineal para que sea capaz de operar en distintos modos de funcionamiento en función de las necesidades del ensayo, distinguiendo 3 modos principales: Modo analógico, modo curva senoidal y modo especial.
- Implantar una botonera externa que permita manejar y alterar el funcionamiento del actuador sin tener que hacer uso directo del software LinMot-Talk, aplicando al módulo de control las configuraciones necesarias.
- Para el uso del excitador como mesa sísmica, implementar un control de fuerza o aceleración para la aplicación de acelerogramas. El motor lineal cuenta por defecto con un control de posición, lo que se traduce en desarrollar un sistema que permita alterar el control del motor, distinguiendo dos posibilidades: El uso del modo corriente o utilizar un controlador externo capaz de invertir el sistema drive+actuador.

1.4. Descripción del proyecto

Vistas las premisas anteriores, el proyecto se ha centrado en el desarrollo de los siguientes campos:

- Diseño y caracterización de cada uno de los componentes que conforman el excitador inercial (Capítulo 2; Anexo A.5).
- Prototipado del sistema, que engloba tanto los procesos de fabricación de cada una de las piezas como el montaje completo del excitador (Capítulo 3).
- Estudio del funcionamiento del servo drive encargado del control de movimiento del motor lineal, para más adelante configurar la dinámica del sistema en función de los modos de funcionamiento deseados (Capítulo 4; Anexos A.1 y A.2).
- Puesta en marcha del excitador inercial, analizando su desempeño en sus distintos modos de funcionamiento (Capítulo 5; Anexo A.3).

2. Componentes

Para el diseño de los componentes del excitador se ha seguido criterios de sobredimensionamiento que garanticen la integridad estructural de todo el sistema ante las fuerzas que desarrolla el actuador al desplazarse, en base a la experiencia adquirida en el desarrollo de otros prototipos anteriores [5]. El excitador inercial consta de diversos elementos de diversa función y naturaleza, que se pueden agrupar en dos bloques fácilmente distinguibles durante su funcionamiento:

- **Bloque fijo:** Componentes que permanecen estáticos durante el funcionamiento del excitador, más allá de las vibraciones de pequeña amplitud que pueda sufrir el conjunto, en caso de que la sujeción al terreno base donde se apoye sea deficiente, debido principalmente a la gran fuerza que puede desarrollar el motor lineal. El bloque fijo (Figura 2.1) está formada principalmente por el bastidor, que forma el cuerpo del sistema, junto a otros elementos como el carril guía y el vástago. De forma auxiliar se pueden incluir los tubos de apoyo para masas fijas y las propias masa fijas.

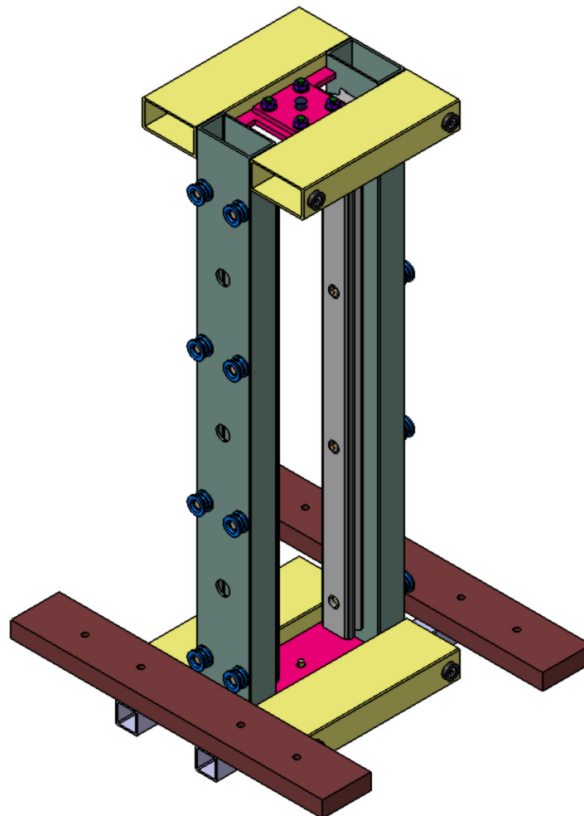


Figura 2.1: Bloque fijo.

- **Bloque móvil:** Son los elementos que se desplazan unidos rígidamente al motor, concretamente al estátor. Los bloques móvil y fijo se encuentran unidos mediante los carriles guía y el vástago, haciendo que el único movimiento relativo entre los elementos fijos y móviles sea exclusivamente lineal a lo largo del eje vertical. El bloque (Figura 2.2) está formado por el propio motor lineal (a excepción del vástago), el armazón, los rodillos del sistema de guiado y de forma auxiliar las masas móviles.

Fuera de esta clasificación se encuentran por un lado el sistema de suspensión y la tornería, cuyos elementos se encuentran presentes en todo el excitador inercial, y el drive, que ha efectos constructivos es un elemento totalmente separado del resto del montaje.

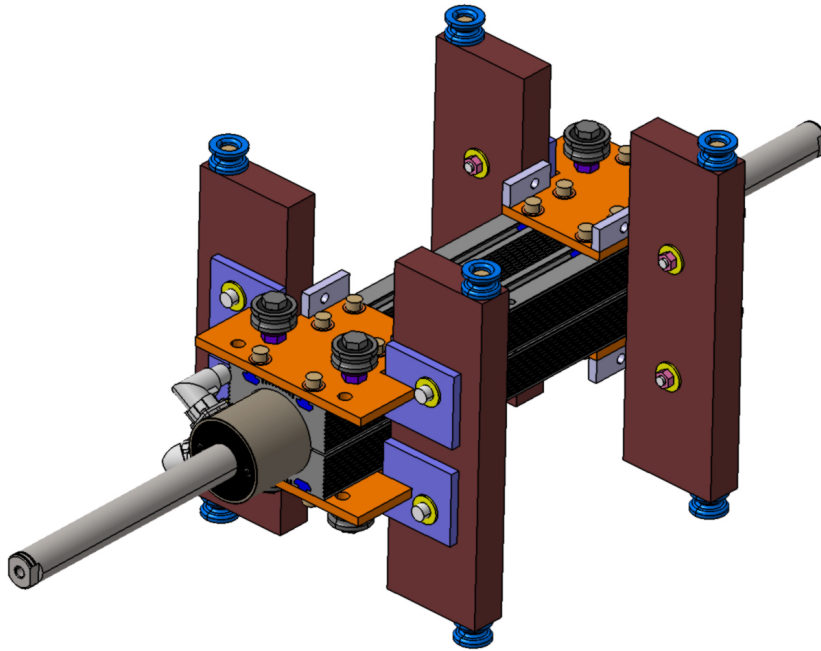


Figura 2.2: Bloque móvil.

2.1. Bastidor

Es el armazón que sustenta y protege el bloque móvil en su interior, y que permite que el sistema pueda apoyarse tanto en vertical como horizontal y sea transportado con relativa facilidad, siendo lo más ligero posible y teniendo el tamaño suficiente para poderse transportar en un maletero de un automóvil. Dicho bastidor cuenta con los siguientes componentes:

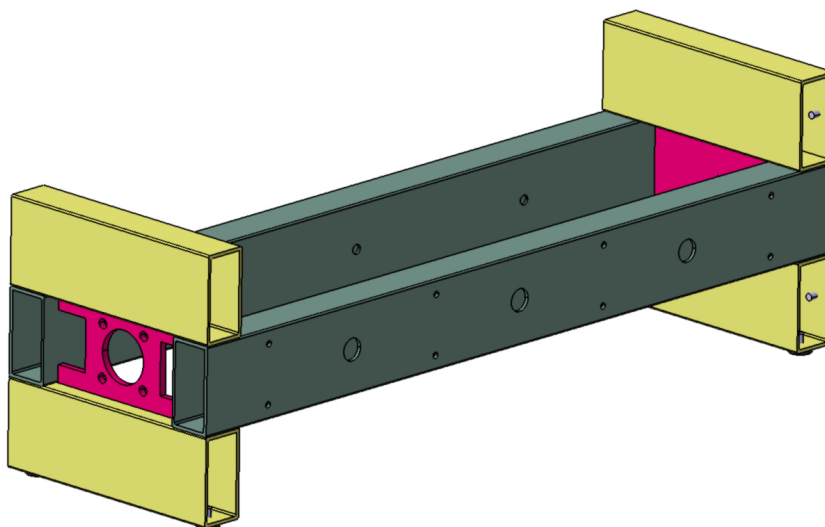


Figura 2.3: Bastidor.

2.1.1. Tubos

Forman el cuerpo del bastidor (Figura 2.3). Son tubos de sección rectangular de 50 mm de alto por 100 mm de ancho, con un radio de acuerdo externo de 1,91 mm. El espesor de las piezas es de 4 mm, lo que le confiere las características mecánicas suficientes aún conservando un bajo peso. Dentro del montaje los tubos del bastidor se distinguen en dos clases diferenciadas principalmente por su función:

- **Pilar:** El bastidor cuenta con dos tubos de 934 mm de longitud que delimitan la altura total del sistema (Figura 2.4). A estos pilares se atornillan los carriles del sistema de guiado lineal de el bloque móvil. Al mismo tiempo cada pilar se encuentra soldado a 4 bases, dos a dos, según estas pertenezcan a la parte superior o inferior.

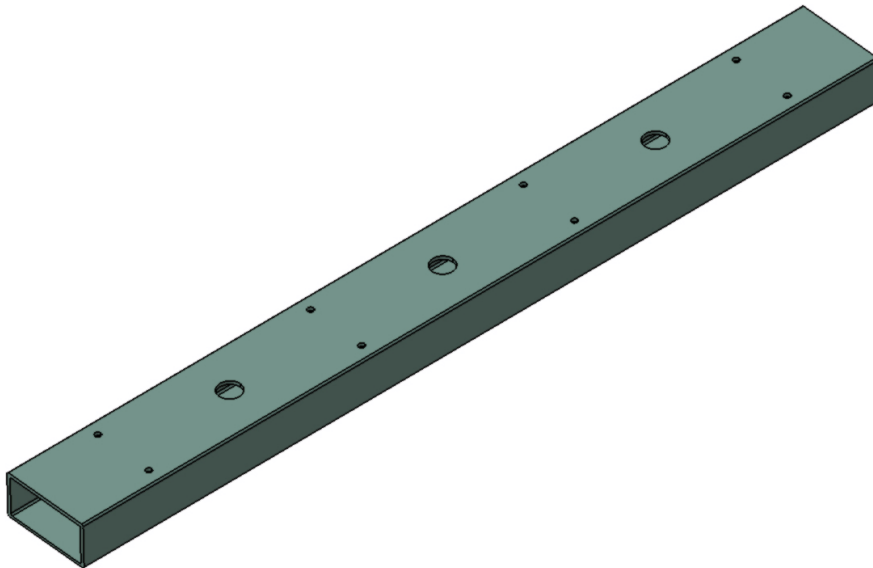
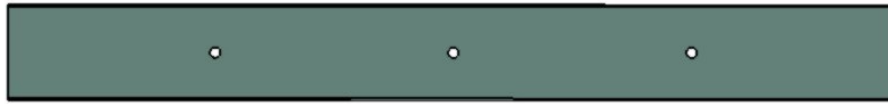


Figura 2.4: Tubo tipo pilar.

A lo largo de toda la longitud del tubo, el pilar cuenta con una serie de patrones de taladros (Figura 2.5):

- **Taladros de unión con el carril guía:** Son 3 taladros pasantes colocados en el punto medio del lado que delimita el ancho de tubo, repartidos por de forma equiespaciada a lo largo de la longitud del pilar en función de la morfología previa del carril guía. Estos agujeros tienen diámetros distintos en función de cara taladrada, siendo de 11 mm en la cara posterior del pilar, que se encuentra en contacto con el carril guía, y de 25 mm en la cara exterior, con el objetivo de tener una apertura suficiente para la entrada de herramientas para atornillamiento pilar-carril.
- **Roscas de unión con el sistema de amortización:** Una serie de agujeros roscados M8 colocadas en la cara exterior anteriormente citada. Su misión es roscar en ellos unos tornillos que forman parte del sistema de suspensión.



(a) Cara interior.



(b) Cara exterior.

Figura 2.5: Disposición de los roscados del pilar.

- Basa: Una serie de tubos de más cortos (Figura 2.6) que forman las bases superiores e inferiores del bastidor, habiendo en cada base dos basas de 290 mm de longitud, cada una soldada a uno de los laterales de los dos pilares. Algunas de las basas cuentan con una serie de taladros roscados para colocar el sistema de apoyo.

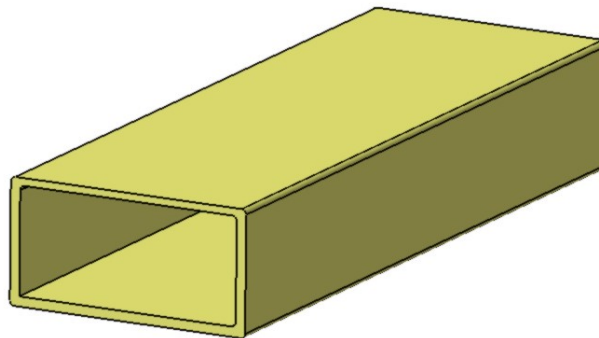


Figura 2.6: Tubo tipo basa.

Los tubos se unen entre ellos mediante cordones de soldadura, si bien durante el montaje se realizó una serie de uniones temporales mediante espárragos.

2.1.2. Testas

Elementos colocados en los extremos superior e inferior del bastidor y cuyo cometido principal es anclar el vástago del motor lineal a la estructura fija. Se colocan soldadas entre el hueco formado por los pilares y las basas, situadas a cierta profundidad respecto al plano exterior de las bases del bastidor, puesto que sobre las testas se colocan un sistema de tornillería, principalmente para la unión vástago-testa. Las testas son de diferente morfología dependiendo de su ubicación, al mismo tiempo que cumplen objetivos distintos:

- Testa inferior: Colocada en la base inferior a una profundidad de 14 mm, consta de un agujero pasante de 12 mm (Figura 2.7) al que va atornillado directamente el vástago, en su orificio de diámetro menor, mediante un tornillo (con su respectiva tuerca y arandela) de M8. Las holguras relativamente grandes entre los agujeros pasantes y los tornillos en las uniones de las testas con los vástagos se deben a un diseño orientado a eliminar restricciones que delimiten el montaje del conjunto, pues se trabaja con poca tolerancia dimensional en ciertos puntos, principalmente entre los rodillos y las guías. A cambio de ello el montaje cuenta con un procedimiento de ajuste. Dicho procedimiento es detallado más adelante (Apartado 3.3.2).

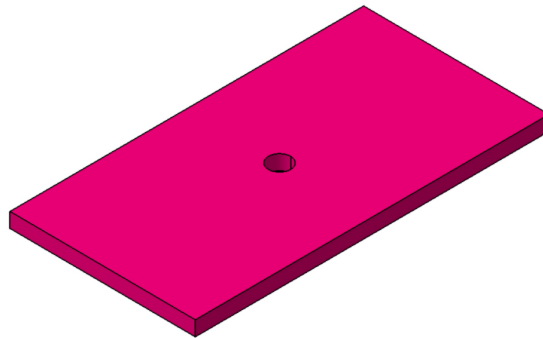


Figura 2.7: Testa inferior.

- Testa superior: Placa colocada a una profundidad de 22 mm sobre el plano superior del bastidor. Respecto a la placa inferior, esta testa cuenta con una serie de particularidades (Figura 2.8). En primer lugar la testa cuenta con dos orificios en los extremos, que proporcionan el espacio suficiente para introducir las guías dentro del cuerpo del bastidor para su montaje. En el centro de gravedad de la placa consta de un agujero pasante de 30 mm, por el que se introduce el vástago dentro de la estructura. Hay que tener en cuenta que al estar el vástago imantado, este tiende a ser atraído por las superficies de acero de la testa, lo cual puede ser problemático. Además este diámetro permite colocar temporalmente un rodamiento de plástico que facilita el montaje.

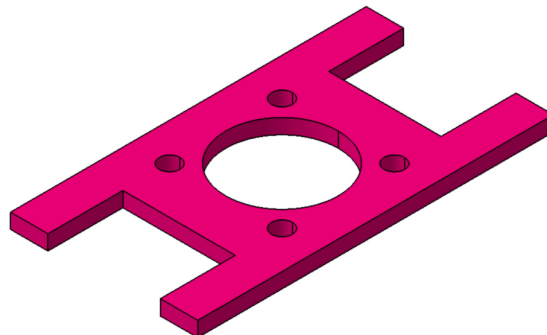


Figura 2.8: Testa superior.

Alrededor de este agujero se encuentran 4 agujeros pasantes de 12 mm de diámetro, formando un cuadrado sobre el plano de la testa. Estos taladros sirven de unión de la testa superior con la placa de atornillamiento (Figura 2.9). Esta placa, cuadrada con los 4 taladros de misma dimensión y posición que la testa, cuenta además en el centro con el agujero pasante de 12 mm de diámetro donde se atornilla en vástago, mediante un tornillo M10x17. Como la testa superior también está unida solidariamente a la placa mediante tornillos, el vástago queda finalmente unido al bastidor en sus dos extremos.

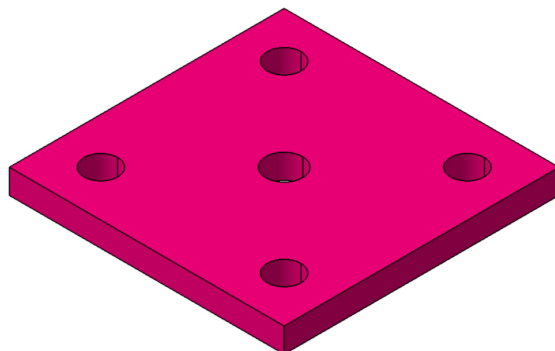


Figura 2.9: Placa de atornillamiento.

2.1.3. Sistema de apoyo

Su misión consiste en que el contacto del montaje con el suelo no sea directamente con el bastidor de la estructura puesto que en ese caso se podrían producir golpes, ralladuras y deformaciones en ambas superficies de contacto durante el funcionamiento del motor. Con estos apoyos se obtiene un contacto suave, amortiguado y que al mismo tiempo facilita el manejo y el traslado del sistema.

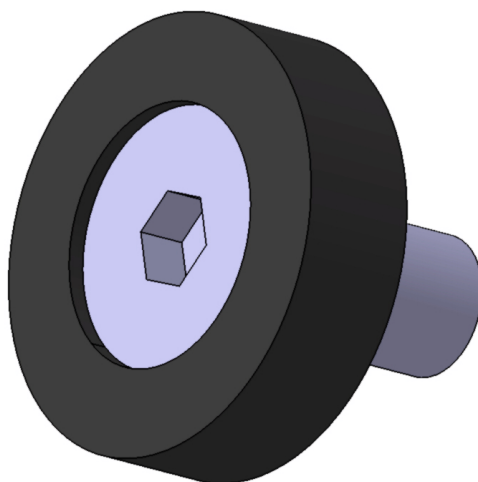


Figura 2.10: Sistema de apoyo.

Los apoyos están formados por un taco de goma atravesado por un tornillo de métrica M8x16 (Figura 2.10). Este tornillo va a su vez roscado en las basas, haciendo que solo sea la goma la que entra en contacto con el suelo. Como el excitador inercial tiene dos posiciones de funcionamiento, en vertical y en horizontal, se colocarán para cada posición un total de 4 apoyos, colocados lo más separados posibles entre ellos y con una formación de geometría rectangular. De esta forma la colocación para cada posición es la siguiente:

- Posición vertical: Los apoyos van atornillados en la base inferior del bastidor, con un apoyo en cada extremo de cada una de las dos basas inferiores, como se observa en la Figura 2.11.

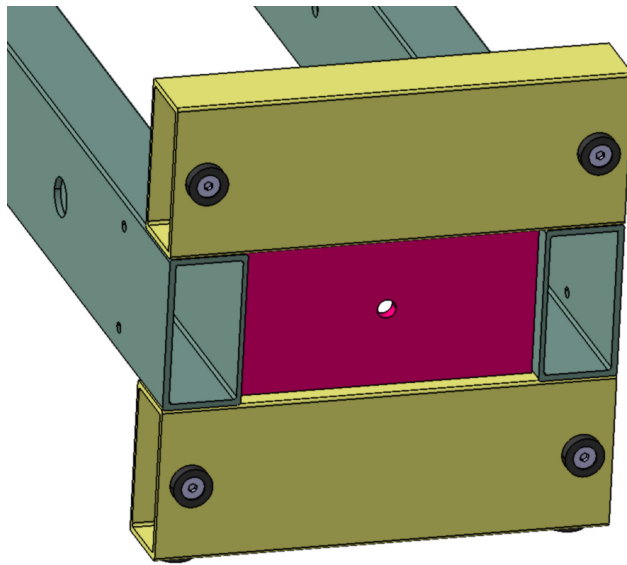


Figura 2.11: Apoyos de la posición vertical.

- Posición horizontal: Los apoyos para esta posición se encuentran roscados en los extremos de las basas que conforman el lateral de apoyo, esta vez roscados en la cara lateral de tubo de 50 mm de ancho (Figura 2.12).

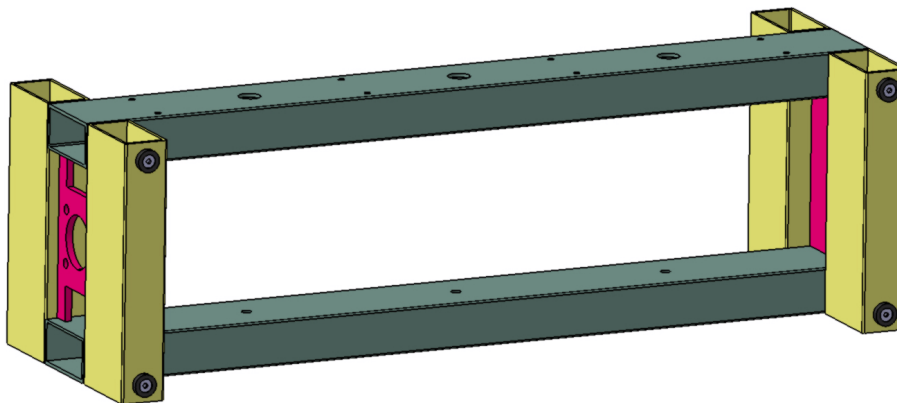


Figura 2.12: Apoyos de la posición horizontal.

Hay que tener en cuenta que debido al uso continuado y a las grandes fuerzas a las que son sometidas las gomas, estas sufren un acusado desgaste (Figura 2.13) y se deben restituir periódicamente.

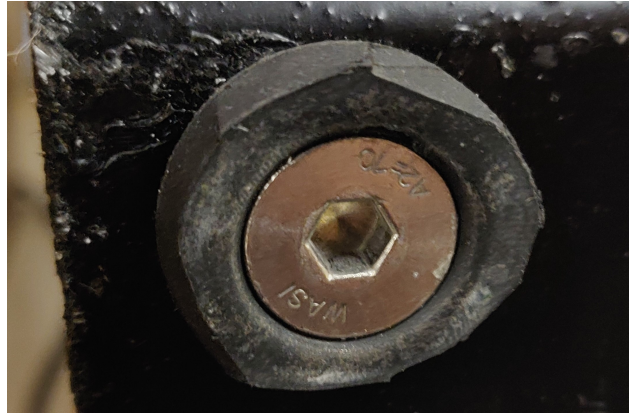


Figura 2.13: Desgaste presente en la goma debido al desgaste.

2.2. Motor Lineal

Es el aparato que se encarga de desplazar la bloque móvil del sistema según como lo haya requerido el usuario. Las ventajas de este motor respecto a otros actuadores reside en que puede realizar desplazamientos de gran magnitud manteniendo una elevada precisión, exactitud y velocidad de respuesta, ya que la fricción entre los distintos componentes es muy reducida, gracias al uso de fuerzas de origen electromagnético. El motor elegido corresponde al modelo P10-70x400U-BL-QJ (Figura 2.14), fabricado por la compañía LinMot, y consta de los siguientes componentes principales:

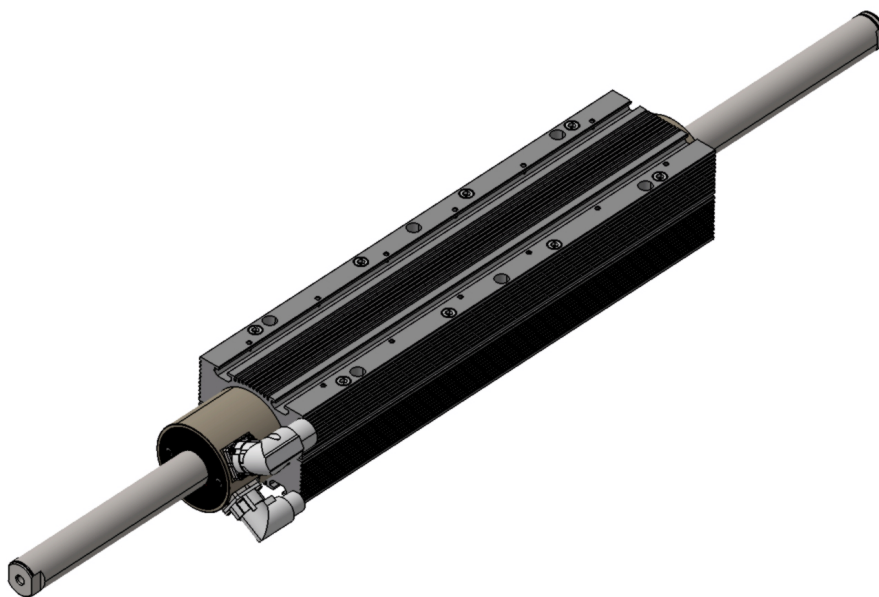


Figura 2.14: Motor Lineal.

2.2.1. Vástago

Este componente del motor lineal es el que se encarga de proporcionar un guía para que el estátor se pueda trasladar linealmente. Esta formado por un cilindro de acero inoxidable con un acabado de alta calidad superficial y bajos grados de tolerancias geométricas (Figura 2.15). En su interior contiene una serie de imanes de neodimio, que junto al devanado del estátor se generan los movimientos de traslación relativos entre dichas piezas del motor. El vástago tiene una longitud totales de 890 mm, con un diámetro exterior de 28 mm. El peso de todo el montante asciende hasta los 4.18 kg.

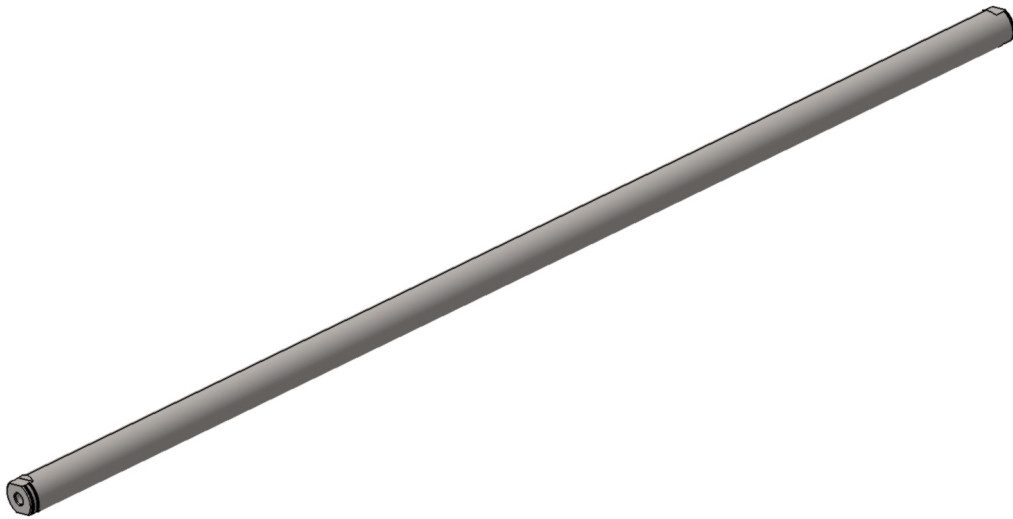


Figura 2.15: Vástago.

El cilindro de acero cuenta además con dos taladros roscados en cada cara del mismo, uno de métrica M8x10 mm y otro de de dimensiones M10x20 mm. Estos taladros son utilizados para anclar el vástago al bastidor exterior, impidiendo cualquier movimiento de traslación del mismo más allá de las tolerancias de juego del montante (el posible movimiento de rotación sobre el eje del vástago no es relevante). En el diseño del montaje, el roscado M10 se colocará en la parte superior del bastidor, mientras que el taladro de menor diámetro se colocará en la parte inferior.

Es relevante evitar que el vástago sufra cualquier daño o desperfecto, que pondría suponer un mal funcionamiento del sistema electromagnético del motor en caso de daños en los imanes, así como un desplazamiento relativo del estátor sobre el vástago no óptimo si el cilindro de acero sufre algún daño superficial. Hay que tener que el vástago se encuentra imantado, por lo que hay que tener un especial cuidado en el manejo del vástago durante el montaje, ya que se encuentra en presencia de multitud de materiales ferromagnéticos.

2.2.2. Estátor

Es la parte móvil del motor lineal que se traslada a lo largo de toda la longitud del vástago. El estátor (Figura 2.16) está formado por un bobinado de cobre por el que circula una corriente eléctrica. Dicho flujo de corriente sobre el conductor genera un campo eléctrico, que al interactuar con los imanes permanentes del vástago, que se encuentran dentro del estátor a modo de núcleo ferromagnético, se genera una fuerza mecánica que permite el desplazamiento relativo vástago-estátor.

De esta forma se genera un movimiento lineal de gran eficiencia energética (la energía que se introduce al motor es en origen puramente eléctrica), baja fricción y desgaste, y sin el uso de ningún elemento mecánico intermedio como engranajes, husillos o correas. Al mismo tiempo, el movimiento generado está ligado a la naturaleza de la corriente del bobinado, que se puede alterar según las necesidades del usuario. Para ello el motor cuenta con sistema encoder de posicionamiento, así como un microprocesador que es capaz de monitorizar la posición del estátor respecto al vástago.

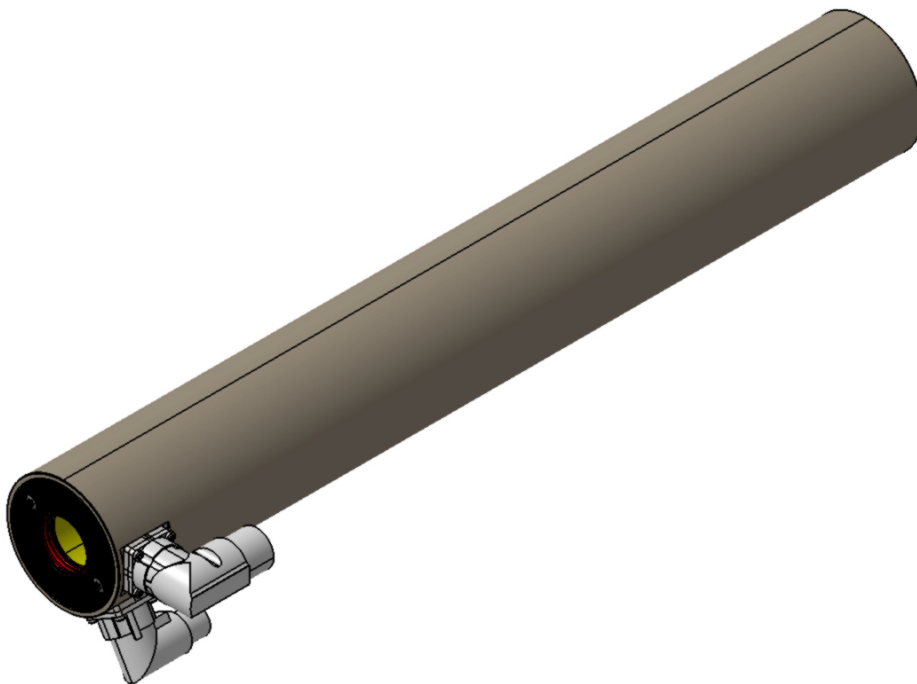


Figura 2.16: Estátor.

Mediante el uso del drive y del PID integrado, se puede controlar el desplazamiento, pudiendo controlar la amplitud y frecuencia del desplazamiento, así como inducirles ciertas curvas de oscilación como consigna del movimiento. En cuanto a las características mecánicas, el estátor cuenta con un longitud de 500 mm y un peso total de 8.25 kg, con una fuerza máxima de empuje según fabricante de 2720 N, con una velocidad punta de 3.9 m/s.

El estátor debe ser alimentado por 2 fuentes distintas (Figura 2.17):

- Corriente de alimentación: Es la corriente que alimenta el bobinado del estátor y que se convierte en energía mecánica. Dicha corriente corresponde al cableado naranja, que se conecta a una corriente trifásica de 400 V.
- Señal de codificación: Señal de control que transmite el motor al drive y es la encargada de cerrar el lazo de control. Se produce una recirculación de los parámetros internos del motor al drive para realizar el control de la posición, fuerza o velocidad. Corresponde al cable verde.

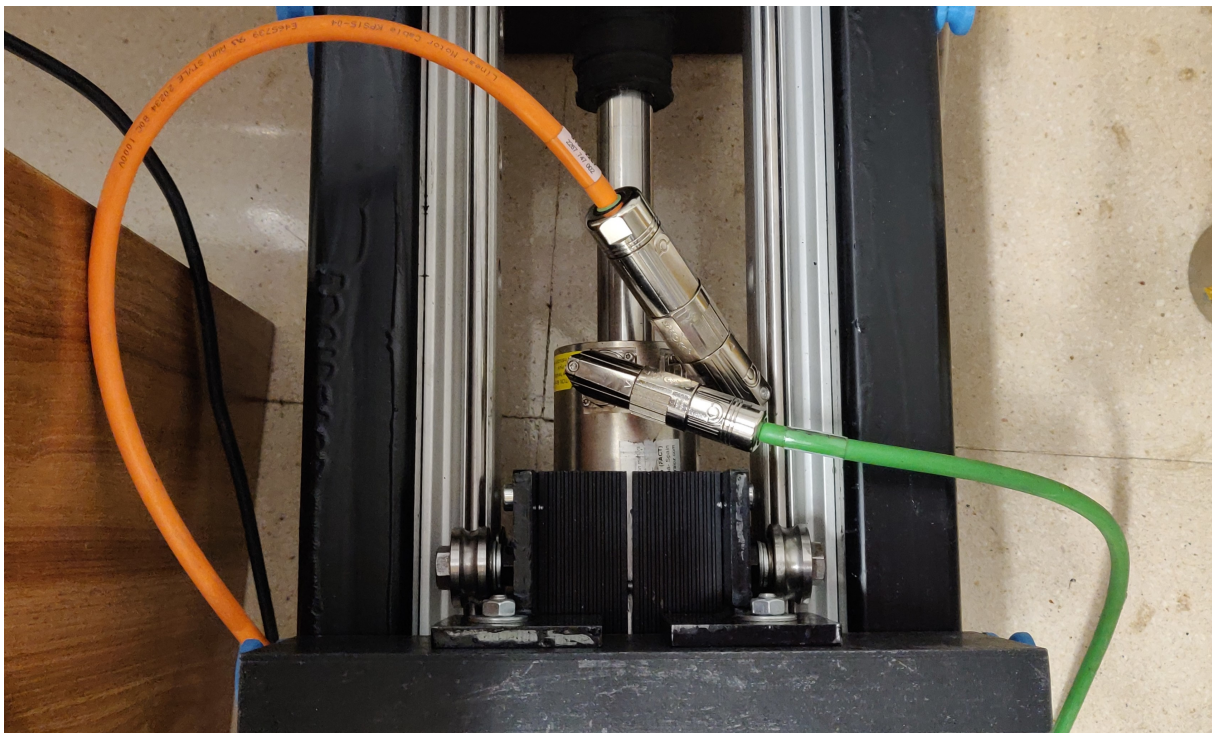


Figura 2.17: Sistema de cableado.

A la hora de interactuar con el estátor, especialmente durante el montaje, hay que tener cuidado en no dañar los cabezales de conexión de los diferentes cables, ya que son piezas muy susceptibles de deformarse y dañar las conexiones.

2.2.3. Camisa

Este elemento exterior que contiene al estátor. Tiene como objetivo principal mejorar la disipación de calor del motor lineal, evitando el sobrecalentamiento del mismo. La camisa está formada principalmente por dos grandes bloques de aluminio (Figura 2.18) que envuelven el estátor casi en su totalidad, aprisionando las dos piezas entre si gracias a 8 tornillo de métrica M6x45, situados a lo largo de las carcasas de aluminio. La camisa en su conjunto tiene unas dimensiones de 430 mm de longitud, 100 mm de alto y 80 mm de largo, con un peso que asciende hasta los 4.056 kg.

La elección del aluminio como material de la camisa los reside en su gran conductividad térmica, además de ser un material resistente a la corrosión, todo ello además con una densidad baja en comparación a otros metales, lo que hace que el montante tenga un peso no demasiado elevado. Además la superficie de la camisa está formada por multitud de aletas de enfriamiento, que acentúa su capacidad de refrigeración del motor.



Figura 2.18: Camisa.

Junto a las aletas, la camisa cuenta en cada cara principal con 2 canales con una abertura con el espacio suficiente para atornillar en su interior regleta de unión de perfiles mediante tornillos de métrica M8 (Figura 2.19). Con ello se permite poder acoplar al motor diversos elementos constructivos, a los que se han denominado armazón, que permite la adición de masa móvil y la unión de esta y el motor con las guías lineales.

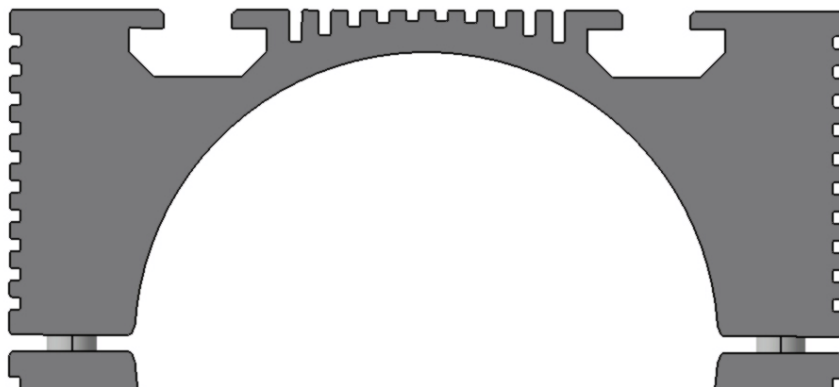


Figura 2.19: Canales de la camisa de aluminio.

A la hora de realizar el montante hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Durante el proceso de montaje y manejo de la camisa con las diferentes piezas del montante del bloque móvil, las carcasas de aluminio son muy susceptibles de sufrir marcas, ralladuras y deformaciones, especialmente cerca de la zona de canalización.
- A la hora de montar la camisa de aluminio alrededor del estátor, al ser un sistema que funciona por un montaje de apriete entre ambas carcasas mediante tornillos, hay que procurar que el ancho final de toda la carcasa sea de 80 mm constantes a lo largo de toda la pieza, regulando el apriete de cada tornillo individualmente. En caso contrario, algunas piezas, pertenecientes al bloque móvil, posteriormente no podrían encajar correctamente.

2.3. Sistema de guiado lineal

Para que el motor lineal pueda desplazarse a lo largo del vástago de forma precisa y segura, el excitador inercial cuenta con un sistema de guiado lineal que se encarga de restringir los grados de libertad no deseados del conjunto móvil, haciendo que solo se pueda desplazar en la dirección deseada. Dicho sistema se ha fabricado a partir de dos sistemas de guiado lineal mediante carril y rodillos (Figura 2.20). Este tipo de soluciones se caracterizan por tener una gran capacidad de carga, con una buena precisión de movimiento y sobretodo con una alta rigidez con respecto a otros sistemas de guiado.

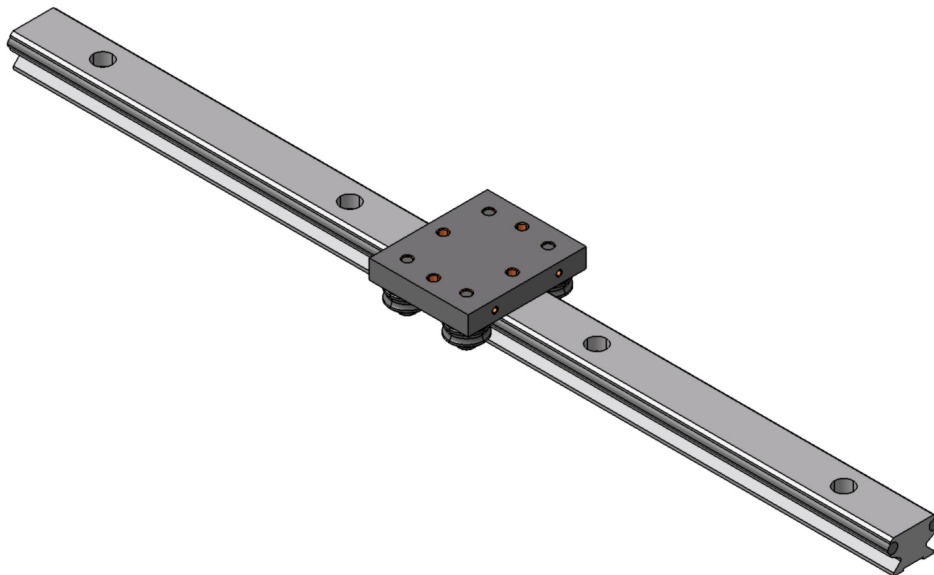


Figura 2.20: Guía completa con carril y rodamientos.

Para la construcción del sistema del excitador inercial se ha hecho uso de dos modelos distintos de sistema de guiado lineal por rodillos, los modelos LFL52-SF-850 y LFL52-SF-1250, ambos fabricados por la compañía Schaeffler, especializada en soluciones de ingeniería mediante rodamientos. Si bien son modelos diferentes, sus características y geometría son completamente idénticas excepción del carril.

A la hora de poder incluir el sistema de guiado, el propio bloque móvil del excitador tiene incorporado un sistema que actúa como carro del guía, por lo que al estructura principal del carro ha sido desechada, diseñando un armazón anclado a la camisa del motor que sirve como soporte para los rodillos guía.

2.3.1. Guía

El bastidor cuenta con dos carriles guía que se encuentran anclados a cada uno de los pilares mediante 3 tornillos de métrica M8x45 y tuercas autoblocantes. Junto a las testas, que se unen al vástago, son los puntos de unión entre el bloque fijo y el bloque móvil del sistema inercial, con la peculiaridad de que el contacto carril-rodillo permite un movimiento lineal del motor a lo largo del bastidor. Los carriles están formada por un perfil macizo de aluminio con 2 ejes cilíndricos de acero que sirven de rodadura para los rodillos. Toda la guía cuenta con una acabado con protección anticorrosión.

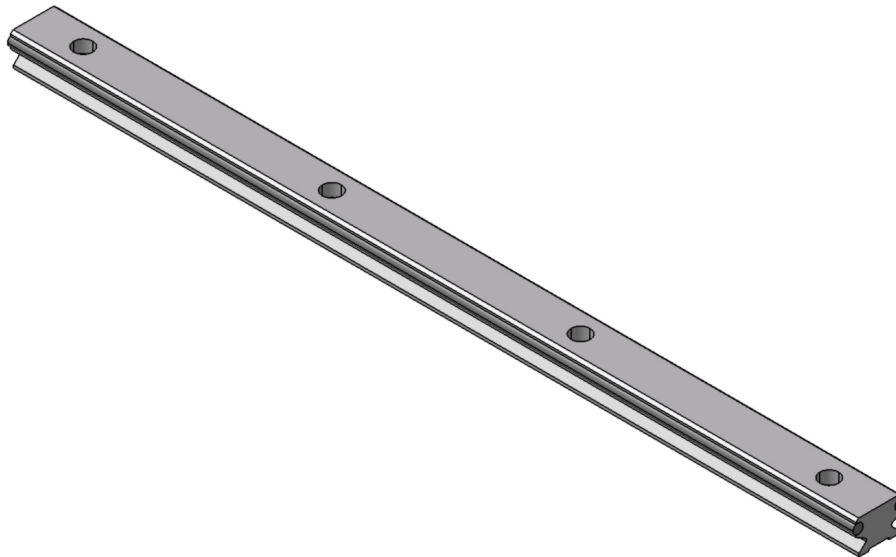


Figura 2.21: Guía.

Debido a que se han utilizado dos modelos de guiado lineal distintos, se parte de dos carriles de longitudes distintas, con 850 mm de tramo guiado para el carril corto y con 1250 mm de longitud para el carril largo. Por motivos de estandarización y con el objetivo de que el excitador inercial sea completamente simétrico, se han realizado los mecanizados necesarios en el carril largo hasta obtener la misma dimensión que el carril de menor longitud, que es el que se ha utilizado como base para el diseño del bloque fijo.

Los carriles guía se han atornillado al bastidor gracias a una serie de agujeros pasantes que poseen centrados en el eje longitudinal. El carril guía de 850 mm cuenta con 3 orificios separados a 250 mm, si bien en la Figura 2.21 el diseño CAD cuenta proporcionado por el fabricante con 4 agujeros. En caso del carril de 1250 mm cuenta con un patrón de 3 agujeros consecutivos separados a 10 mm. Al mismo tiempo cada patrón de 3 agujeros consecutivos se encuentran separados a 250 mm entre sí.

2.3.2. Rodillos

Componente que tiene la misión de hacer que el bloque móvil del sistema, accionado por el motor lineal, tenga un movimiento de rodadura por el carril guía (Figura 2.22). No se encuentran unidos directamente sobre la camisa del motor, sino que se encuentran atornillados sobre un armazón intermedio, con las especificaciones geométricas necesarias para que los rodillos unidos al bloque móvil tenga un contacto óptimo con los ejes de cada uno de los carriles guía, permitiendo un desplazamiento fluido y con una rozamiento relativamente bajo.

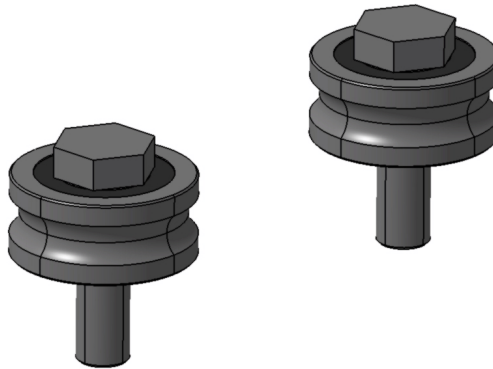


Figura 2.22: Rodillos.

Los rodillos están formados por un rodamiento de 2 filas de bolas y un perno. El rodamiento es el que permite un movimiento rotacional del rodillo sobre el perno, con un coeficiente de rozamiento muy bajo que le permite girar libremente (Figura 2.23).

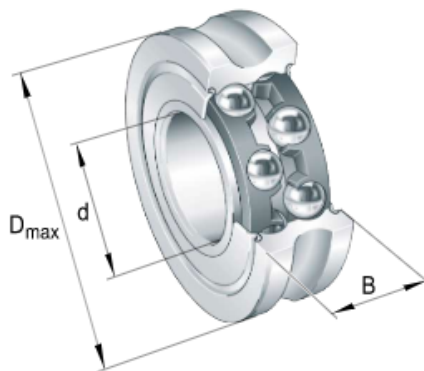


Figura 2.23: Componentes internos del rodillo [32].

En lo referente al perno, por cada par de rodillos que hacen contacto en la misma sección de carril guía poseen un perno distinto (Figura 2.24). Uno de los rodillos posee un perno concéntrico, que se atornilla al armazón del bloque móvil y que sirve de referencia para el contacto con la guía. Por lo contrario, el rodillo opuesto cuenta con un perno excéntrico, que provoca que el rodillo tenga una concetricidad con respecto a la unión roscada con el armazón variable y ajustable manualmente. Gracias a esta disposición se puede controlar y reajustar la obturación que se puede presentar entre los rodillos y el carril guía.

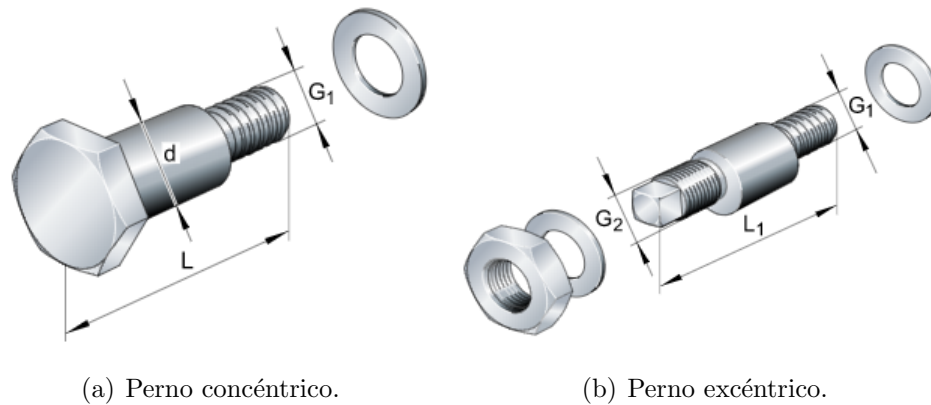


Figura 2.24: Tipos de perno de los rodillos del sistema de guiado [32].

En función del ajuste que se realice al rodillo excéntrico con respecto al carril guía, se pueden presentar dos fenómenos distintos:

- Ajuste de juego: Con esta configuración se crea una pequeña apertura entre el carril y el rodillo excéntrico. El desplazamiento lineal presenta un rozamiento muy bajo, pero en contrapartida posee poca rigidez, permitiendo vibraciones no deseadas e incluso pérdida de rodadura.
- Ajuste de apriete: Con esta configuración los dos rodillos aprisionan el carril. El desplazamiento posee una gran rigidez, impidiendo movimientos no deseados. En contrapartida un apriete excesivo aumenta el rozamiento de la rodadura, perdiendo suavidad de movimiento.

En total el bloque móvil dispone de 4 pares de rodillos situado cada par en uno de los armazones que se encuentran unidos al motor. Al mismo tiempo cada uno de los dos carriles guía sirve de soporte de rodadura para 2 pares de rodillos, de forma que el motor lineal posee un apoyo guiado a cada lateral del mismo, con los rodillos apoyados sobre los extremos superior e inferior con respecto a la carcasa.

2.4. Armazón

Es la estructura que se encuentra físicamente unida al estátor del motor y que a través de él se atornillan los componentes restantes que en conjunto forman del bloque móvil del excitador inercial. Esta pieza del montaje ha sido diseñada con el objetivo de cumplir las siguientes especificaciones:

- Proporcionar una estructura que permite adicionar al motor una cantidad variable y suficiente de masa adicional, alternando la dinámica del sistema. Dicha unión de masas móviles debe poder realizarse de forma cómoda y garantizando la rigidez de la unión así como la integridad del conjunto durante el funcionamiento.
- Ser capaz de atornillar a la estructura móvil de excitador inercial los rodillos del sistema de guiado en una posición correcta, garantizado un correcto desplazamiento por el vástago y restringiendo el resto de grados de libertad no deseados.

- Proporcionar una rigidez estructural suficiente para que las fuerzas generadas al desplazar el bloque móvil, en especial al adicionar una gran cantidad de masa, no tenga como resultado la deformación o rotura de la carcasa del motor, protegiendo la integridad del mismo durante los ensayos.

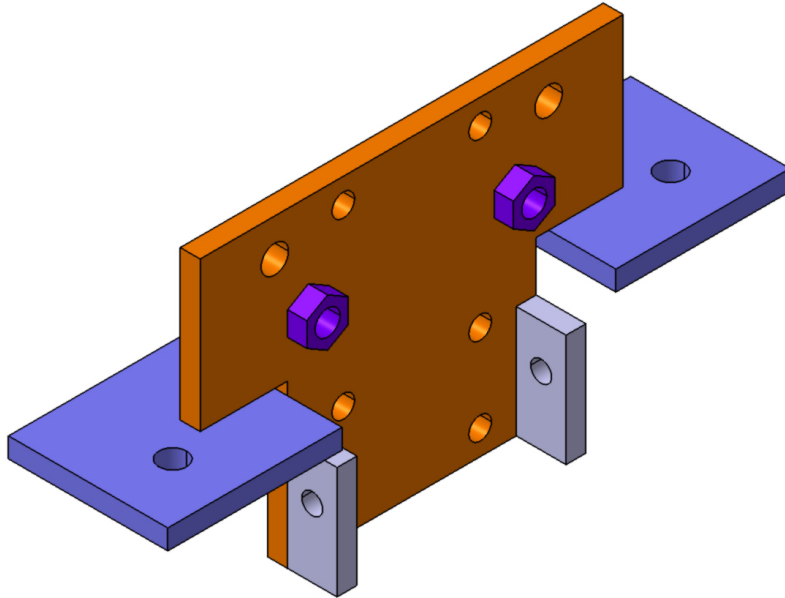


Figura 2.25: Armazón.

2.4.1. Placa T

Es la placa principal del armazón (Figura 2.26). Esta chapa de acero inoxidable de 8 mm de espesor es la que sirve de unión entre el motor y el resto de componentes del bloque fijo. Es la única placa de acero que se encuentra físicamente unida a la carcasa del motor. Sobre dicha placa, ya sea por medio de una soldadura o por uso de uniones roscadas, se adiciona el resto de componentes del armazón así como los rodillos del sistema de guiado.

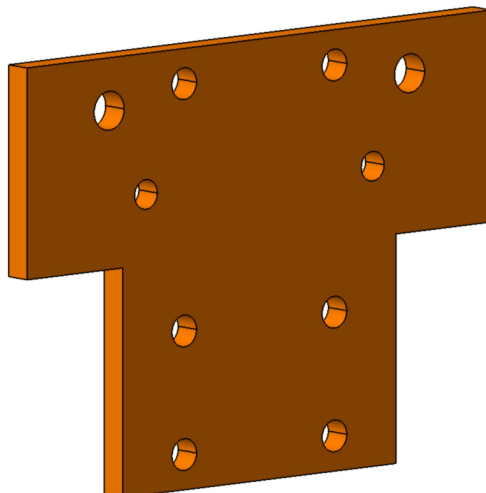
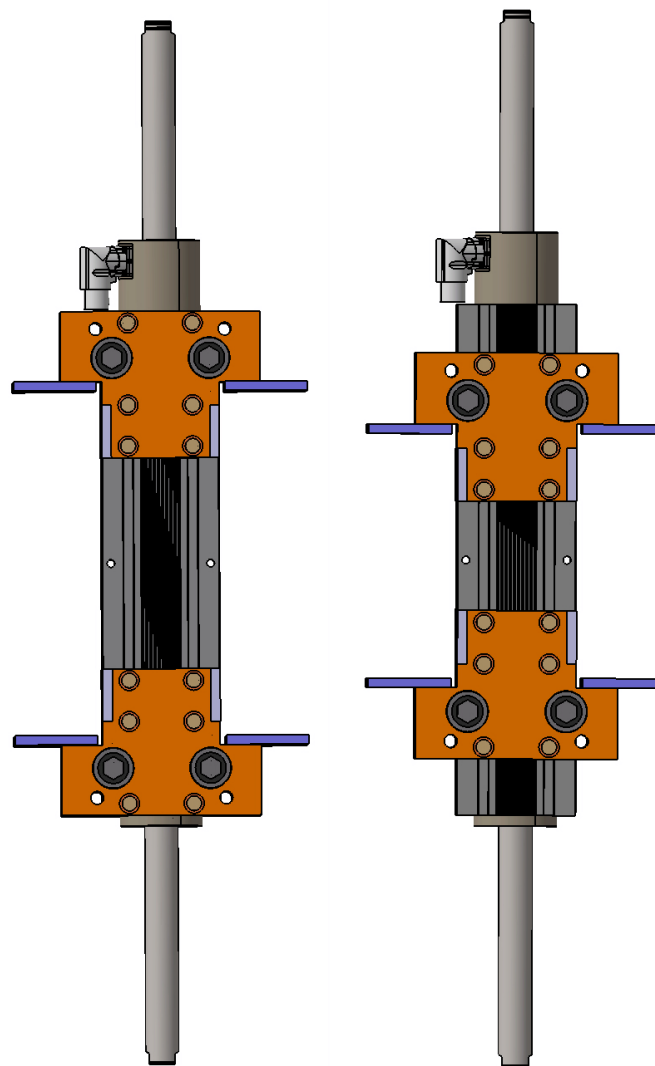


Figura 2.26: Placa T.

En cuanto a sus características morfológicas, esta placa principal cuenta con una serie de agujeros, pasantes o roscados, que ejercen diferentes funciones:

- Agujeros de unión a la camisa del motor: La placa T cuenta con 3 pares de agujeros pasantes de 9 mm de diámetro donde se realiza las uniones roscadas que aprisionan el armazón sobre la pared de la carcasa, mediante el uso del sistema de fijación introducidos en los canales. La separación entre pares de agujeros debe ser de 55 mm para poder realizar los atornillamientos en el canal
- Agujeros de unión de los rodillos: Orificios roscados de métrica M10 por donde se introducen los rodillos del sistema de guiado. Debido a que los pernos necesitan de una profundidad de rosca suficiente, se ha soldado a la placa unas tuercas de métrica M10 a los agujeros, conservando la continuidad en el fileteado. Hay que tener en cuenta que al fabricar la pieza estos agujeros no estaban directamente roscados, sino que en su lugar se realizaron agujeros pasante de $\varnothing 8.5$ mm que posteriormente fueron mecanizados (Apartado 3.2.4).



(a) Posición extrema.

(b) Posición intermedia.

Figura 2.27: Posición de los armazones con respecto al motor lineal.

- Agujeros para la introducción de espárragos: Par de agujeros de 11 mm de diámetro colocados en los extremos, a una distancia prudencial de la posición de los rodillos, donde se introducen unos espárragos roscados de métrica M10 que se encargan de unir el armazón con su par colocado en la cara opuesta del motor lineal. Al unir ambos armazones se consigue una estructura con una mayor rigidez estructural, ganando en solidez, disminuyendo la carga que soporta las uniones en el canal y reduciendo las deformaciones en las camisa de aluminio.

A la hora de colocar las placas principales sobre el motor no tienen una posición fija sino que al ser un apriete a través del canal, se pueden colocar a lo largo de toda la longitud de la abertura. Dependiendo de cuanta masa móvil se quiera adicionar, se puede dejar más o menos separación entre los armazones (Figura 2.27). En cuanto a la colocación hay que tener en cuenta situar los armazones con la arista de mayor tamaño más cerca del extremo mientras que la arista menor se deben posicionar más próxima a la sección central.

2.4.2. Sistema de fijación

Para poder atornillar la placa principal a los canales de camisa se ha hecho uso de tuercas de martillo deslizante (Figura 2.28) de métrica M8. Gracias a su geometría se pueden introducir en los canales del motor, y una vez colocados en su posición, realizar una unión roscada, mediante tornillos M8x16 y arandelas M8 de paso fino, se es capaz de realizar un apriete entre la carcasa, el armazón y la propia tuerca. Como resultado el armazón se mantiene en su sitio pero hay que tener en cuenta no realizar un apriete excesivo que pueda dañar la carcasa. Las tuercas están fabricadas en acero al carbono con un recubrimiento de zinc que proporciona protección anticorrosión.



Figura 2.28: Tuerca de martillo deslizante.

La idea inicial fue utilizar unas regletas de unión de perfiles de 125 mm de longitud y con 4 agujeros roscados M8, de los cuales se iban a hacer uso de 3 orificios roscados por regleta. Esta solución proporciona una mayor rigidez estructural al bloque móvil, pero fue desechada por las tuercas individuales debido a problemas de suministro de la regletas (Apartado 3.1).

2.4.3. Placas de soporte de las masas

Placa soldada a un extremo de la placa principal que tiene la función de servir como superficie de apoyo y zona de atornillamiento para las masas que se adicionan al bloque móvil del excitador inercial. Morfológicamente es una placa de acero rectangular 70x64 mm, de 8 mm de espesor y con un agujero pasante de 10 mm de diámetro en un extremo (Figura 2.29).

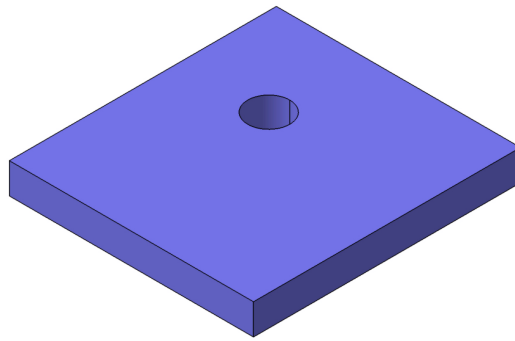


Figura 2.29: Placa de soporte para masas.

Esta configuración de las placas de soporte no fue la diseñada y fabricada originalmente. La versión original de la placa soporte constaba de una placa rectangular de 150 mm de longitud por 70 mm de ancho, con dos agujeros pasantes de $\varnothing 10$ mm separados entre si 104 mm y colocados a 25 mm de un lateral (Figura 2.30).

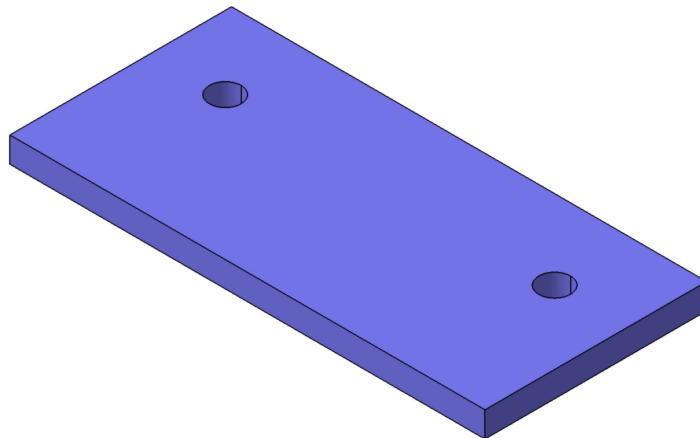


Figura 2.30: Placa de soporte original.

A la hora de adicionar una masa móvil esta se apoya sobre dos placas de soporte situadas sobre un mismo lateral del motor, realizando una unión rocada entre los agujeros pasantes situados en un extremo de las masas y el orificio de las placas soporte, completando la unión con el uso de tornillos M8x50, tuercas M8 y arandelas planas M8. Al atornillar la masa a ambos armazones de cada una de las caras del motor lineal se crea una continuidad física entre ambas estructuras, aumentando la rigidez estructural del todo el conjunto móvil (Figura 2.31).

En cuanto al diseño original, la placa soporte se encontraba soldada a ambos armazones, generando una estructura caracterizada por tener una alta rigidez estructural que rodea toda la carcasa del motor lineal. Adicionalmente este diseño contaba con la inclusión de 2 placas rigidizadoras, de geometría rectangular de 60 mm de alto y 80 mm de ancho y 8 mm de anchura.

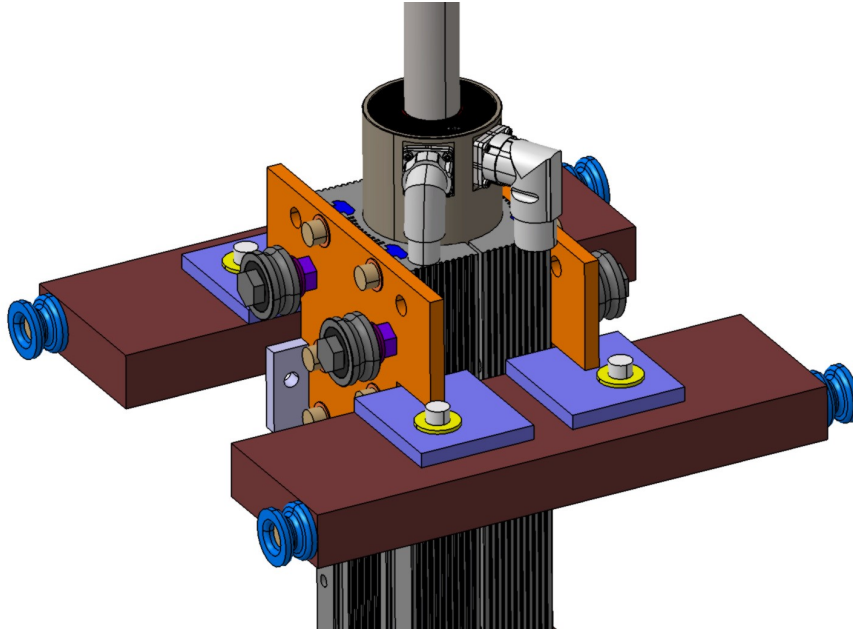


Figura 2.31: Unión de las masas móviles con los armazones definitivos.

La inclusión de dichas placas rigidizadoras, apoyadas sobre las caras posteriores de ambas placas T, y soldadas con la placa soporte para masas original (Figura 2.30), creaba una unión física entra ambas placas principales, generando un único armazón para ambas caras del motor lineal.

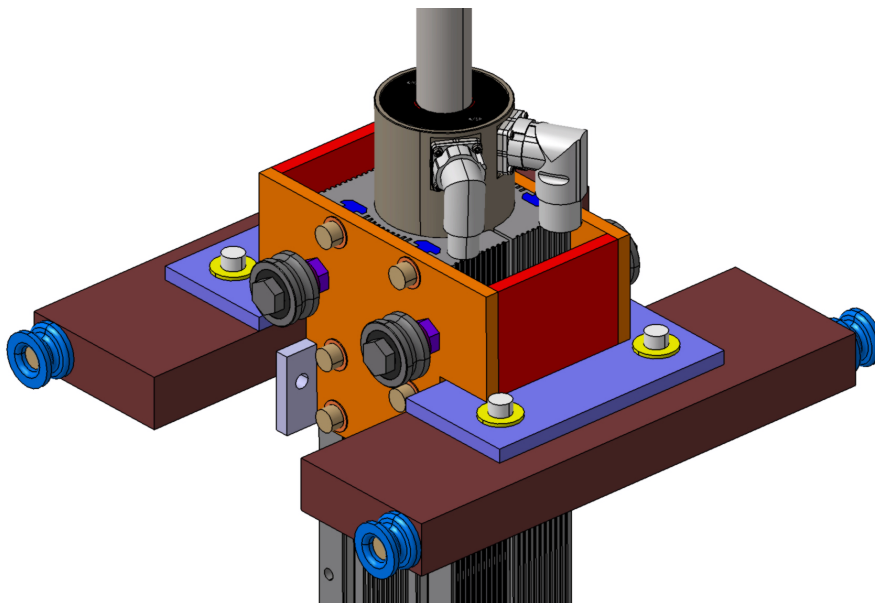


Figura 2.32: Unión de las masas móviles con el armazón original.

Este diseño original del armazón se caracterizaba por poseer una alta rigidez estructural, pudiendo prescindir de tener que utilizar espárragos o tener que atornillar masas para conseguir una continuidad física entre placas T (Figura 2.33). A pesar de las alta rigidez que proporcionaba esta configuración, este diseño fue rechazado y modificado debido a que se generaba un ajuste de tipo apriete entre el armazón y la carcasa del motor que impedía un correcto montaje (Apartado 3.2.5).

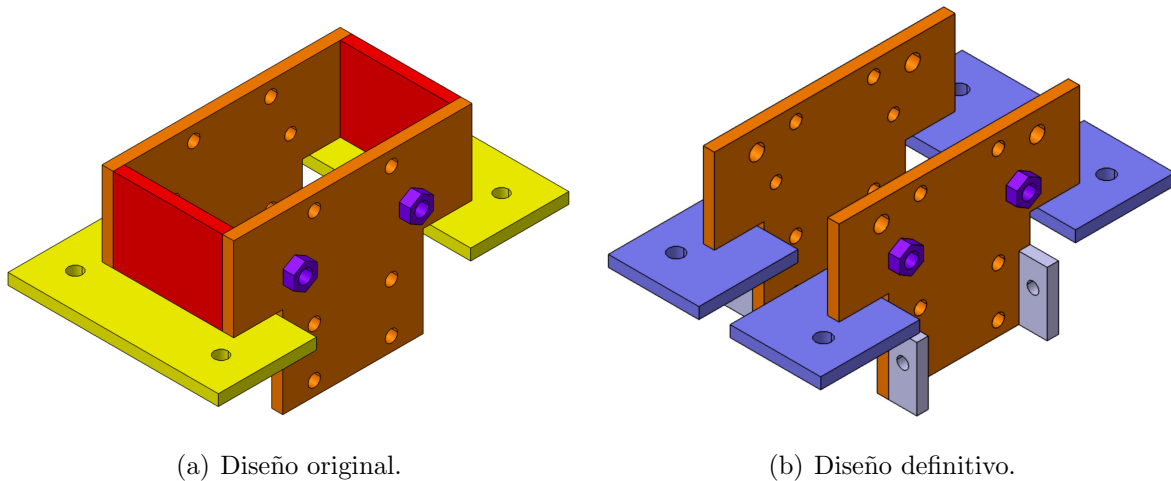


Figura 2.33: Diseño de los armazones.

2.4.4. Placas de apoyo de mesa sísmica

Placa rectangular de acero inoxidable de 45 mm de longitud, 20 mm de anchura y 8 mm que tiene la función de servir como punto de unión para la instalación de soportes para ensayos sísmicos.

Cada armazón consta de dos placas de apoyo, cada una soldada en un lateral inferior de la placa principal. Estas placas de pequeño tamaño cuentan con un agujero roscado de métrica M10, que no se encuentra centrada en la pieza, sino que se encuentra desplazada de esta, a 17,5 mm del extremo superior (Figura 2.34).

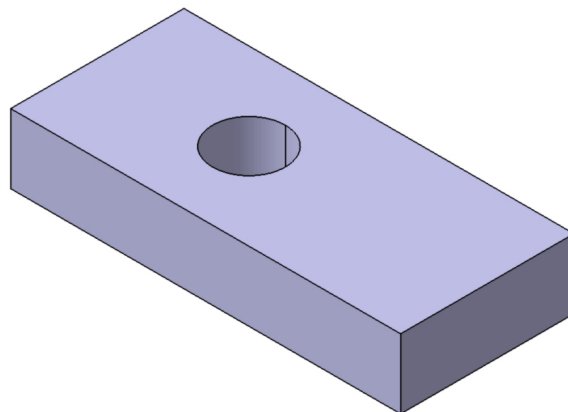


Figura 2.34: Placa de apoyo de mesa sísmica.

De esta forma se puede realizar una unión atornillada con una placa lisa para ensayos sísmicos sin que el tornillo utilizado pueda colisionar con alguna pieza del armazón. Además de tener que utilizar el excitador inercial en su posición horizontal y en modo de control de aceleraciones, se necesita una placa de acero, de sección cuadrada de 300 mm de lado y de 10 mm de espesor, que sirve como soporte lo suficientemente grande y firme para colocar sobre ella la maqueta estructural objeto de ensayo (Figura 2.35).

Para utilizar el excitador como mesa sísmica, solo habría que realizar cuatro uniones roscadas, con tornillo y arandela, entre la placa para ensayos sísmicos y las 4 placas de apoyo que se encontraran en la parte superior del excitador, haciendo indiferente la orientación del bloque móvil del excitador inercial en el montaje con respecto al bastidor.

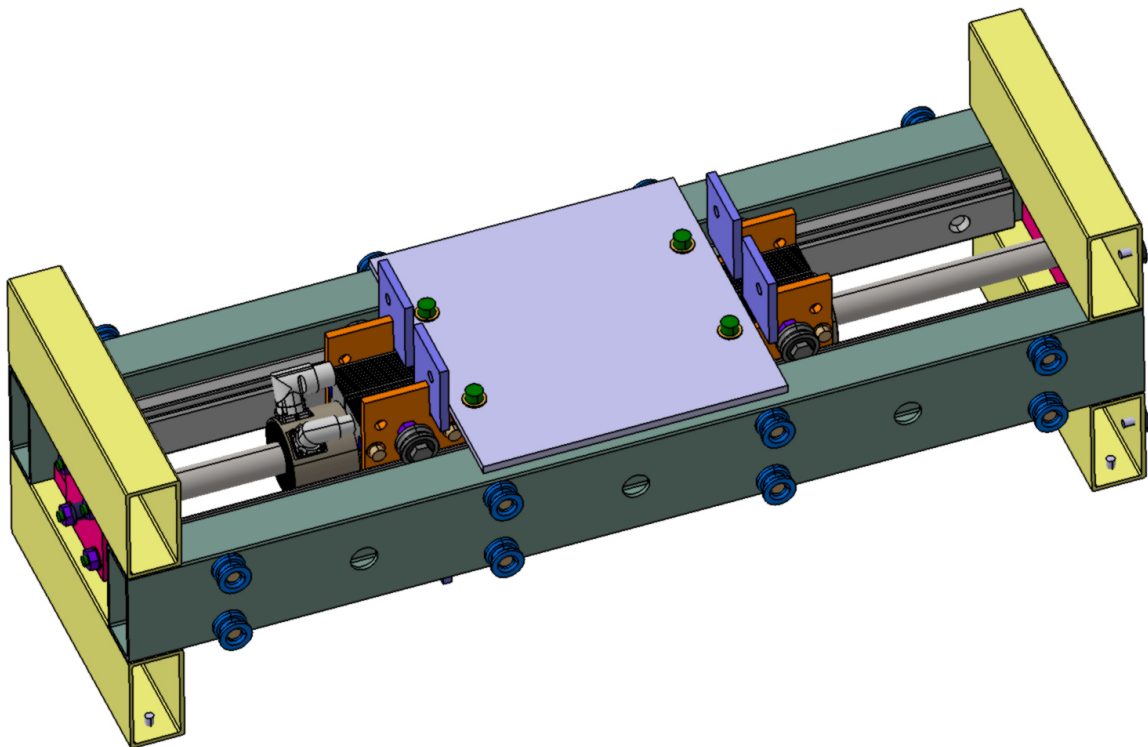


Figura 2.35: Uso del excitador inercial como mesa sísmica.

En cuanto a la fabricación de los elementos, las placas de apoyo no fueron concebidas en el diseño original, sino que fueron una adición incluida en el nuevo diseño de los armazones (Apartado 3.2.5). Al mismo tiempo se utilizaron las placas rigidizadoras, desechadas en la nuevas versión de la estructura móvil como material de base para la fabricación de las 8 placas de apoyo empleadas. En cuanto a la base 300x300 mm para ensayos sísmicos no ha sido finalmente fabricada, siendo un diseño conceptual a desarrollar en líneas futuras.

2.5. Elementos auxiliares

Los elementos auxiliares son aquellos componentes que no forman parte intrínseca del conjunto estructural del excitador inercial, siendo elementos del sistema que solo se utilizan en determinadas circunstancias determinadas de funcionamiento o que cumplen una función concreta y que no pertenecen a ninguna de las partes principales del excitador, como podrán ser el motor lineal, el bastidor, el sistema de guiado o el armazón.

2.5.1. Masas

Elemento que tiene como objetivo fundamental aportar mayor cantidad de masa al excitador inercial, ya sea modificando su características dinámicas o aumentando el peso de la base estática para que conceda mayor estabilidad al bastidor ante las vibraciones producidas por el funcionamiento del motor lineal.

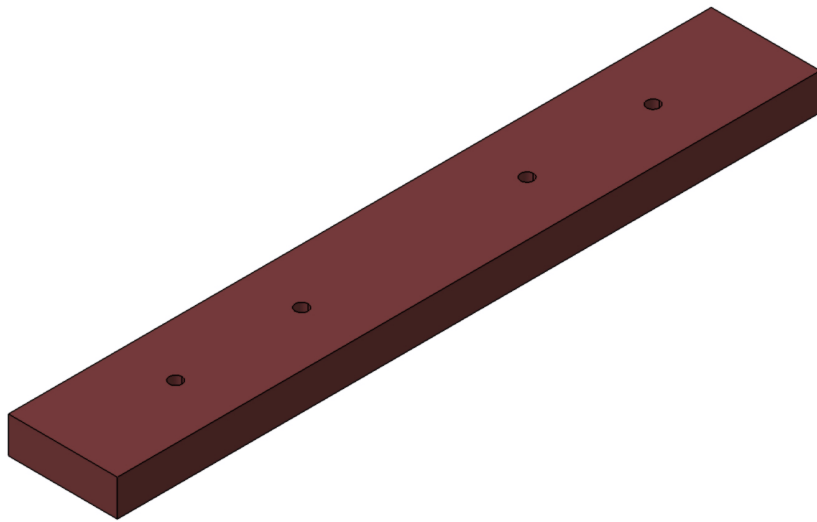


Figura 2.36: Masa fija.

Para realizar ensayos con el excitador inercial se cuentan con distintos modelos de masas, que cumplen funciones distintas y se utilizan en momentos distintos en función de sus características morfológicas:

- Listón de grandes dimensiones: Es la masa de mayor tamaño, con una aplicabilidad práctica reducida. Es un listón de 1160 mm de largo, con una sección rectangular 90x30 mm y con un peso final de 24.5 kg. Además de ser utilizado como masa fija, en caso de que el excitado inercial funcione en posición horizontal, es la material de donde se obtiene las demás masas, realizando los mecanizados necesarios. Por cada listón de grandes dimensiones se pueden obtener 2 masa fijas o 4 masas móviles. Estos listones cuentan con una serie de agujeros pasantes de 10.5 mm de diámetro, colocados a 93 mm de las caras laterales. Esta condición geométrica se utilizó de referencia como diseño de los agujeros pasantes de la masa móvil y de los armazones, utilizando los orificios existentes y reduciendo el número de mecanizados. En cuanto a los listones gran tamaño, dichos taladros no cumplen ninguna función.

- Masa fija: Masa que se utiliza apoyada sobre el bastidor para conceder de mayor estabilidad cuando se realizan ensayos en la posición vertical. Tiene un peso total de 12.250 kg y 580 mm de longitud. La sección es la misma que la del los listones de origen, de 90 mm de ancho y 30 mm de alto (Figura 2.37). Pueden presentar agujeros pasantes en la parte superior pero no cumplen ninguna función útil.
- Masa móvil: Es la masa de menor tamaño, utilizada para aumentar el peso del bloque móvil de excitador inercial y modificar las propiedades cinemáticas del sistema. Es un listón de acero de 290 mm de largo y sección idéntica a las otras masas. Cada una de estas masas pequeñas tiene 6.125 Kg de peso y cuenta sobre la cara superior con dos agujeros pasantes de 10.5 mm de diámetro separados entre si 104 mm y colocados de forma que se mantenga la simetría de la cara superior (Figura 2.36). La función de estos taladros pasantes es servir como puntos de unión para las placas de soporte de los armazones. Para una masa móvil por cada lateral del armazón esta unión atornillada se puede completar haciendo uso de tornillos M8x50, arandelas planas y tuercas M8.

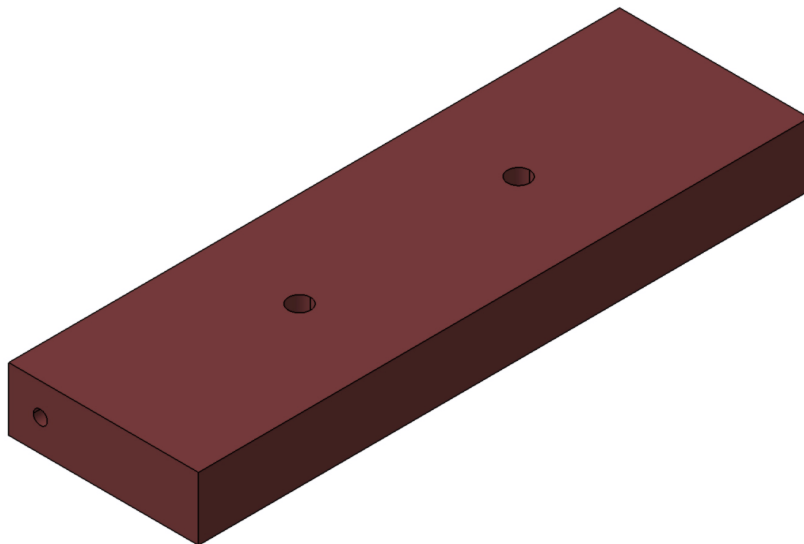


Figura 2.37: Masa móvil.

En caso de adicionar mayor masa al conjunto móvil se pueden colocar un mayor número de estas, utilizando en esta ocasión como elemento de unión un par de varillas roscadas M8 de grandes dimensiones que servirían como soporte para la colocación de las masas tanto de los armazones superiores como inferiores, haciendo uso de tuercas y arandelas para garantizar que las masas se encuentren completamente restringidas en su movimiento con respecto al resto del bloque móvil (Figura 2.38). La varilla, en principio concebida con un métrica M10, se decidió reducir sus dimensiones para poder realizar el montaje con mayor facilidad (Apartado 3.2.3). En cuanto a la colocación de las masas móviles sobre el excitador inercial, se recomienda que se priorice que el conjunto final conserve en todo momento la simetría, habiendo la misma cantidad de masa a ambos lados de los armazones.

La masa móvil cuenta adicionalmente con 2 taladros de 6.75 mm de diámetro y 20 mm de profundidad a cada uno de los laterales de la pieza. En 4 de estas han masa estos agujeros han sido completamente roscados (métrica M8) para poder acoplar a ellos los soportes del sistema de suspensión.

2.5.2. Tubos de apoyo de masa fija

Par de tubos de sección cuadrada de 30 mm de lado y 1.25 mm de radio de acuerdo (Figura 2.39). Con un longitud total de 500 mm, la función de estos elementos consiste en servir como punto de apoyo para la adición de masa fija, mejorando la estabilidad del bastidor antes las elevadas fuerzas que pueda producir el motor lineal durante su funcionamiento.

Los tubos de apoyo deben atravesar la cavidad interior de las basas que estén sirviendo de apoyo firme del excitador inercial, de forma que sobresalga más de 100 mm de sección de tubo por ambos extremos de la basa. La sección sobrante sirve de zona donde poder apoyar las masas estáticas, teniendo que situarse sobre cada extremo con cada uno de los 2 tubos de apoyo.

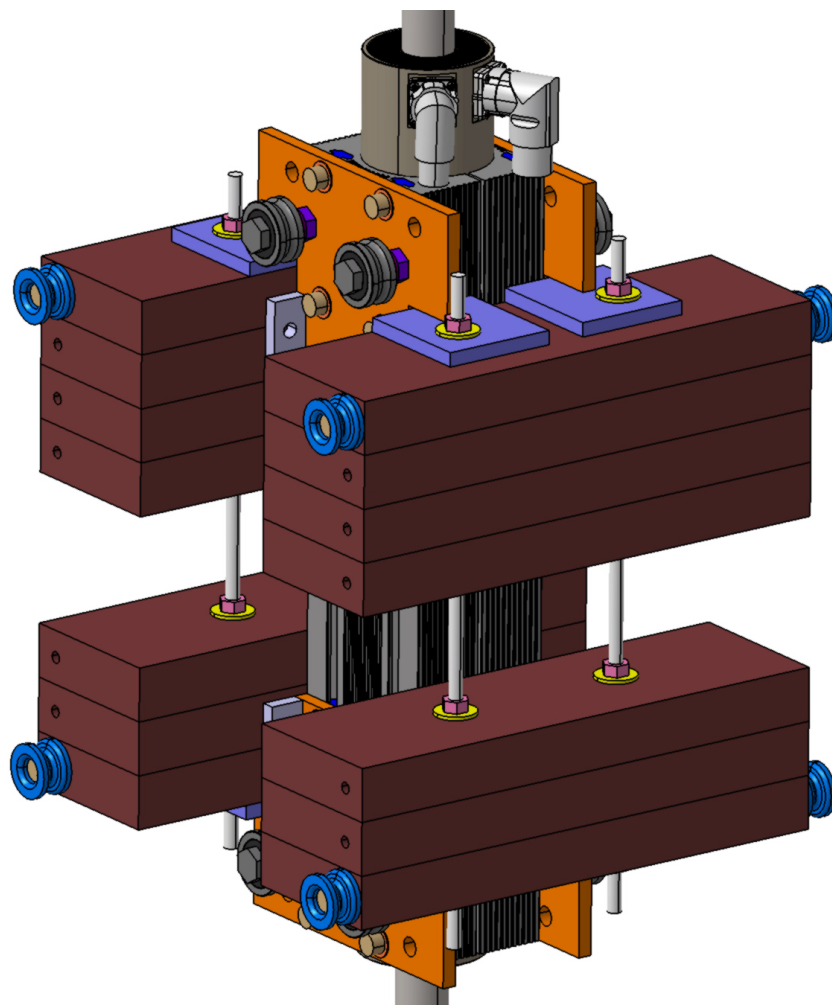


Figura 2.38: Armazón con adición de gran cantidad de masa móvil.

Con esta disposición, los tubos de apoyo no entran en contacto con el suelo, así como la masa que soportan. Sin embargo no es descartable agregar sistemas de apoyo, similares a los que posee bastidor, a los extremos de los tubos de apoyo, mejorando la estabilidad. En este caso habría que realizar una serie de agujeros roscados como punto de unión con los apoyos, que se acoplarían una vez colocados los tubos atravesando las basas.

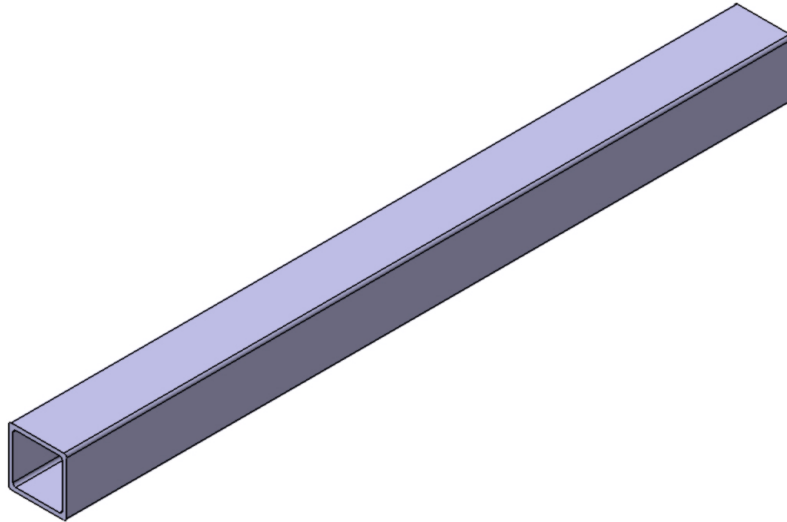


Figura 2.39: Tubos de apoyo de masa fija.

En función de la posición de funcionamiento del motor lineal el montaje de los tubos de apoyo será distinto, así como el tipo de masas a utilizar, distinguiendo 2 casos:

- Modo vertical: En esta disposición los tubos de apoyo se colocan a través de las basas que conforman, junto a la testa inferior, la base del bastidor. En esta configuración se utiliza las masas fijas de 12.250 Kg para aumentar el peso del conjunto. La disposición de dichas masas se muestra en la Figura 2.40.

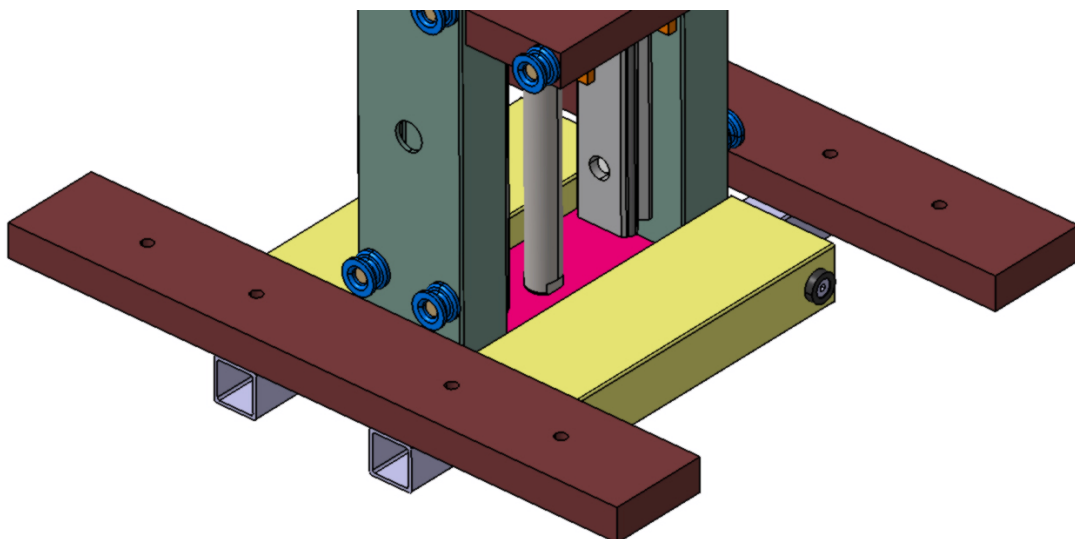


Figura 2.40: Disposición de la masa fija en el modo vertical.

- **Modo horizontal:** En este modo de funcionamiento los tubos de apoyo se colocan en las basas que cuentan el sistema de apoyo para la posición vertical, estando cada uno en un extremo del bastidor. Con esta disposición las masas utilizadas son los listones de grandes dimensiones, con un peso de 24.5 Kg (Figura 2.41).

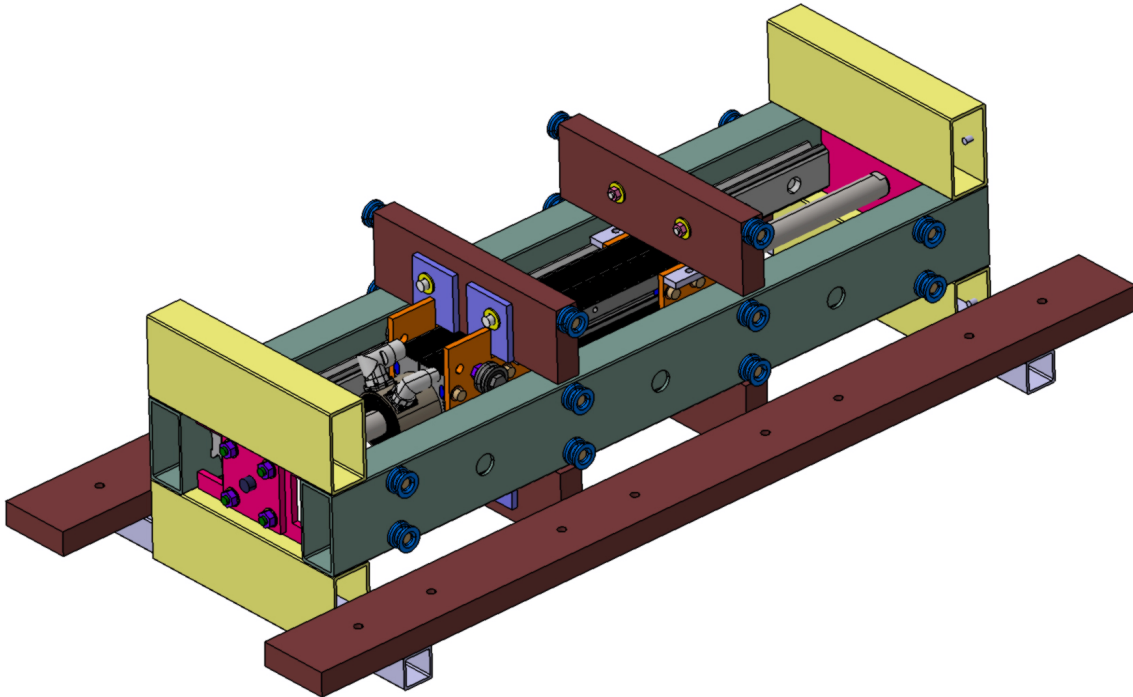


Figura 2.41: Disposición de la masa fija en el modo horizontal.

2.5.3. Sistema de fin de carrera

Se puede observar que las testas, punto de unión donde se atornilla el vástago, se encuentran a cierta profundidad con respecto a la superficie de las basas más próxima al motor. Debido a dicha geometría del bastidor, la carrera útil del motor a través del vástago se ve limitada físicamente. Es necesario por tanto la introducción de un sistema de fin de carrera que impida que haya una colisión entre el estátor del motor lineal y partes metálicas de la estructura externa, evitando cualquier posible desperfecto del excitador inercial.

La solución elegida es la implementación de una serie de arandelas de goma, colocadas en los extremos del vástago, que sean capaces de absorber las fuerzas con las que el motor colisiona contra ellas en caso de alcanzar un rango de carrera crítico. Dichas gomas se deformarán mediante compresión, disipando energía y evitando el contacto de metal con metal.

El número de gomas de caucho, de aproximadamente 10 mm de espesor, que se colocan en los extremos de vástago dependen de la profundidad de la testa con respecto a la superficie de la basa, así como la presencia de los conectores del estátor, dos cabezales de aluminio de poco espesor susceptibles a deformarse. Finalmente se han colocado 2 gomas en la parte inferior y 7 gomas en la parte superior (Figura 2.42). Hay que tener en cuenta que el motor siempre entra en contacto con los topes superiores al realizar el Homing (Anexo A.1).

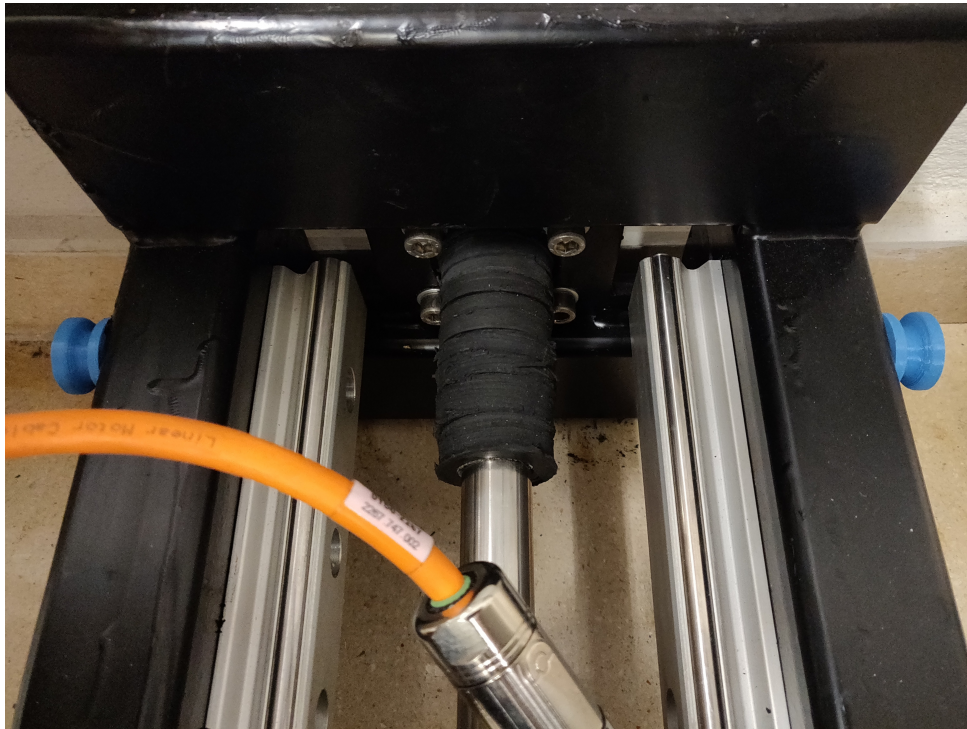


Figura 2.42: Sistema de fin de carrera.

2.5.4. Sistema de suspensión

Cuando el excitador inercial funciona en modo control de posición, el drive del motor monitoriza la ubicación del estátor, haciendo que se desplace o permanezca en la posición deseada. Si el excitador se encontrara en posición horizontal, el estátor permanece en la posición consigna a pesar de las fuerzas de gravedad que actúan sobre el bloque móvil, evitando que caiga de forma violenta sobre la base inferior. Sin embargo, hay riesgo de que el motor impacte con sobre la base en determinadas situaciones:

- El motor pasa a estar totalmente apagado sin paso de corriente de alimentación al estátor.
- El excitador funciona en modo corriente, situación en la cual se trabaja sin control de posición y no hay una compensación de las fuerzas de gravedad. Al mismo tiempo, durante este modo de funcionamiento se necesita de un sistema que ejerza fuerza en sentido contrario al desplazamiento cuando el motor se desplace hacia los extremos del vástago.

Para evitar cualquier posible colisión del motor sobre la base inferior, así como mantener el estátor en una posición de reposo a una altura intermedia con respecto al vástago, se ha implementado un sistema de suspensión, consta de los siguientes elementos:

- Gomas: Una serie de tubos de goma látex que unen el bloque móvil con el bloque fijo a través de los soportes de gomas (Figura 2.43). En el momento en que el estátor se aleja de la zona de reposo, ya sea por efecto de la gravedad o por la fuerza electromagnética del mismo durante el modo corriente, las gomas sufren deformaciones por esfuerzos de tracción, aplicando al bloque móvil una fuerza proporcional a la deformación de las mismas y en sentido contrario al desplazamiento del estátor. De esta manera se posee un sistema de suspensión que tiende a llevar el motor lineal a la posición de reposo.
- Soporte de gomas: Sistema donde se apoyan las gomas, necesitando la goma siempre un par soportes donde colocarse. Uno de los soportes está colocados en el bloque fijo (Cara exterior del pilar), mientras que el otro se encuentra en el bloque móvil (Masa móvil). El soporte está formado por un tornillo M8x16 con un casquillo de PLA donde se apoyan las gomas.

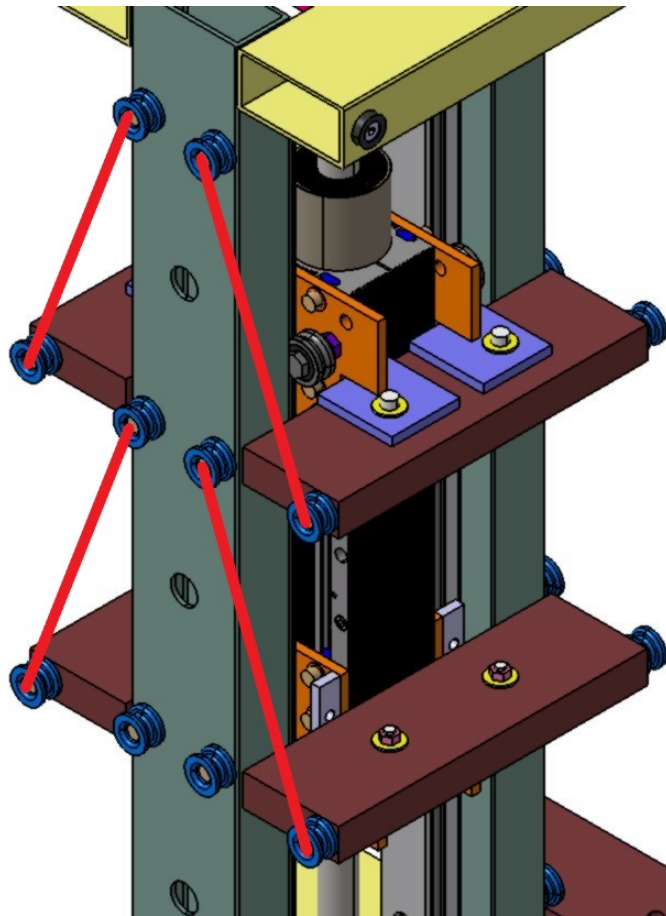


Figura 2.43: Sistema de suspensión.

La posición de reposo estará definida por el número de gomas empleadas y la posición de los soportes. En el momento en el que la fuerza debida al peso propio del bloque móvil sea igual a la fuerza debida a la deformación de las gomas, el motor se mantendrá en la posición de reposo cuando no haya corriente de alimentación. Hay que tener en cuenta que cuando el motor se encuentre en modo posición el sistema de suspensión carece de sentido, puesto que el controlador ajustará la fuerza del motor para compensar el sistema de suspensión y desplazar el motor a la zona de consigna.

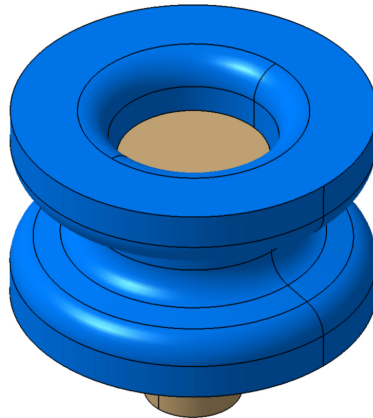


Figura 2.44: Soporte de las gomas.

2.6. Tornillería utilizada

Para la construcción del excitador inercial se ha utilizado uniones roscadas, que necesitan multitud de tornillos, tuercas, arandelas, varillas y espárragos en función de las necesidades que presenta la unión entre los elementos. Para el diseño del excitador inercial que finalmente se ha utilizado para la experimentación, se ha hecho uso de los siguientes tipos de elementos roscados:

- Tornillos: Elemento principal de la unión roscada que se encarga de proporcionar el cuerpo roscado y que es el elemento que soporta el par de apriete (Figura 2.45). Los tornillos utilizados han sido:
 - M8x16: 24 unidades para los casquillos del sistema de suspensión, 24 unidades para la unión de los armazones con la carcasa del motor (6 por armazón) y uno para la unión entre el vástago y la testa inferior. 49 tornillos de esta tipología utilizados en total.
 - M8x45: 6 unidades para la unión entre los carriles guía y el bastidor, siendo 3 tornillos por cada pilar.
 - M8x50: 8 unidades para la unión entre las placas de soporte y las masas móviles.
 - M10x16: Se utiliza un tornillo de este tipo en la unión entre el vástago y la testa superior.
 - M10x30: 4 unidades para las uniones entre la testa superior y la placa de atornillamiento.



Figura 2.45: Tornillos utilizados.

- Arandelas: Elemento en forma de aro (Figura 2.46) utilizado comúnmente en la uniones roscadas debido a que mantienen el valor de precarga de la unión, protegiéndola ante superficies blandas o mal acabadas susceptibles de sufrir deformaciones locales. Las arandelas utilizadas han sido:
 - Arandela plana M8: 24 mm de diámetro y 2 mm de espesor. 16 unidades para en la uniones entre las placas soporte y las masas móviles (2 por unión) y una en la unión entre el vástago y la testa inferior. 17 unidades en total.
 - Arandela fina M8: 17 mm de diámetro y 0.7 mm de espesor. 24 unidades para la unión de los armazones con la carcasa del motor, siendo 6 arandelas por armazón.
 - Arandela plana M10: 22 mm de diámetro y 1.8 mm de espesor. 16 unidades para las uniones entre los rodillos del sistema de guiado y la placa T (2 por perno). En esta caso las arandelas no soportan esfuerzos de carga (Apartado 3.3.1).
 - Arandela fina M10: 22 mm de diámetro y 0.7 mm de espesor. 8 unidades para las uniones entre la testa superior y la placa de atornillamiento, utilizando 2 arandelas por cada unión.



Figura 2.46: Arandelas utilizadas.

- Tuercas: Pieza que se enrosca sobre el cuerpo del tornillo y mantiene fija la unión. Para el montaje se han utilizado en su mayoría tuercas hexagonales DIN 934, aunque para determinadas uniones en las que no se podía colocar una arandela con facilidad se ha optado por tuercas autoblocantes con arandela estriada DIN 6923 (Figura 2.47). De forma pormenorizada, se han utilizado las siguientes tuercas:
 - Tuerca hexagonal M8: 8 unidades para las uniones entre las placas soporte y las masas móviles.
 - Tuerca hexagonal M10: 4 unidades para las uniones entre la testa superior y la placa de atornillamiento.
 - Tuerca autoblocante M8: 6 unidades para la unión entre los carriles guía y el bastidor, siendo 3 tuercas por cada pilar.



Figura 2.47: Tuercas utilizadas.

Junto a todo la tornillería mencionada hay que sumar los tornillos avellanados M8x16 utilizados en el sistema de apoyo, así como el conjunto de espárragos, arandelas y tuercas de métrica M12 que se utilizaron de forma provisional durante el ensamblaje de bastidor (Apartado 3.2.2), y cuya ubicación se muestra en Figura 2.48. El conjunto del excitador también cuenta con la posibilidad de introducir varillas de métrica M8 para la adición de masas móviles, así como la introducción de espárragos de métrica M10 para la unión de armazones opuestos, aunque dichos elementos roscados no se han utilizado en los ensayos.



Figura 2.48: Ubicación de los espárragos provisionales M12.

2.7. Maletín de control

Para que el excitador inercial pueda funcionar correctamente y así poder realizar las operaciones indicadas se necesita de un servo controlador que sea capaz de encargarse de todas las funciones de control y de monitorización del motor lineal. Como módulo de control para el motor lineal LinMot se ha escogido el controlador E1450-EC-QN-1S (Figura 2.49), un servo controlador de alta prestaciones [13]. Dicho servo drive consta de las siguientes funcionalidades:

- Amplia capacidad de comunicación con otros dispositivos, en especial la comunicación en tiempo real mediante Ethernet.
- Control interno de la posición, fuerza y velocidad del motor lineal, gracias un sistema de comunicación con realimentación.
- Almacenamiento interno de perfiles de movimiento del motor, así como secuencias de programa relativamente complejas.
- Diseño compacto y fácil puesta en marcha.

El drive no puede funcionar por si solo, sino que necesita multitud de componentes y conexiones que permitan el correcto desempeño del excitador inercial, así como proteger la integridad material tanto el motor como el resto del sistema electrónico. Tanto el controlador como los componentes auxiliares se han instalado en un maletín control, que permite además transportar todos los elementos de forma cómoda y segura (Figura 2.50).



Figura 2.49: Drive LinMot serie E1400 [18]

En su interior se encuentran los diferentes módulos, debidamente ordenados y conectados entre si, haciendo uso de un bastidor en la base inferior. Las conexiones del módulo de control con el exterior, ya sea con el motor, el suministro eléctrico o con dispositivos auxiliares, se realizan mediante conectores instalados en las caras externa del maletín.

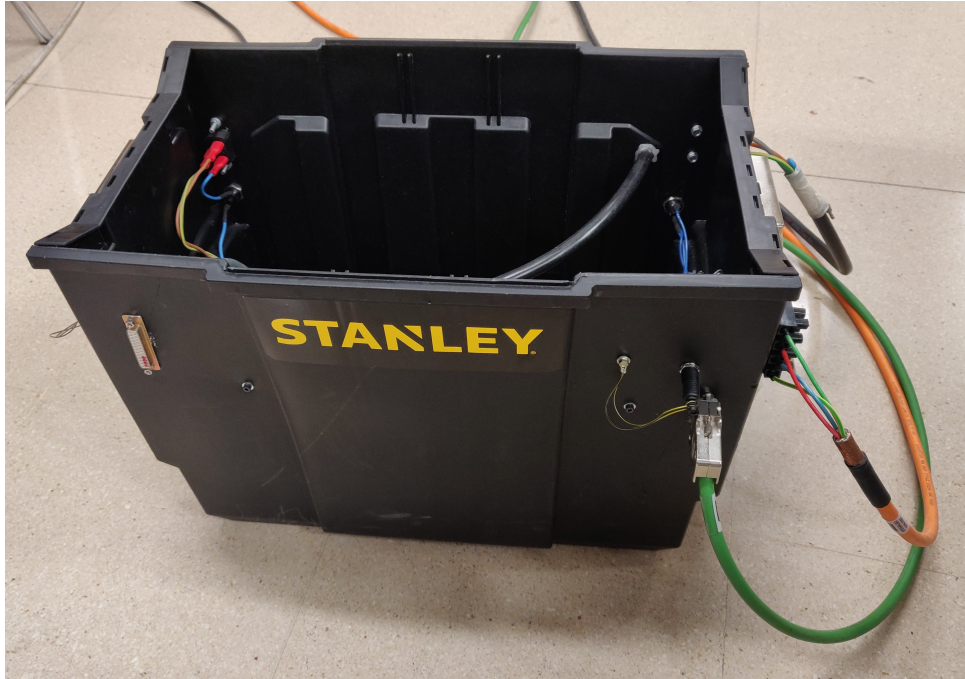


Figura 2.50: Drive serie E1400.

En determinadas conexiones la señal exterior no entra directamente sobre el servo controlador, sino que pasan en primer lugar por módulos intermedios que sean capaces de adecuar la señal a las especificaciones de funcionamiento que el módulo de control necesita.

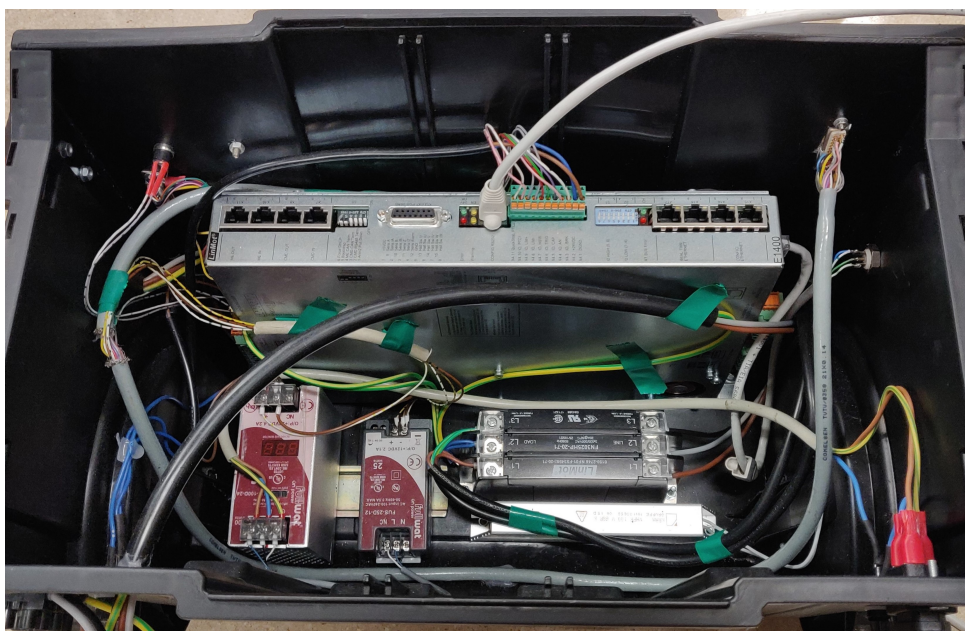


Figura 2.51: Vista en planta del maletín de control.

Observando la planta del maletín de control (Figura 2.51), se aprecian los componentes principales para el óptimo desempeño del excitador inercial:

- Modulo de Control E1450-EC-QN-1S: Componente principal del maletín de control, ubicado en la parte superior. El controlador necesita de una corriente de alimentación trifásica de 400 V para alimentar el motor, así como una fuente de corriente continua de 24 V para alimentar los sistemas electrónicos internos. Al mismo tiempo cuenta con entradas y salidas que permiten conectarse a diferentes sistemas, ya sea el propio motor lineal, un mando de control, o comunicarse con dispositivos externos.
- Fuente de alimentación de 24 V: Ubicado en la parte inferior izquierda, es el dispositivo que se encarga de transformar la señal de corriente alterna monofásica de la línea eléctrica, de valor 220 V, en una señal continua de 24 V que alimenta la electrónica del drive, a través de la entrada X4 del drive.
- Filtro de red trifásica: Ubicado en la parte inferior derecha, se encarga de que la señal trifásica, encargada de proporcionar la fuerza electromagnética al motor, tenga el filtrado adecuado con el objetivo de proteger el driver ante sobretensiones. El fabricante recomienda que la distancia de cableado entre la salida del filtro y la entrada X30 del motor no sea mayor a 15 cm.
- Fuente de alimentación de 12 V: Centrado en el bastidor, su misión consiste en transformar la corriente alterna monofásica de la red eléctrica en una señal continua de 12 V que sea capaz de alimentar la electrónica del la botonera externa, en caso de utilizarse.

Desde la parte superior del maletín, a través del conector X19 del propio módulo de control, se encuentra la interfaz de comunicación RS-232, que permite el servo controlador conectarse con dispositivos electrónicos externos, principalmente a un ordenador. La conexión entre dispositivos se realiza mediante un cable Ethernet, que se conecta al ordenador haciendo uso de un adaptador USB, proporcionado por la misma compañía fabricante del motor lineal (Figura 2.52).



Figura 2.52: Cable Ethernet con adaptador USB.

La comunicación entre el ordenador y el driver se realiza mediante el software LinMot-Talk. Tras la detección y configuración básica del driver y motor lineal, el usuario puede realizar varias acciones:

- Controlar manualmente el motor lineal, examinar como se comporta al activar y desactivar manualmente determinadas entradas del drive, así como obligar al motor ha realizar determinados procedimientos, todo ello en tiempo real.
- Reconfigurar las secuencias y operaciones de funcionamiento del motor, modificando su comportamiento. Las modificaciones son almacenadas en la memoria interna del drive, haciendo que el motor lineal pueda operar sin necesitar de comunicación a tiempo real con el ordenador.



Figura 2.53: Vista frontal del maletín.

Tomando como referencia el frontal del maletín de control (Figura 2.53), se observan las siguientes conexiones:

- Conector del cable de comunicación del motor: A través del cable de color verde, el motor lineal transmite la señal de control en lazo cerrado al servo controlador, haciendo uso de las entradas X2. Se encuentra en el extremo derecho y la conexión es tipo D15.
- Conector con la seta de emergencia: Con el objetivo de poder cortar la corriente que alimenta el módulo de control por motivos de seguridad, en especial cuando el usuario se encuentre a cierta distancia del maletín de control, se ha habilitado una conexión a una seta de emergencia externa (Figura 2.54) que permite abrir el circuito que alimenta el módulo de control. Dicha conexión se encuentra encima del conector del cable de comunicación.

- Conector Puente: Si se decidiera prescindir del uso de la seta de emergencia, el circuito que alimenta de corriente al maletín permanecería abierto. Para evitar esta falta de flujo de corriente, cerca del conector de la seta se encuentra un terminal que permite puentear la conexión, cerrando el circuito y permitiendo al controlador funcionar con normalidad.
- Conexión con la botonera externa: En la parte izquierda se encuentra el terminal de conexión de 25 hilos que permite conectar un mando de control externo al servo controlador. La comunicación entre ambos dispositivos se realiza mediante el uso de los puertos de conexión X4 del módulo de control, necesitando adicionalmente una fuente continua de 12 V encargada de suministrar la corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento de la botonera. Hay que tener en cuenta que en función de como se haya programado el funcionamiento del motor, a través del software de comunicación LinMot-Talk, puede ser posible que se necesite una conexión física contante de la botonera externa con el maletín de control. En caso de que se quisiera prescindir del mando, será necesario anular que ciertas entradas X4 rijan encendido del motor (Anexo A.2)



Figura 2.54: Seta de emergencia.

Si bien la versión del excitador inercial utilizada en los ensayos prescinde del uso del mando de control, el laboratorio cuenta con una botonera externa que permite modificar en tiempo real el comportamiento del motor, pudiendo hacer que el motor conmute en distintos modos de funcionamiento sin necesidad de utilizar el software de comunicación en tiempo real. En contrapartida, es necesario programar previamente driver, haciendo uso de la tabla de comandos (Anexo A.2.4), para que la botonera sea funcional.

Si se decide hacer uso de la botonera (Figura 2.55), esta cuenta con las siguientes funcionalidades:

- Seta de emergencia: El mando posee una segunda seta de emergencia para interrumpir inmediatamente el funcionamiento del sistema. Al pulsar se corta la corriente que alimenta la entrada X33, donde un relé de seguridad corta la alimentación del sistema en caso de emergencia.
- Interruptor de encendido: El hacer switch al modo On, se inicial el proceso de ‘Home’ del motor y se da paso a funcionar en el modo predeterminado, en este caso el modo analógico. Tanto el interruptor como el modo analógico cuentan con un LED que indican el estado de activación de los mismos.
- Selector de modo: Pulsador que permite conmutar el motor lineal en 3 modos distintos que van apareciendo secuencialmente al pulsar:
 - Modo analógico: Modo más común de funcionamiento donde la consigna de posición del estátor con respecto al vástago se encuentra vinculada al voltaje de la señal analógica de entrada al maletín mediante el conector BNC, con una amplitud de señal comprendida entre -10 y 10 V.
 - Modo manual: Similar al modo analógico con la excepción de que el usuario puede modificar el voltaje de la señal analógica de control haciendo uso del potenciómetro.
 - Modo curva sinusoidal: En este modo el estátor se desplaza a través del vástago siguiendo una función sinusoidal que por defecto posee una frecuencia 5 Hz y amplitud 10 mm. Dichos parámetros de funcionamiento pueden ser modificados haciendo uso del potenciómetro y la botonera. Se cuenta con un LED que se enciende al seleccionar este modo.
- Potenciómetro: Elemento rotativo que en el modo manual permite ajustar la posición de consigna del estátor relativa al vástago. Si el excitador se encontrara en modo curva sinusoidal, el potenciómetro es capaz de modificar la frecuencia de la señal.
- Botonera: Par de botones contiguos que permite modificar la amplitud del seno que describe el bloque móvil del motor cuando este se encuentre en el modo curva sinusoidal. Cada pulsación del botón derecho supone un incremento de la amplitud en un 20 %, mientras que pulsar el botón izquierdo supone una disminución de la amplitud de la curva descrita en un 20 %.
- Interruptor modo corriente: Al activar dicho interruptor el motor entra a funcionar en modo corriente, en el cual la señal analógica BNC es proporcional a la fuerza electromagnética del motor, prescindiendo del control de la posición actual del estátor. Se cuenta con un LED que se ilumina al activar este modo.
- Potenciómetro modo corriente: Elemento que modifica la relación entre los amperios motor de entrada al motor, que proporcionan la fuerza electromotriz, y los voltios de consigna de la señal analógica BNC.

A la hora de manejar la botonera se recomienda tomar ciertas precauciones de uso, en especial al antes de encender la botonera o activar y desactivar ciertos modos. Algunas de la recomendaciones son:

- Asegurar que la señal analógica BNC sea de 0 V al encender la botonera.
- Asegurara que tanto los potenciómetros como la botonera marquen el valor mínimo antes de entrar en los modos manual, curva sinusoidal o especial.
- Apagar la botonera antes de desactivar el modo corriente. De este modo se evita que el motor lineal pase al modo de control por posición de forma violenta.



Figura 2.55: Botonera externa.

En el lateral izquierdo del maletín de control se encuentra la conexión que da al cable que se encarga de alimentar el bobinado del motor lineal. La corriente alterna trifásica de 400 V, que previamente había alimentado el drive, llega al motor a través de la salida X2 del servo controlador, modificando la intensidad de corriente en función de la fuerza electromotriz necesitada. La conexión con el cable de alimentación se realiza a través de una regleta (Figura 2.56).

Tabla 2.1: Esquema de conexión de la regleta.

Posición	Tipo Corriente	Cable Motor	Cable Maletín
1	Fase 1	Verde	Gris
2	Fase 2	Rojo	Marrón
3	Fase 3	Azul	Negro
4	Tierra	Amarillo/Verde	Amarillo/Verde

Debido a que el cable naranja de alimentación es utilizado en distintos motores lineales en propiedad del laboratorio, es común que se desenganche de la regleta. Para evitar que los 4 terminales del cable, correspondientes a las 3 fases de la corriente trifásica más la toma a tierra, se conecten de forma errónea con el módulo de control, en el lateral de maletín se incluye un esquema de colores que indica al operario la posición de cada cable en la regleta (Tabla 2.1).

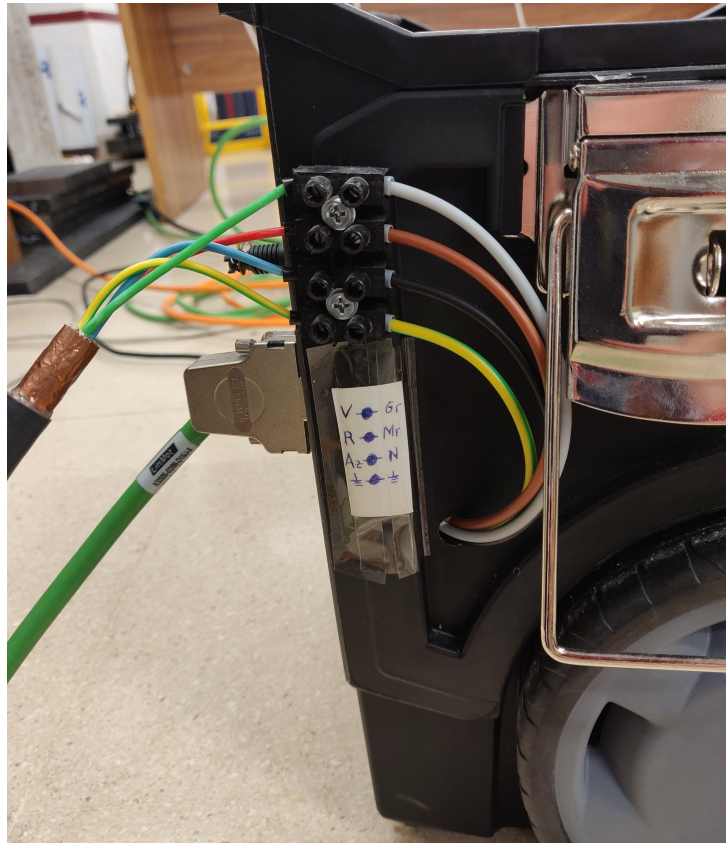


Figura 2.56: Perfil derecho del maletín de control.

En cuanto al lateral izquierdo del maletín de control, este presenta el conector BNC (Figura 2.57), por el cual se conecta la señal analógica a la entrada analógica X20 del drive de control. Dicha corriente, de amplitud máxima $\pm 10V$, es la que se encarga de proporcionar la ubicación de consigna del estátor cuando este trabaja en control de posición, así como ser proporcional a la intensidad de bobinado cuando el excitador inercial trabaja en modo corriente.

El conector BNC cuenta con un tapón de seguridad que se debe introducir cuando el maletín de control no se encuentre conectado a la tarjeta de adquisición de datos. El motivo reside en asegurar que el potencial en el extremo del conector sea de 0 V cuando no se esté utilizando dicha conexión BNC, evitando que el motor lineal actúe de forma imprevista e indeseada.

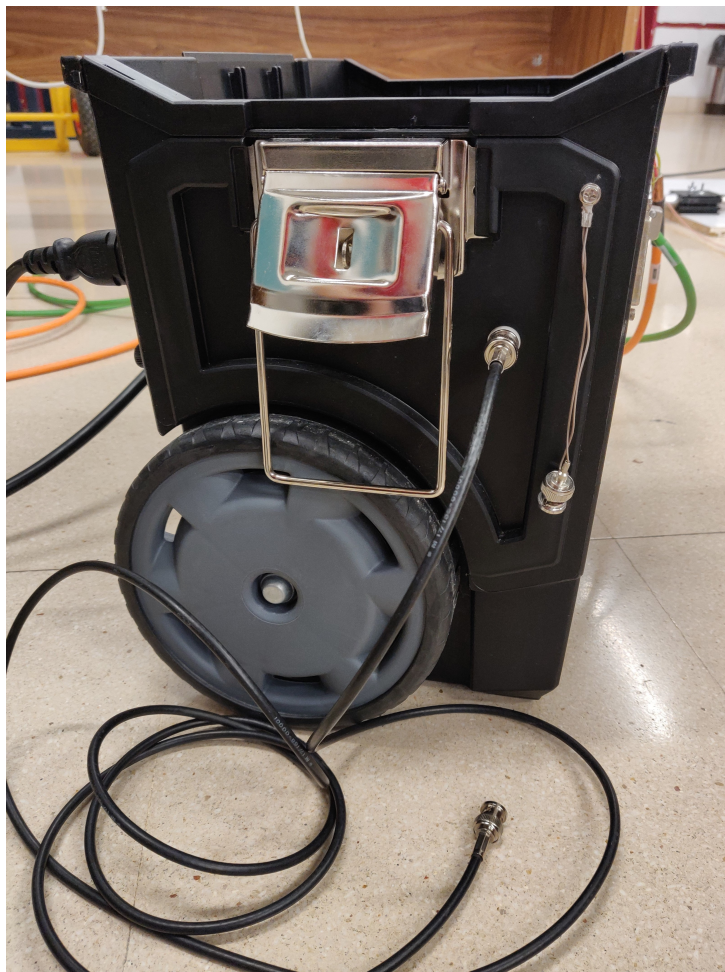


Figura 2.57: Perfil izquierdo del maletín de control.

Desde la parte posterior del maletín de control (Figura 2.58), se pueden apreciar las siguientes conexiones y elementos:

- Conexión a la red eléctrica de 220 V: Colocado en el extremo derecho, es el conector que permite la entrada de la corriente encargada de la alimentación de los dispositivos electrónicos del maletín, pasando previamente por las diversas fuentes de alimentación, que acondicionan la señal de entrada para el correcto funcionamiento de los diferentes componentes.
- Fusible de 220 V: Se ha instalado un fusible a la entrada de las fuentes de alimentación de 24 V, con el objetivo de protegerlo ante posibles sobretensiones que pudieran dañar de forma severa los componentes internos de la fuente. Dicho fusible se encuentra debajo de la conexión eléctrica de 220 V.
- Fusible de 24 V: Colocado en el extremo derecho, debajo de la regleta que conecta el maletín a la red trifásica, se encuentra un segundo fusible cuya misión es proteger la entrada del módulo de control frente a sobretensiones provenientes de la fuente de alimentación.



Figura 2.58: Vista trasera del maletín de control.

- Conexión a la red trifásica de 400 V: Ubicado en la parte superior izquierda, se trata de una conexión en forma de regleta que sirve de unión entre el cable de toma de corriente trifásica y el módulo de control, no si entes realizar un filtrado de las fases. A diferencia de la regleta encargada de conectar el maletín de control con el bobinado del estátor, no está previsto en un principio que esta conexión en regleta pueda ser desmontada para poder utilizar el conector trifásico en otros dispositivos.

En lo que refiere al suministro de red trifásica de 400 V, el laboratorio cuenta con su propia toma de corriente (Figura 2.59), aunque es necesario conocer las disponibilidad de fuentes cercanas cuando se realicen ensayos en un entorno exterior.



Figura 2.59: Conexión a la red trifásica de 400V.

3. Prototipado

Tras realizar el diseño de cada uno de los componentes del excitador inercial, validando las características dimensionales y físicas del montante, se inició el proceso de construcción del excitador. Dicha actividad consta de varios apartados, como son el proceso de obtención de los materiales, la fabricación de las distintas piezas y el ensamblaje de todas las partes constructivas hasta obtener el montaje final.

3.1. Obtención de los materiales

El excitador inercial cuenta con multitud de piezas que cumplen unas características mecánicas, geométricas o funcionales muy diferentes entre sí. Dichas propiedades han condicionado la disponibilidad y el método de compra de los materiales, que en algunos casos se pudo obtener piezas completas listas para realizar el montaje mientras que en otros casos se obtuvieron materiales base que necesitaron de un proceso de mecanizado posterior hasta obtener las características deseadas del producto.

En función del método de obtención de cada uno de los elementos que componen el excitador se pueden agrupar en placas de acero inoxidable, tubos de acero al carbono, el sistema de fijación, piezas que formaban parte del stock del laboratorio, otros materiales de menor relevancia y componentes finalmente no fabricados ni incluidos en el montaje.

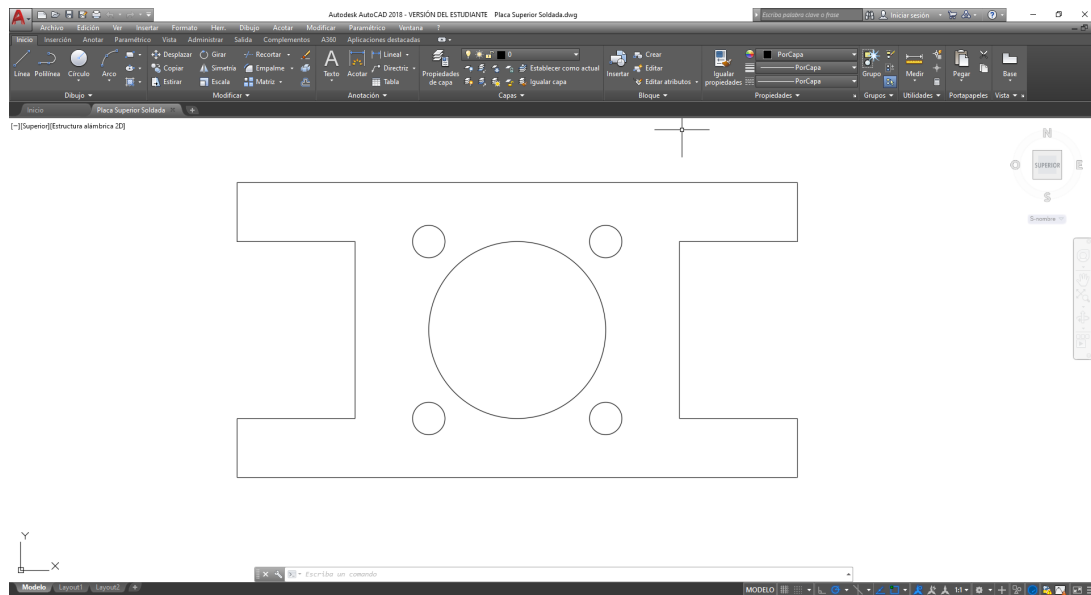


Figura 3.1: Placa de la testa superior en formato DWG.

3.1.1. Placas de acero

Para fabricar la mayoría de las placas de acero inoxidable que formaban la estructura del armazón, así como parte del bastidor, se ha recurrido al proveedor LASER EBRO S.L, empresa del entorno industrial de la provincia de Valladolid especializadas en el mecanizado de piezas metálicas por medio de corte láser.

Debido a que la morfología de dichas piezas de chapa fueron generadas mediante diseño asistido por ordenador, haciendo uso del software CATIA V5-6R2018, para la fabricación de las piezas se proporcionó al proveedor por cada pieza un plano del alzado, sin acotar o rotular, en formato DWG (Figura 3.1). De esta forma, el software de la cortadora láser era capaz de reconocer y reproducir la geometría de cada uno de los elementos independientemente de su complejidad.

Se indicó al proveedor el espesor requerido para cada pieza, que en esta ocasión era de 8 mm en todas las placas. Las piezas que finalmente tuvieron que ser cortadas por láser fueron:

- 1 placa testa superior.
- 1 placa testa inferior.
- 1 placa de atornillamiento.
- 4 placas T. Los orificios roscados no se pudieron fabricar por láser, lo que supuso un mecanizado posterior.
- 4 placas de soporte para masas en su diseño original. Tras realizar posteriormente el rediseño del armazón, las nuevas placas de soporte se fabricaron utilizando como base las placas originales, realizando los mecanizados pertinentes.

Las chapas de acero que no fueron fabricadas por corte láser corresponden las placas rigidizadoras del armazón original, debido a que al ser un pieza rectangular y maciza de acero, su geometría no era lo suficientemente compleja como para compensar el elevado coste de fabricación mediante corte láser. En su lugar se decidió fabricarla a partir de un chapa de acero de 8 mm que se encontraba almacenada en el taller (Apartado 3.2.4).

Las placas de apoyo de mesa sísmica, pertenecen al diseño definitivo del armazón, y fueron fabricadas utilizando las propias placas rigidizadoras como material base.

3.1.2. Tubos del bastidor

Para la fabricación del bastidor, además de las placas de testa y la placa de atornillamiento, se hizo uso de una serie de tubos, todos ellos de sección rectangular 100.50.4 mm. Para el montaje del excitador inercial se encargó al proveedor una barra con una longitud total de 4 m. Tras la compra de la material prima y antes de su entrega, se dio la posibilidad de poder realizar los cortes necesarios del tubo para obtener las piezas deseadas con sus longitudes finales, obteniendo a la hora de la recolección los siguientes componentes.

- 2 tubos pilar de 934 mm de longitud.
- 4 basas, de 290 mm de longitud cada una.
- 1 perfil de tubo sobrante de 980 mm de longitud, que ha sido guardado en el almacén del laboratorio.

3.1.3. Sistema de fijación

Para obtener el sistema de unión de perfiles que fuera capaz de atornillar los armazones sobre los canales de la carcasa del motor lineal, se recurrió a la empresa FASTEN Sistemas, proveedor del entorno industrial de Valladolid especializada en componentes para mobiliario y equipamientos industriales.

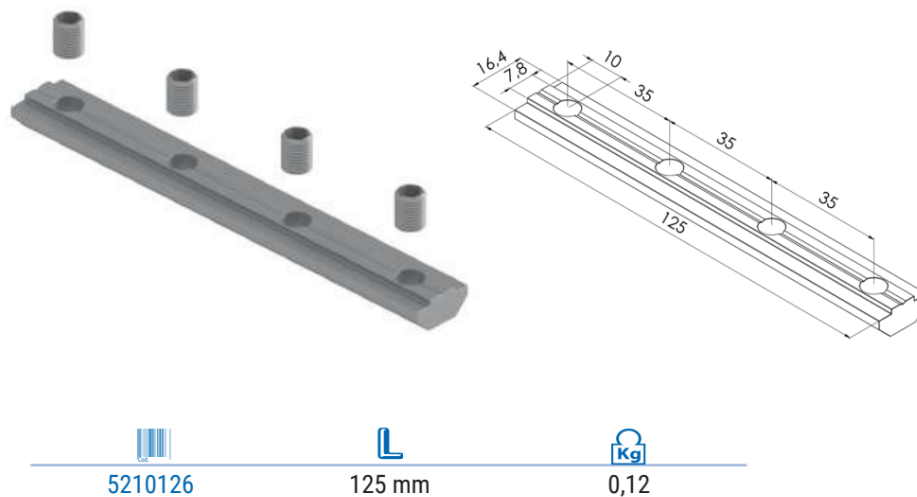


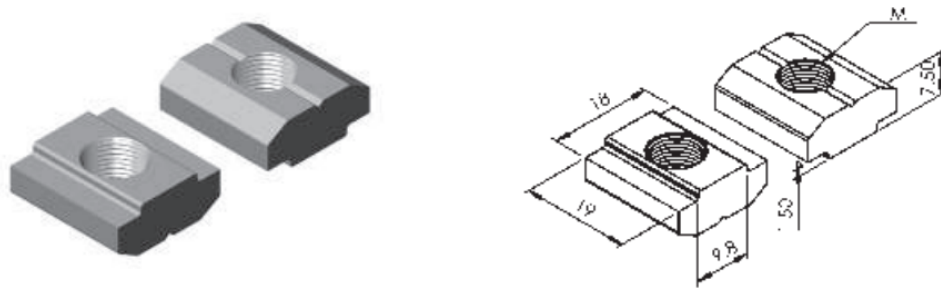
Figura 3.2: Regleta de unión de perfiles [10]

Se optó por elegir como elemento de diseño para el sistema de fijación una regleta de unión de perfiles (Figura 3.2). Dicha regleta consistía en una pieza de acero cincado de 125 mm de longitud con 4 agujeros roscado equiespaciados de métrica M8, que servían como puntos de unión con los elementos a unir con el canal. El perfil de la regleta estaba diseñado para poder introducirse en los canales como los que poseía la carcasa del motor lineal.

Las características geométricas de la regleta sirvieron como base para el diseño de los armazones, necesitando solamente 2 regletas por placa principal y proporcionando una serie de ventajas sobre el uso de tuercas de martillo deslizante:

- Aportan mayor rigidez estructural, ocupando todo el espacio físico del canal que se encuentra debajo del armazón.
- Montaje de los armazones sobre la carcasa más sencillo, debido al menor número de piezas y que las tuercas de martillo deslizan con facilidad sobre el canal, dificultando su correcto posicionamiento.

Sin embargo se tuvo que optar por el uso de las tuercas de martillo deslizante (Figura 3.3) debido a los problemas de suministro asociados a dichas regletas. El proveedor proporcionó unas regletas de unión de perfiles con unas tolerancias de posición de los centros de los orificios roscados con respecto al eje longitudinal de la regleta tan elevadas que se era imposible poder realizar los atornillamientos.






		
52044	M4	0,016
52045	M5	0,016
52046	M6	0,015
52048	M8	0,014

Figura 3.3: Tuerca de martillo deslizante para unión de perfiles [10].

3.1.4. Materiales proporcionados por el laboratorio

Los siguientes elementos ya formaban eran propiedad del laboratorio a la hora de empezar la construcción del excitador lineal:

- Motor lineal: El laboratorio cuenta con 3 motores lineales distintos, de los cuales se hizo uso del motor lineal P10-70X400U/450-BL-QJ, el motor de mayores dimensiones y mayores prestaciones.
- Sistema de guiado lineal: Se contaban con los guías completas, de las que se hará uso de los carriles y los rodillos, desechando los carros. Al ser carriles guía de dimensiones distintas, se realizaran mecanizados posterior con el objetivo de uniformar el sistema de guiado del excitador.
- Masas: El laboratorio contaba con 2 listones de grandes dimensiones de 1160 mm de longitud y 6 masas fijas de 580 mm, de las cuales 4 serán utilizadas para fabricar masas móviles.
- Tornillería utilizada: El almacén del laboratorio posee con un amplio stock de elementos roscados para realizar todas la uniones atornilladas necesarias en el montaje.
- Maletín de control: Junto al motor lineal de grandes dimensiones se ha proporcionado el maletín de control así como todo el cableado y dispositivos externos para la realización de los ensayos.

3.1.5. Componentes no fabricados

Si bien se contaban con parte del montaje en el diseño final del excitador inercial, algunos de los componentes no fueron incluidos de cara a la puesta en funcionamiento del motor lineal:

- Espárragos de unión entre armazones: El anclaje de las masas móviles a los armazones proporciona la suficiente rigidez a la estructura que rodea la carcasa del armazón, si bien es recomendable incluirlos en los ensayos futuros.
- Varillas de unión para las masas móviles: Los ensayos con el excitador lineal se realizaron con una carga de masa móvil relativamente baja, utilizando una unión atornillada convencional mediante tornillos para la unión entre las masas móviles y las placas soporte.
- Tubos de apoyo de masa fija: Se decidió que el sistema de adición de masa fija con el objetivo de estabilizar el bastidor e impedir los desplazamientos del excitador lineal con respecto al suelo firme serían rediseñados en líneas futuras.

3.1.6. Otros materiales

A continuación se muestra el método de obtención de distintos componentes de menor relevancia desde el punto de vista de la fabricación de la estructura del excitador inercial pero que son necesarios para cumplir determinadas funciones a la hora de realizar los ensayos:

- Sistema de apoyo: Fabricados a partir de un tornillo avellanado M8x16 y un taco de goma. El tornillo formaba parte del stock que proporcionaba el laboratorio, mientras que el taco de goma fue fabricado utilizando como materia prima una plancha de 10 mm de espesor, que posteriormente fue mecanizada mediante el uso de un taladro eléctrico de mano con una corona perforadora ajustable (Apartado 3.2.7).
- Topes de goma: De forma similar a los tacos del sistema de apoyo, se utilizó una plancha de caucho como materia prima, utilizando en esta ocasión dos planchas de 15 y 20 mm de espesor.
- Sistema de suspensión: Sistema formado por un tornillo M8x16, par de gomas elásticas y un casquillo de PLA. El elemento roscado fue proporcionado por el laboratorio, mientras que las gomas elásticas se adquirieron vía compra online. En cuanto al soporte, este se fabricó posteriormente mediante moldeo por deposición fundida, haciendo uso de la impresora 3D del laboratorio (Apartado 3.2.6). Para ello se ha suministrado al software de la impresora un archivo .STL que proporciona la geometría y los parámetros de impresión de la pieza.

3.2. Fabricación

3.2.1. Mecanizado guías

Para la implementación del sistema de guiado del motor se proporcionó para el montaje de excitador inercial dos carriles carriles guía de distintas dimensiones. La guía más corta, de 850 mm, es la que se tomo como referencia a la hora de diseñar del bastidor, condicionando la longitud máxima de guiado y la posición de las uniones atornilladas de los pilares.

Con el objetivo de estandarizar todos los componentes, así como conservar la simetría del excitador inercial, ambos carriles guía debían tener las mismas dimensiones y características geométricas. En consecuencia carril guía de mayor tamaño, con una longitud de 1250 mm, debía de ser mecanizado en el taller, para que pudiera cumplir con las siguientes características físicas:

- La longitud final del carril LFL52-SF-1250 debía ser la misma que la de la guía lineal utilizada de referencia, en este caso 850 mm.
- La guía LFL52-SF-1250 debía de tener al menos 3 agujeros pasantes en la misma posición a lo largo del eje longitudinal que los taladros del carril de 850 mm. De esta forma la posición de los puntos de unión roscada en los pilares será la misma independientemente del carril guía utilizado.

Para lograr la uniformidad entre ambas guías se tuvieron que realizar dos mecanizados en los extremos de la guía de 1250 mm mediante el uso de la sierra de cinta (Figura 3.4).



Figura 3.4: Corte del carril mediante el uso de la sierra de cinta.

La cantidad de sección a cortar a cada extremo venía condicionada por las ubicaciones finales de los centros de los taladros con respecto al mismo tiempo que se cumplía con el requerimiento de longitud máxima. De esta forma, se realizó un primer corte, de aproximadamente de 20 mm, desde una las bases del carril. Acto seguido se realizó un segundo corte en el extremo opuesto, eliminando 380 mm de sección. Las zonas de corte debían ser previamente señalizas, haciendo uso de una punta trazadora.

En cuanto al proceso de corte, la sierra de cinta realiza unos mecanizados rápidos y de un acabado razonable, haciendo usa de la taladrina para evitar sobrecalentamientos que puedan afectar negativamente las condiciones operativas de corte.



Figura 3.5: Comparación del los carriles tras el mecanizado.

En la Figura 3.5 se muestra la comparación entre ambas guías tras los cortes. Se puede observar la igualdad de tamaño al mismo tiempo que la posición de los 3 taladros de la guía LFL52-SF-850 es coincidente con orificios inferiores de cada patrón de 3 taladros equiespaciados 15 mm de la guía mecanizada.

3.2.2. Fabricación bastidor

El bastidor está formado por la unión soldada de los pilares y las basas entre sí. Al mismo tiempo el bastidor cuenta con multitud de agujeros pasantes y orificios roscado que sirven como puntos de unión con el resto de componentes del bastidor y que debían ser mecanizados.

Taladrado de los pilares

Los tubos que conforman los pilares del bastidor necesitaban de una serie de taladrados a lo largo de toda la sección para realizar el montaje completo del excitador inercial. En función de la superficie donde se ha realizado el mecanizado se pueden distinguir:

- Cara exterior: Se han realizado 8 agujeros $\emptyset 6.75$ mm que tras ser roscados posteriormente sirven como punto de unión con el sistema de suspensión. También se han mecanizado sobre esta superficie 3 orificios $\emptyset 25$ mm que se utilizarán en el proceso de montaje entre los pilares y las guías. La posición de todos los agujeros se muestra en la Figura 3.6.

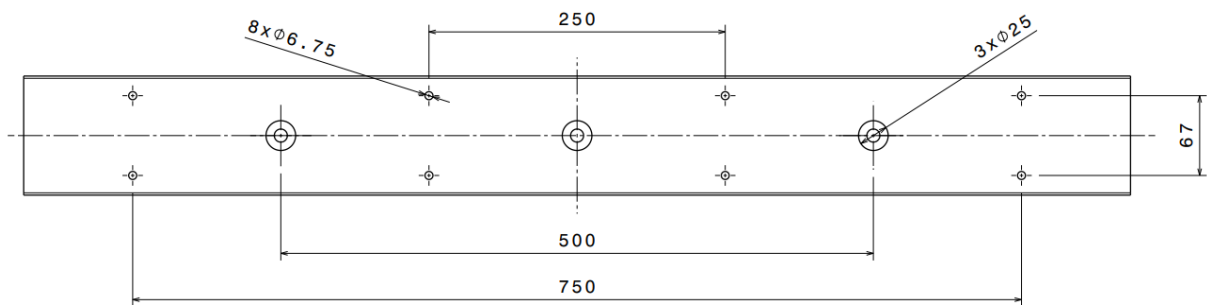


Figura 3.6: Posición de los taladros en la cara exterior.

- Cara exterior: Sobre esta superficie se han realizado los 3 agujeros pasantes $\emptyset 11$ mm que sirven como puntos de atornillamiento entre el pilar y el sistema de guiado. En la Figura 3.7 se muestra la posición de los taladros.

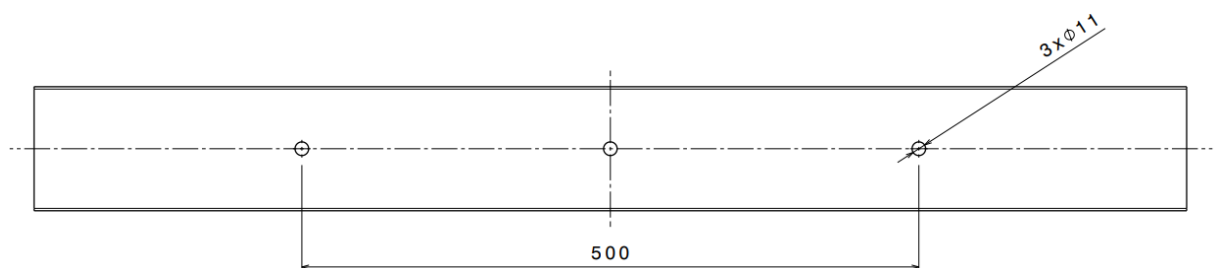


Figura 3.7: Posición de los taladros en la cara inferior.

A la hora de realizar el taladrado de cualquier orificio pasante sobre cualquier elemento de metálico del excitador inercial se ha seguido siempre el siguiente procedimiento:

1. Marcado visual de los centros de los agujeros sobre la superficie del elemento a mecanizar, utilizando como referencia las acotaciones indicadas en los planos de las piezas. El marcado se realiza haciendo uso de la herramienta punta trazadora.
2. Realizar una pequeña embutición de la superficie metálica en la región donde se ubica el centro del agujero. De esta forma se genera una marca que permite colocar la broca del taladro en la posición correcta de forma rápida y sencilla, buscando que la punta de la herramienta se hunda al contactar físicamente con la superficie embutida. Para realizar dicho marcado se ha hecho uso de un punzón metálico, que genera la hendidura al golpear la superficie de la chapa, aplicando la fuerza necesaria con la ayuda de un martillo.
3. Mecanizar el agujero con el uso de una taladrado en columna de grandes dimensiones (Figura 3.9). Hay que tener cuenta que a la hora de mecanizar un agujero inicial previo a un roscado, el tamaño de broca escogido debe ser igual al diámetro nominal del agujero roscado menos el paso.

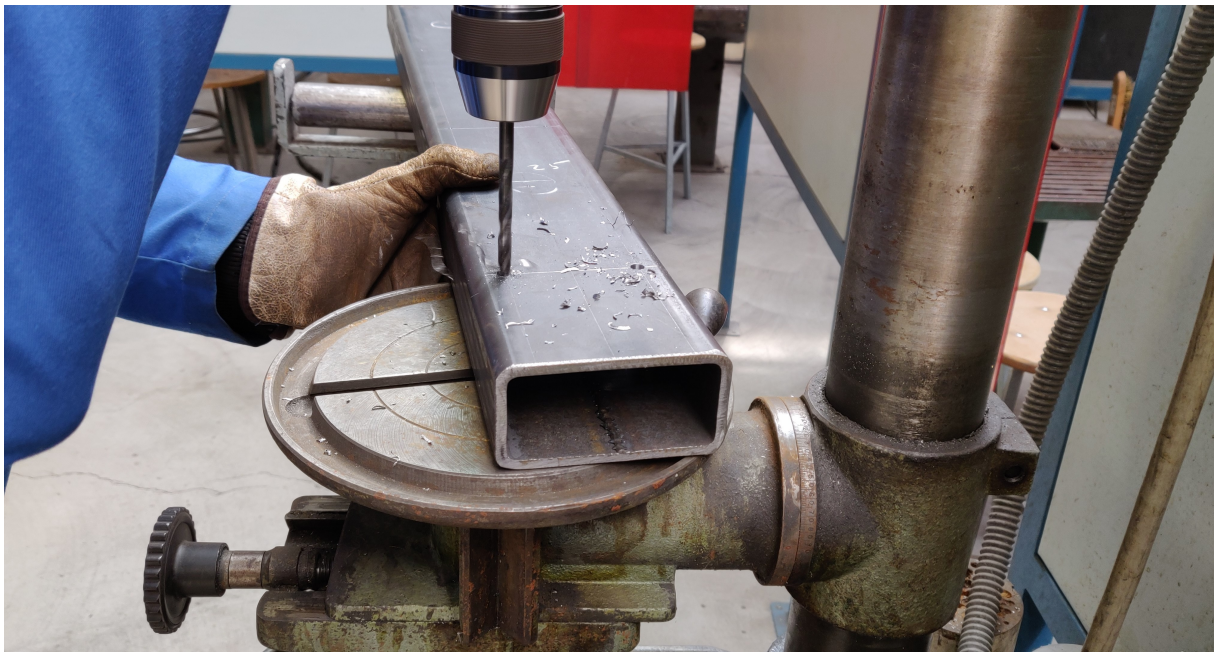


Figura 3.8: Mecanizado de los pilares mediante la taladradora en columna.

En cuanto al mecanizado de los pilares, se realizó en primer lugar los 8 taladros de unión con el sistema de suspensión haciendo uso de la broca de $\varnothing 6.75$ mm, mecanizado exclusivamente la cara exterior (Figura 3.8).

Seguidamente se mecanizó los 3 agujeros de 11 mm de diámetro de la cara inferior. Sin voltear el tubo pilar, se realizó 3 agujeros pasante mediante la broca $\emptyset 11$ mm desde la cara exterior, atravesando toda la sección de tubo hasta agujerear la cara inferior.

Debido a que los orificios $\emptyset 25$ mm y $\emptyset 11$ mm del pilar son coincidentes desde el plano en planta que utiliza la taladradora, el agujero realizado en la cara exterior permite que el taladrado posterior de los agujeros de mayor tamaño sea más sencilla, debido a que permite tener un mejor centrado y que parte del material de la zona central ya ha sido retirada, disminuyendo el desgaste de la herramienta.

Finalmente se mecanizan los 3 agujeros de diámetro 25 mm de la cara exterior, utilizando una corona perforadora de $\emptyset 25$ mm como herramienta para el perforado de la cara exterior.

Ensamblaje del bastidor

Tras mecanizar los tubos que conforman el bastidor se dio paso al ensamblaje. Si bien la idea de partida era realizar directamente los cordones de soldadura a medida que se realizaba el ensamblaje del bastidor, esta idea se descartó debido a que implicaba los siguientes inconvenientes:



Figura 3.9: Taladro en columna de grandes dimensiones [28]

- El sistema de sujeción necesario para mantener a los pilares, basas y testas, de forma casi simultánea, en la posición correcta para realizar los cordones de soldadura resultaba muy complejo, debido a la presencia de uniones entre 3 o más componentes a la vez, la multitud de piezas, su gran tamaño y peso final del conjunto.
- Si el sistema de sujeción es capaz de restringir de forma completa y eficaz los distintos elementos, a medida que se realizan los cordones de soldadura se puede producir deformaciones en los elementos debido a las dilataciones y contracciones que experimenta el metal en presencia del arco eléctrico. En caso de aparición de deformaciones muy severas éstas podrían complicar la realización de cordones posteriores, así como provocar que el bastidor presente desviaciones notorias en cuanto al grado de perpendicularidad o paralelismo entre los elementos, provocando que no sea apto para su uso.

En lugar de realizar directamente los cordones de soldadura, se decidió optar por ensamblar en primer lugar los pilares a las basas haciendo uso de uniones atornilladas. Al mismo tiempo la unión de las testas al bastidor se hizo utilizando solamente puntos de soldadura. En la Figura 3.10 se muestra la profundidad donde se colocaron las testas con respecto a las bases del bastidor.

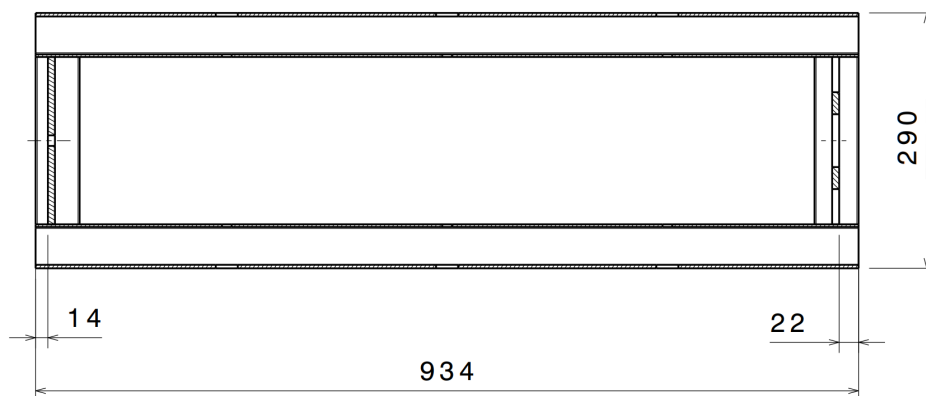


Figura 3.10: Colocación de las testas en el bastidor.

Las uniones utilizadas consistieron en la introducción de 4 espárragos de métrica M12 que atravesaban los extremos de los pilares, de forma que sobresalía parte del elemento roscado en ambas caras laterales del tubo. Sobre los salientes se introdujeron las basas, completando la unión mediante el uso de tuercas y arandelas planas M12 (Figura 3.11).

De forma previa se habían realizado una serie de taladros pasantes de $\varnothing 12$ mm tanto en los pilares como en las basas. La posición de los centros de los orificios fueron definidos por la intersección de los planos de simetría de las caras en contacto de ambos elementos tubulares. Los agujeros fueron mecanizados mediante la taladradora en columna, realizando para cada basa 2 orificios exclusivamente en la cara de contacto con el pilar, mientras que para los propios pilares se realizaron 2 agujeros pasantes que atravesaban ambas caras laterales de los mismos.



Figura 3.11: Ensamblaje del bastidor.

Soldadura del bastidor

Una vez ensamblado el bastidor y comprobar en el laboratorio que es apto para su uso, el siguiente paso fue la rigidizar de conjunto mediante cordones de soldadura para proporcionar al bastidor las características mecánicas que permitan soportar de adecuadamente las fuerzas producidas por el motor lineal sobre la estructura exterior.

Para realizar dichas uniones rígidas del bastidor se hizo uso de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas). Este tipo de soldadura se caracteriza por producir uniones de buenas prestaciones mecánicas, además de proporcionar buena ductilidad y resistencia a la corrosión, pudiendo realizarse en cualquier tipo de material, incluyendo piezas de acero inoxidable. Suelen estar indicada para cualquier tipo de espesor de chapa y se caracteriza por proporcionar un cordón de soldadura liso y libre de impurezas. Debido a que se han utilizado chapas de metal de un espesor relativamente grande (mayor de 3 mm) se ha hecho uso de varillas de aportación, cuyo material debe ser lo más similar posible al metal base a soldar.

Para la unión de las testas al bastidor se realizaron cordones de soldadura a lo largo de todo el perímetro exterior de las piezas generando un contacto continuo entre las placas de acero inoxidable con los pilares y las basas adyacentes (Figura 3.12). Previamente se habían retirado los puntos de soldaduras aplicados sobre las piezas durante el proceso de ensamblaje, además de limpiar las superficies de contacto donde se aplicó posteriormente los cordones.

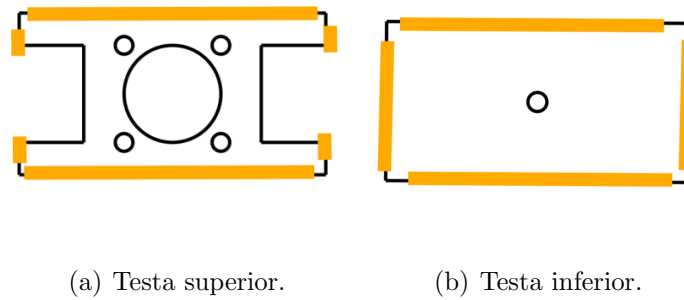


Figura 3.12: Cordones de soldadura empleados en las testas.

En la Figura 3.13 se muestra los cordones de soldadura aplicado en las uniones entre las basas y los pilares. Se han realizado 4 cordones completos en todos los puntos de unión entre los 2 pilares con las 4 basas que conforman todo el bastidor. Al mismo tiempo el cordón completo se compone a su vez de 3 tipos de trayectorias distintas, empezando por un cordón plano, seguido de un cordón horizontal y acabando con un cordón en techo. El ensamblaje anterior, mediante la introducción espárragos roscados, proporciona la suficiente rigidez y sujeción relativa entre piezas como para evitar las deformaciones de los distintos elementos durante el proceso de soldadura.

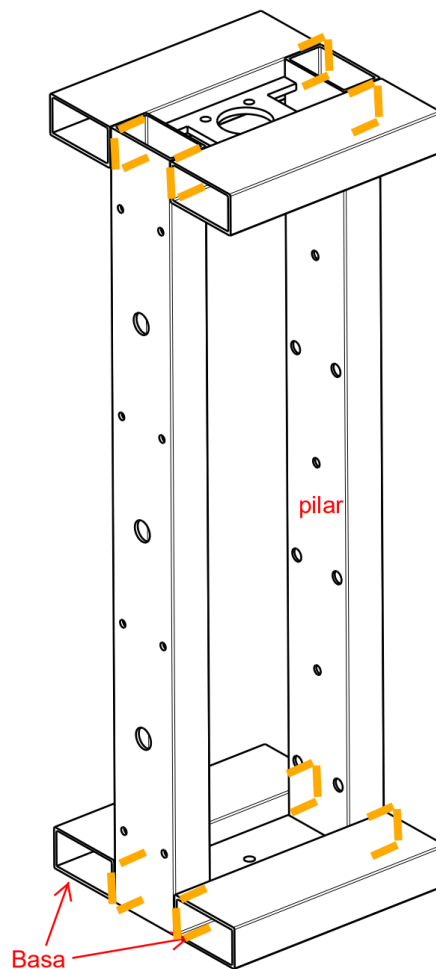


Figura 3.13: Cordones de soldadura empleados en el bastidor.

Roscados del bastidor

El siguiente paso consistió en fabricar los agujeros roscados en las bases del excitador inercial que permitieran el montaje del sistema de apoyo. El primer lugar se mecanizó los taladros de los agujeros pasantes previos al roscado, haciendo uso de la broca de 6.75 mm de diámetro (Figura 3.14). En función de la posición de apoyo, la ubicación de los orificios han sido:

- Posición vertical: 4 orificios colocados en las esquinas de la base inferior del bastidor. Cada basa cuenta con 2 agujeros colocados a 20 mm de la arista lateral exterior y a 20 mm del extremo de tubo correspondiente.
- Posición horizontal: 2 agujeros colocadas en cada basa de apoyo cuya superficie lateral entra en contacto con el suelo. Dichos orificios se encuentran ubicados a 20 mm de cada extremo de la basa y centrado sobre el eje longitudinal d la cara lateral.

A la hora de realizar los roscados de todos los elementos del excitador se ha seguido siempre el siguiente protocolo:

1. Se introduce sobre el agujero taladrado un macho de roscar de desbaste. El diámetro nominal del macho debe ser igual al diámetro de la métrica nominal que se quiera mecanizar. Haciéndose ayuda de un soporte, y teniendo bien fijada la pieza e mecanizar, se introduce el macho, mediante un movimiento de roscado a derechas. Es recomendable realizar un retroceso de un cuarto de giro por cada vuelta que se realice con el macho, así como utilizar lubricante para prevenir fracturas de los materiales.
2. Tras realizar el todo el roscado con el macho de roscar, se repite el proceso con los machos de roscar de acabado. El número de machos utilizados puede variar en función del material de la pieza, el tamaño del roscado, el tipo de paso o las especificaciones técnicas del filo.



Figura 3.14: Taladrado de la base del bastidor.

3.2.3. Mecanizado masas

Mediante el uso de la sierra de cinta del taller se cortó cada uno de las 4 masas fijas a través de su sección media, obteniendo un total de 8 masas móviles (Figura 3.15). Previo al mecanizado de los agujeros de las masas se realizó un pulido de las caras laterales que habían servido como sección de corte, para obtener una superficie lisa y de buen acabado de cara a realizar los agujeros roscados.

En la Figura 3.16 se muestran la posición de los orificios realizados. Se realizaron 2 taladros pasantes $\varnothing 10,5$ mm en la cara superior, si bien algunas de las masas presentaban algunos de estos orificios de serie. También se realizaron 2 agujeros pasantes $\varnothing 6,75$ mm en las caras laterales (Figura 3.16). En 4 de estas masas los agujeros laterales fueron roscados para obtener una rosca métrica M8 donde poder atornillar el sistema de suspensión.

Tras los mecanizados se realizó un estudio de metrología acerca la distancia entre los taladros pasantes de la cara superior, de valor nominal 104 mm. Se observó una alta dispersión en dicha medida, lo que dificultaría la introducción de 2 varillas M10 a través de sucesivas masas al mismo tiempo, imposibilitando el montajes del excitador lineal con con mucha masa acoplada al motor lineal. Debido a este inconveniente se tuvo que optar por usar varillas de un calibre más pequeño para realizar montajes con gran masa móvil.



Figura 3.15: Taladrado de la base del bastidor.

3.2.4. Fabricación armazón original

Montado el bastidor, el siguiente paso fue fabricar los armazones que componen la estructura que rodea el estátor. Utilizando el diseño inicial, el bloque móvil del excitador cuenta con 2 grandes armazones, los cuales cuentan con los siguientes componentes:

- 2 placas T.
- 2 placas soporte para masas en su diseño original.
- 2 placas rigidizadoras.
- 4 tuercas hexagonales M10.

Mecanizados previos a la soldadura

Si bien tanto las placas principales como las placas soporte fueron fabricadas por medio de corte láser, las placas rigidizadoras necesarias para la construcción del conjunto fueron fabricadas en el propio taller, utilizando como base una plancha de acero al carbono de 8 mm de espesor. Mediante el uso de la sierra de cinta, se fueron realizando los cortes sucesivos hasta obtener 4 placas metálicas macizas de 80 mm de largo y 60 mm de ancho.

Otro paso previo antes del inicio de la soldadura fue el roscado de los orificios de la placa principal encargados de la unión con los rodillos. Para ello se han utilizado los machos de rosca de métrica M10, que se han introducido sobre los taladros pasantes $\varnothing 8,5$ mm previamente mecanizados por corte láser.

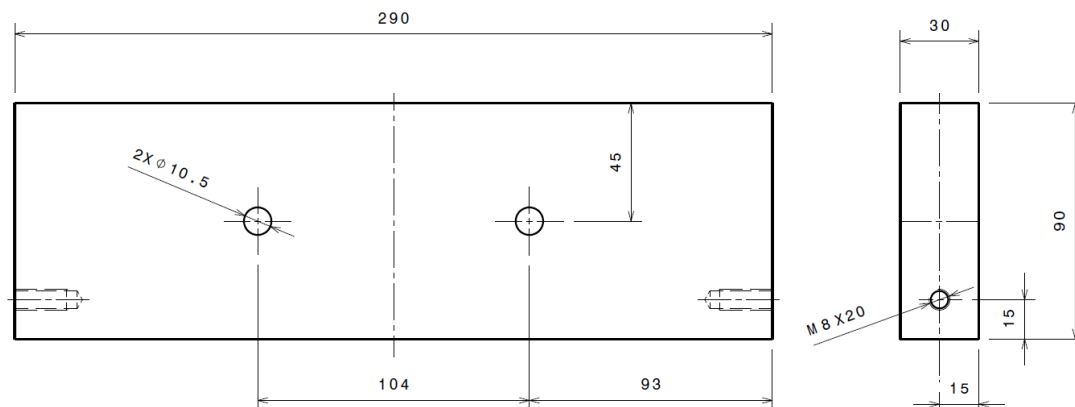


Figura 3.16: Posición de los agujeros de las masas móviles.

Soldadura del armazón original

Al igual que con el bastidor, la unión entre los distintos elementos del armazón se realizó haciendo uso de soldadura TIG. Previamente, se ingenió un sistema de soporte, que mediante el uso de una mesa de soldadura, abrazaderas y pinzas de sujeción, mantuviera todas las piezas perfectamente colocadas, respetando las cotas de diseño y manteniendo un buen grado de de paralelismo y perpendicularidad entre los diferentes componentes.

En la Figura 3.17 se muestra los planos del alzado y la planta del montaje del armazón. A la hora de realizar el diseño se priorizó que este fuera lo más simétrico posible. Se impuso una separación de 5 mm entre el lateral inferior de la placa T y la placa soporte para generar un espacio suficiente para evitar que posteriormente las masas móviles instaladas colisionaran con el pilar del bastidor.

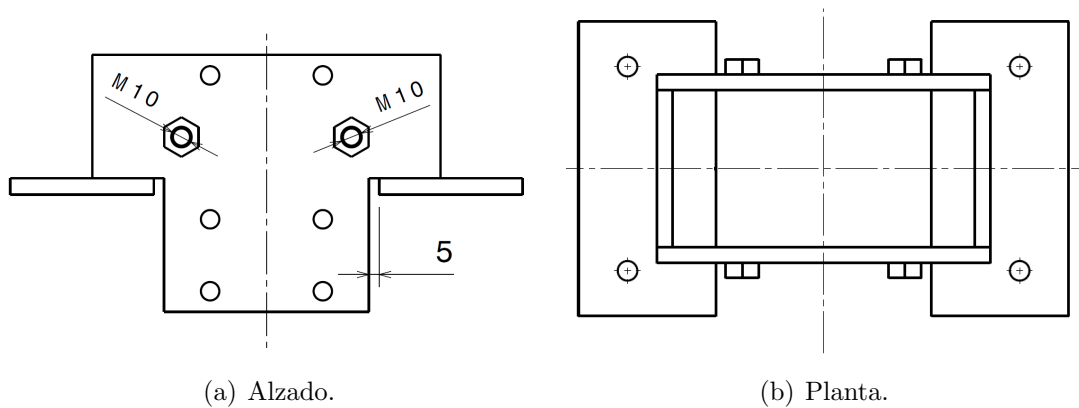


Figura 3.17: Plano de montaje del armazón principal.

A la hora de poder soldar las tuercas sobre el frontal de los armazones se tuvo que realizar en primer lugar una sujeción especial con el objetivo de lograr una continuidad entre el filo de rosca de los agujeros de la placa T con los roscados interiores de las tuercas a soldar, logrando así una mayor profundidad de roscado para la unión posterior de los rodillos al bloque fijo de estátor.

Para ello se introdujo en los agujeros roscados de la placa principal 2 tornillos de métrica M10, de forma que tuvieran la cabeza en la parte posterior de la placa, dejando sobresalir el vástago roscado por el lado opuesto. Sobre dicha rosca se colocaron las tuercas desde la cara principal, aplicando par de apriete a la unión hasta que las tuercas estuvieran en contacto con la superficie del armazón. Una vez en esta posición se realizaron los cordones de soldadura sobre todo el perímetro de las 4 tuercas. Una vez completado el proceso de soldadura, ya se podían retirar los tornillos.

En cuanto al resto de los componentes del armazón, el plan de montaje consistía realizar 4 cordones horizontales en ángulo entre las placas T y las placas soporte, así como 2 cordones horizontales en ángulo adicionales entre las placas rigidizadoras y las placas soporte para masas móviles (Figura 3.17). No se vio necesario realizar una uniones soldadas entre las placas rigidizadoras y la parte posterior de las principales, dejando que dichas placas se apoyaran simplemente unas sobre otras.

Finalmente se optó realizar ciertos puntos de soldadura en lugar de cordones completos, a excepción de las uniones soldadas entre las tuercas y las placas T. El motivo de dicha decisión se fundamentó en la capacidad de poder desmontar el armazón sin mucha dificultad en caso de que una vez en el laboratorio se comprobara que los armazones presentaran defectos en el montaje suficientemente relevantes para el correcto funcionamiento.

Dicha decisión permitía aprovechar todos los materiales utilizados en caso de que se tuviera que hacer un rediseño del armazón, como finalmente ocurrió al comprobar las deficiencias del diseño a la hora de realizar un montaje exitoso entre los armazones y la carcasa del motor lineal.

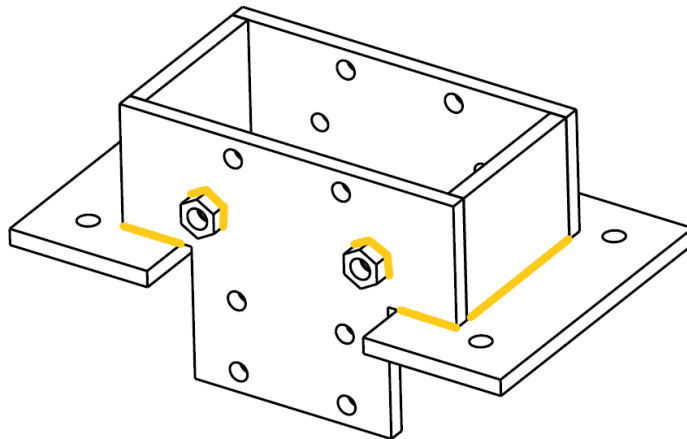


Figura 3.18: Cordones de soldadura sobre el armazón original.

3.2.5. Fabricación armazón definitivo

El diseño original del armazón contaba con las placas T separadas entre si por 80 mm con el objetivo de que el motor pudiera ir encajado entre ambas piezas. En la práctica la separación obtenida resultaba insuficiente debido a imprecisiones en el montaje y la variabilidad en la anchura de la carcasa (Apartado 3.3.1), generando un ajuste de tipo apriete entre el armazón y la carcasa del motor lineal. Esta falta de juego entre el motor y las caras posteriores de las placas principales impedía que el montaje se pudiera realizar de forma correcta, requiriendo de un nuevo diseño para el armazón.

Se modificó la morfología del armazón, dividiendo este en 2 armazones idénticos que se ensamblarían entre si una vez que dichas piezas hubieran sido atornilladas a la carcasa del motor, eliminando cualquier proceso de montaje que requiriera de cualquier tipo de apriete o juego entre piezas. Para esta nueva versión se procuró realizar las menos modificaciones posibles, con el objetivo de así poder reaprovechar todas las piezas existentes y no tener que fabricar nuevas placas de acero inoxidable por láser, lo que supondría un sobrecoste. Al mismo tiempo se aprovechó para añadir nuevas funcionalidades al armazón. Las modificaciones que presentan el nuevo diseño del armazón son las siguientes:

- El armazón pasa a tener una sola placa T, que tras ser montada sobre el motor se une al armazón opuesto a través de las masas móviles del montaje, así como mediante la inclusión de un par de espárragos. Para estas nuevas uniones atornilladas la placa principal requiere de dos nuevos taladros. De esta forma se mantiene la rigidez estructural necesaria para el bloque móvil.

- Se ha modificado la geometría de placas de soporte para masas, reduciendo sus dimensiones. Cada placa soporte ahora solo se encuentra soldada a una placa T. Al mismo tiempo las masas móviles necesitan de dos placas soporte para realizar las uniones atornilladas.
- Se han eliminado las placas rigidizadoras.
- El nuevo armazón cuenta con 2 placas de apoyo de mesa sísmica para poder utilizar el excitador inercial como mesa para sísmica. Dichas piezas han sido fabricadas utilizando las placas rigidizadoras como materia base.

Con este nuevo diseño, el excitador inercial cuenta ahora con 4 armazones, los cuales cuentan cada uno con las siguientes piezas:

- 1 placa T. Incluyen las 2 tuercas hexagonales previamente soldadas.
- 2 placas soporte para masas en su diseño definitivo.
- 2 placas de apoyo de mesa sísmica.

Mecanizado placa soporte de masas

La nueva versión de los soportes para masas fueron elaboradas a partir de las placas soporte originales anteriormente fabricadas, obteniendo 2 placas soporte nuevas por cada pieza obsoleta. A la hora de realizar el montaje entre de los armazones y el motor, se impuso una separación prudencial de 10 mm entre 2 placas soporte encargadas de atornillar una misma masa móvil, con el objetivo de evitar colisiones entre piezas.



Figura 3.19: Fabricación de las placas soporte definitivas.

Anteriormente la tarea de atornillar las masas al bloque móvil correspondía a una sola placa soporte original. Debido a la separación impuesta entre los nuevos soportes, se realizaron dos cortes por pieza mecanizada, utilizando la sierra de cinta (Figura 3.19).

De esta forma a por cada placa de 150 mm de longitud se obtuvo 2 placas soporte simétricas de 70 mm de largo, más una placa maciza excedente de 60x10 mm. Previamente se realizó un pulido de la cara superior de las piezas para eliminar rastros de las uniones soldadas entre las placas rigidizadoras y las antiguas placas soporte, uniformando así las condiciones de cortes en toda la sección.

Mecanizado placas de apoyo de mesa sísmica

Los soportes encargados para la unión de la placa de acero para realizar ensayos sísmicos fueron fabricados a partir del mecanizado de las placas rigidizadoras que fueron desechadas para la segunda versión del armazón. Las operaciones realizadas en el taller por cada placa rigidizadora fueron:

1. En primer lugar se realizaron mecanizados con la sierra de cinta con el plano de corte 15 mm paralelo a la cara lateral de 60 mm de longitud de la chapa rigidizadora, obteniendo una placa de dimensiones 80x45 mm.
2. El siguiente paso consistió en realizar 3 cortes equidistantes a lo largo del lateral de 80 mm de la chapa. Como el espesor de la chapa y las placas de apoyo son las mismas, se obtienen 4 piezas con las dimensiones definitivas.
3. Sobre cada una de las 4 placas de apoyo se realizó un agujero pasante mediante la broca de $\varnothing 8.5$ mm. Al igual que todos los taladros previamente realizados, los centros de dichos orificios fueron marcados primero visualmente y seguidamente mediante un punzón de metal. En la figura 3.20 se muestra la posición del agujero sobre el alzado de la pieza.
4. Finalmente se realizó un roscado de los orificios pasantes haciendo uso de los machos de roscar, obteniendo por cada plaquita un orificio roscado de métrica M8.

El bloque móvil necesita un total de 8 placas de apoyo, lo que supuso el mecanizado completo de al menos 2 placas rigidizadoras.

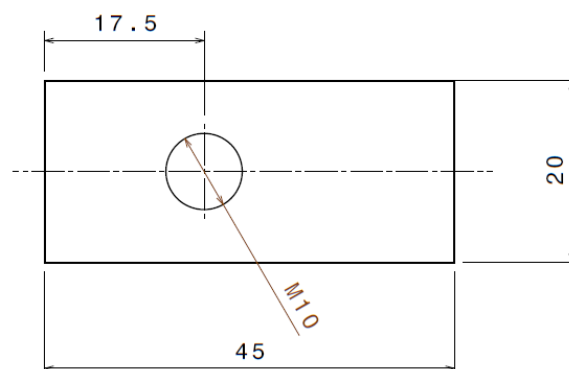


Figura 3.20: Alzado de la placas de apoyo de mesa sísmica.

Mecanizado placa T

Para poder incluir los espárragos de unión entre armazones se mecanizaron 2 taladros por cada placa principal. Dichos agujeros se encontraban separados entre sí 110 mm y ubicados a 15 mm de la arista superior de chapa, manteniendo en todo momento la simetría de la pieza. Tras marcar la posición de los centros, se hizo uso de la taladradora en columna para realizar los orificios, todos ellos de 11 mm de diámetro (Figura 3.21).



Figura 3.21: Taladrado de las placas T.

Adicionalmente se realizaron unos avellanados sobre la cara frontal de las placas T, con el objetivo de facilitar la introducción de los espárragos. Para realizar dichos mecanizados el taller cuenta con un juego de brocas avellanadoras que se conectan al cabezal de la taladradora en columna (Figura 3.22).



Figura 3.22: Avellanado de las placas T.

Soldadura del armazón definitivo

Para esta segunda versión de los armazones no se realizaron puntos de soldadura, sino que en su lugar se realizaron directamente los cordones de soldadura completos, haciendo uso del equipo TIG ya utilizado anteriormente. En estas operaciones la correcta sujeción de las piezas del armazón, haciendo uso de los distintos soportes, como abrazaderas y pinzas (Figura 3.23), fue fundamental debido a la poca área de contacto entre las distintas piezas, especialmente entre la placa principal y las placas soporte para masas. El grado de perpendicularidad entre las caras de las placas principales y los soportes, así como el paralelismo entre las distintas placas soporte eran de especial relevancia debido a que se debían cumplir los siguientes requisitos:

- La masa móvil debía poder apoyarse sobre la superficie de dos placas soporte, pertenecientes cada una a dos armazones colocados cada uno sobre un lateral del motor. Dichas superficies debían pertenecer al mismo plano para garantizar el máximo contacto entre las placas y la masas, así como un correcto atornillamiento en ambas placas metálicas.
- Los ejes de los orificios pertenecientes a placas soporte de armazones opuestos debían ser paralelos entre sí, al mismo tiempo que los ejes de los agujeros de las placas soporte de la zona superior del motor lineal debían ser coincidentes con el eje del taladrado de la placa soporte homónima de la parte inferior. De esta forma sería posible introducir los pares de varillas M8 encargadas de poder adicionar gran cantidad de masas móviles en caso de realizar ensayos de gran carga.

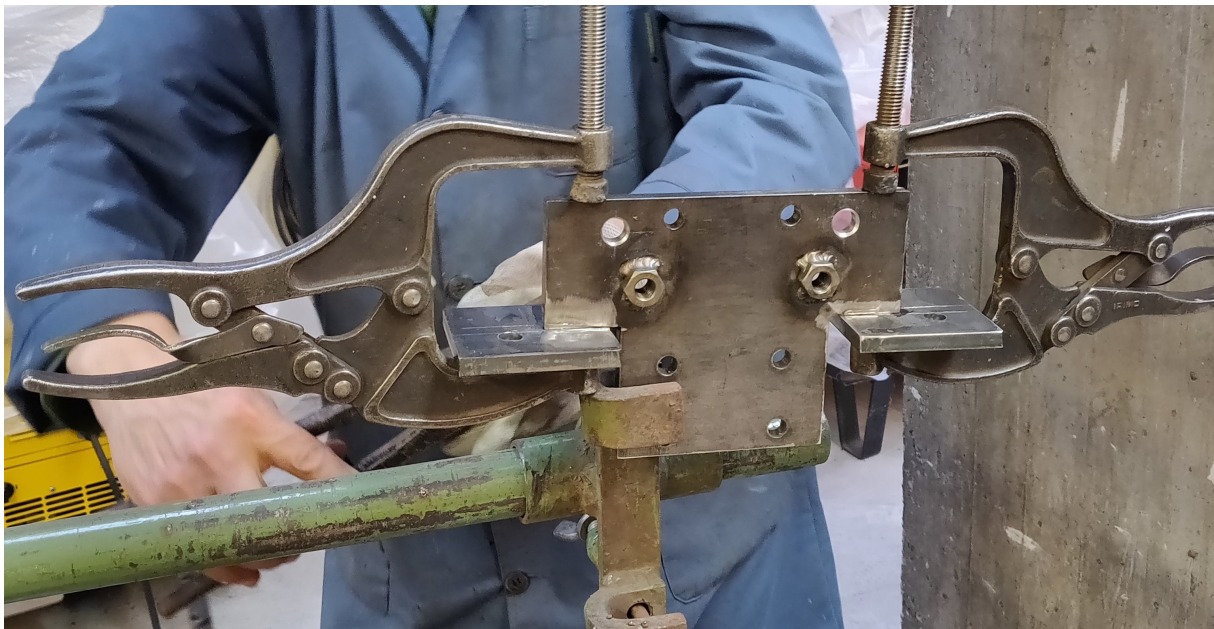


Figura 3.23: Sujeción del armazón durante el proceso de soldado.

En la Figura 3.26¹ se muestran la colocación de las distintas piezas en el nuevo diseño del armazón. Para esta versión se mantiene la separación 5 mm entre las placas soporte y la placa T que evita la colisión entre las masa móviles y los pilares. La colocación relativa de los soportes de la masas sobre la placa principal es aquella que mantiene la colocación de los agujeros de unión para las masas en la misma posición que poseían en el armazón original. Se puede observar que no hay problemas de superposición entre los ejes del orificio roscado de las placas de apoyo y los ejes de los taladros de la placa principal.

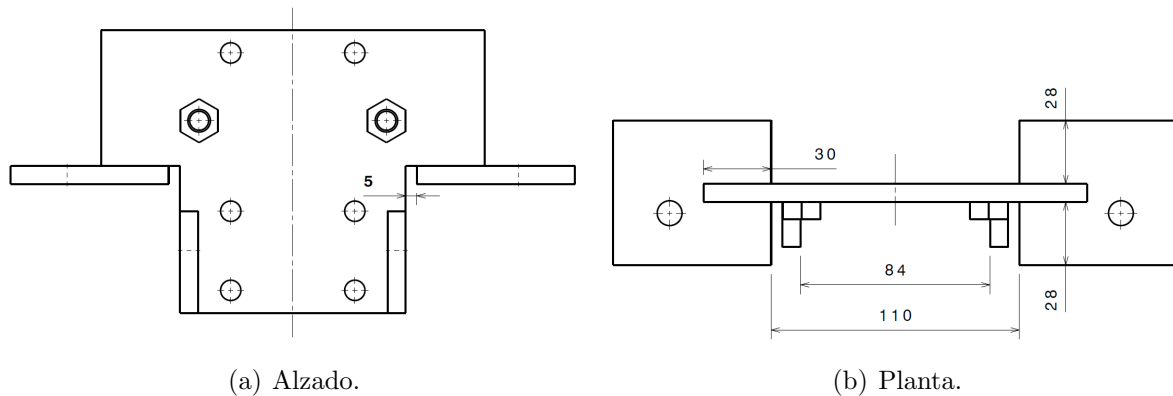


Figura 3.24: Plano de montaje del armazón principal.

Como paso previo a la soldadura, se realizó un pulido de las superficies de las caras superiores de las placas de soporte, debido a que contenían rastros de los puntos de soldadura realizados en el montaje anterior (Figura 3.25). Tras el lijado se realizaron una serie de marcados visuales mediante la punta trazadora de las zonas donde realizar los cordones, debido a que la particular geometría de dichas piezas podía inducir a errores en su colocación.



Figura 3.25: Lijado de las placas soporte para masas.

En cuanto al propio proceso de soldadura se realizaron un total de 6 cordones por armazón (Figura 3.26¹). Se tuvieron que realizar 2 cordones horizontales en ángulo en cada cara de la placa T en su unión con las placas soporte, debido a que un solo cordón no proporcionaba la rigidez necesaria para asegurar la correcta colocación relativa entre piezas en caso de que el soporte sufriera algún tipo de golpe o fuerza aplicada en los extremos de la placa.

La cantidad de superficie en contacto y la colocación relativa entre las placas de apoyo con respecto a la placa T permitió que fuera suficiente con realizar un cordón vertical en ángulo por cada pieza para garantizar la integridad de la unión ante esfuerzos externos. Tras realizar la soldadura de todas las piezas metálicas y posteriormente comprobar el correcto ensamblaje de estas, se aplicó tanto a los armazones como al bastidor un capa de pintura que proporciona una protección ante la corrosión, así como mantener las superficies limpias y libres de grasa.

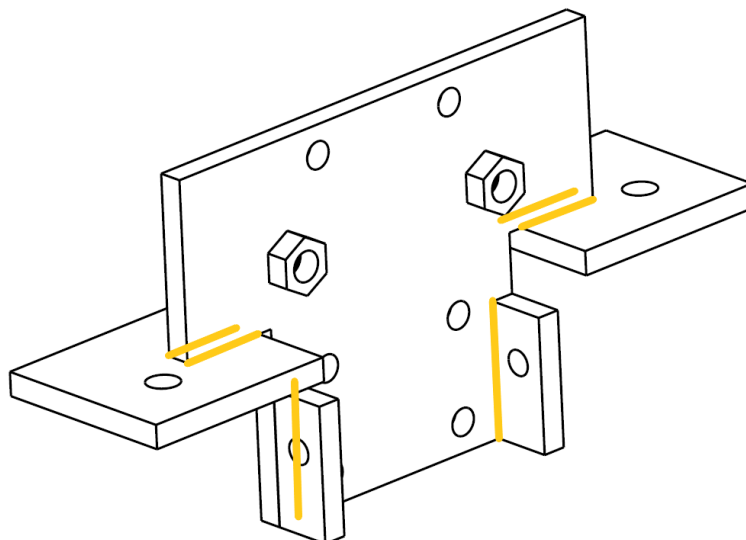


Figura 3.26: Cordones de soldadura sobre el armazón definitivo.

3.2.6. Fabricación de los soportes de gomas

A partir del archivo .STL con la geometría del soporte (Figura 3.27) se fabricaron 16 casquillos por moldeado por deposición fundida, utilizando en este caso la Creality Ender 3 como modelo de impresora 3D (Figura 3.28). Haciendo uso del software Ultimaker Cura se pudo configurar la fabricación de los casquillos, modificando variables relacionadas con la calidad final de la pieza, el mapa topográfico de impresión y alterar multitud de parámetros que intervienen en el proceso de impresión. La impresora incluía una bobina llena de filamento de PLA que proporcionaba el material de impresión.

¹En las Figuras 3.24 y 3.26 no se muestran los taladros para la introducción de espárragos a través de la placa principal, que si bien no son de interés para el proceso de soldadura del armazón, se encuentran en la versión final del producto.

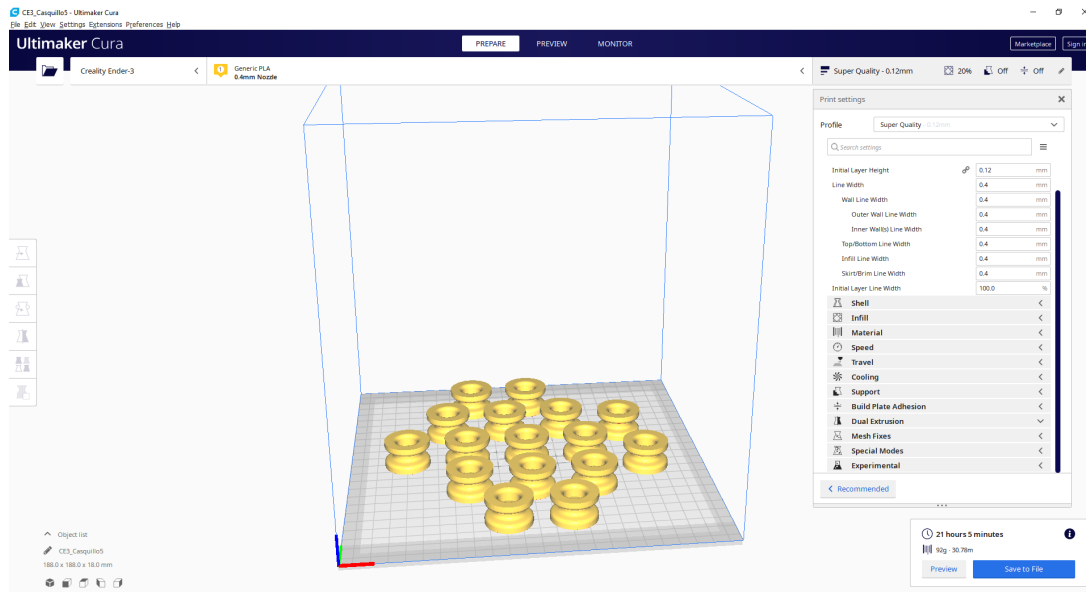


Figura 3.27: Archivo .STL del casquillo.

A la hora de generar los casquillos no se fabricaron todos de una sola impresión sino que se realizaron en primer lugar varios prototipos hasta obtener un soporte que cumpliera los requisitos en cuanto a la calidad estructural de impresión, capacidad de adición de gomas y juego adecuado entre el orificio interior y el tornillo M8x16 de sujeción.

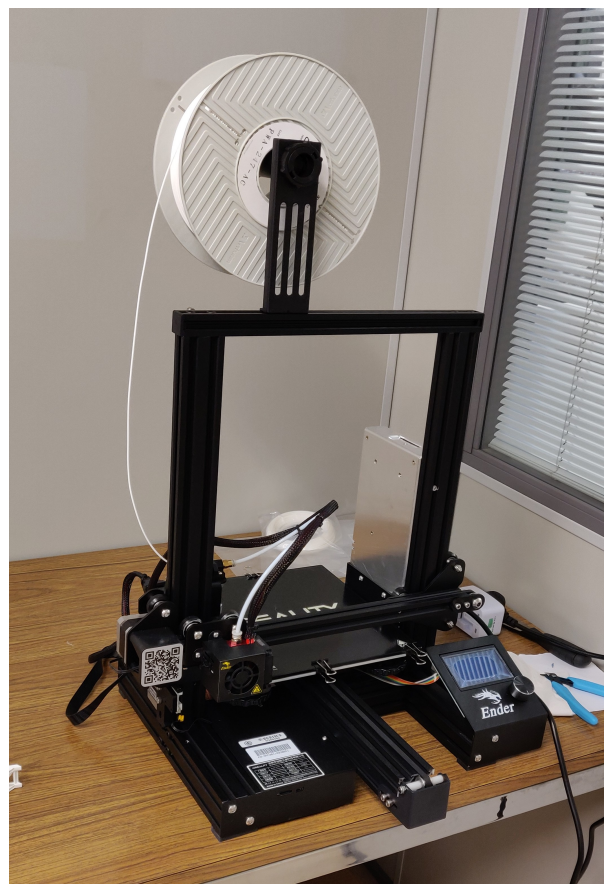


Figura 3.28: Taladrado de la base del bastidor.

3.2.7. Fabricación de topes de goma y sistema de apoyo

El excitador cuenta con una serie de componentes fabricados a partir de elastómeros que aprovechan las propiedades elásticas del material para realizar determinadas funciones. Tanto para los topes de goma del sistema de fin carrera del motor como para los tacos de que conforman la base del sistema de apoyo, se han fabricado unos aros de caucho, cuyo procedimiento de manufactura ha sido:

1. Elección de las planchas de elastómero para el mecanizado, con la suficiente superficie para obtener todos los aros deseados. El espesor de la plancha viene determinada por la aplicación final del producto, necesitando más espesor en el caso del sistema de fin de carrera. En el caso del sistema de apoyo se ha escogido una plancha de 5 mm de espesor, mientras que para los topes de goma se han escogido dos planchas de 10 y 15 mm. La diferencia de espesores entre ambas planchas de caucho para el sistema de fin de carrera no es relevante para el funcionamiento del sistema.
2. Taladrado del agujeros concéntricos interiores de los aros mediante una taladradora portátil. En caso del sistema de apoyo se han mecanizado por medio de una broca $\varnothing 8$ mm mientras que para los topes de goma del sistema de fin de carrera se ha hecho uso de una broca de sierra de corona para realizar orificios de $\varnothing 28$ mm . A la hora de mecanizar los orificios se tuvo en cuenta colocar los centros de los aros lo más separados posible entre sí para evitar superposiciones de las circunferencias exteriores al realizar el taladrado exterior.
3. Taladrado del agujeros concéntricos interiores de los aros, siendo agujeros de $\varnothing 25$ mm en caso del sistema de apoyo y $\varnothing 60$ mm para los topes de goma del sistema de fin de carrera. En ambos casos se hizo uso de brocas de sierra de corona.

En total se han tenido que fabricar 8 tacos de goma para el sistema de apoyo y 9 aros de goma para el sistema de fin de carrera.

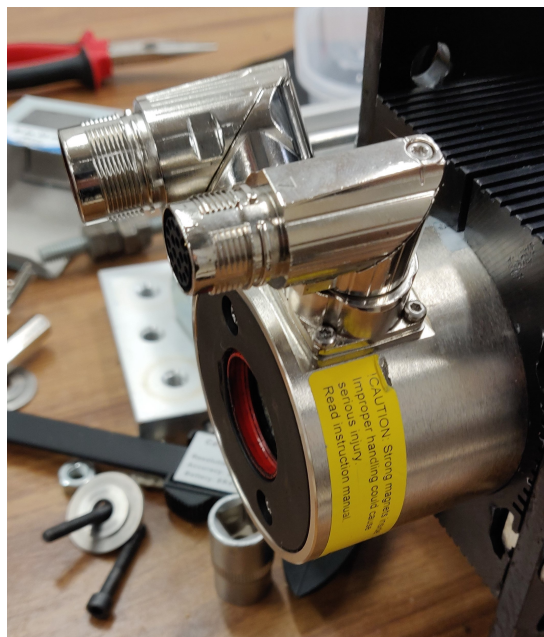


Figura 3.29: Colocación del cabezal de estátor con respecto a la camisa.

3.3. Montaje

Con la fabricación de todos los componentes que conforman el excitador inercial se dio paso al montaje del mismo. Dicho proceso de ensamblaje se dividió en 3 partes diferenciadas:

- Ensamblaje de todos los elementos principales e imprescindibles que conforman el bloque móvil del sistema.
- Unión entre el bloque móvil del sistema con los elementos estáticos del motor. En este proceso se realizó introdujo vástago sobre el estátor armado al mismo tiempo que se ensambló tanto el sistema de guiado lineal como el propio vástago sobre el bastidor.
- Atornillamiento de diferentes componentes como las masas móviles y el sistema de suspensión en función de los ensayos a realizar. El excitador inercial ya es operativo antes de realizar esta fase de montaje.

3.3.1. Bloque móvil

El proceso de ensamblaje del bloque móvil se inició con la construcción de la parte desplazable del motor. El estátor se colocó sobre la carcasa inferior del motor, cubriéndolo a su vez con el bloque superior de aluminio. De esta forma el estátor quedó aprisionado entre ambas partes de la camisa, que a su vez quedaron rígidamente unidas mediante la introducción de 8 tornillos M6x45 cuyos puntos de roscado se encuentran ubicados a lo largo de la toda la carcasa.

A la hora de realizar el montaje de los dos bloques de la camisa se tuvo en cuenta aplicar en cada unión roscada la cantidad de par justa con el objetivo de que la anchura del bloque fijo del motor lineal fuera de 80 mm a lo largo de toda carcasa, manteniendo un alto grado de paralelismo las caras superior e inferior de la carcasa, debido fundamentalmente a 2 motivos:

- La anchura del motor afecta a la separación entre los armazones opuestos encargados de adicionar masa al bloque móvil. La separación entre taladros de los soportes de masas de caras opuestas del motor debe ser de 104 mm para poder realizar el montaje.
- La ubicación del carril guía no es ajustable. Una anchura incorrecta de la camisa podría impedir que los rodillos del sistema de guiado pudieran colocarse correctamente sobre el carril.

Previamente se ajustó la posición del estátor con respecto a la carcasa, debido a que no posee restricciones en cuanto a los movimientos de rotación y traslación sobre el eje longitudinal cuando los bloques de la camisa no se encuentran atornillados entre si con el suficiente par. Para su colocación final (Figura 3.29) se siguieron los siguientes criterios:

- El cabezal del estátor tiene que sobresalir sobre la camisa la distancia suficiente con el objetivo de tener el mayor espacio útil para la conexión de los conectores entre la parte inferior del cabezal y la parte superior de los armazones. Con el suficiente margen se puede realizar la conexión con el cable de codificación con la cabeza del conector rotado hacia la parte inferior sin que haya colisión con los armazones (Figura 2.17), ganando así en distancia de carrera.
- La posición final del estátor debe permitir un fácil acceso de los conectores, en especial cuando el excitador inercial se encuentre trabajando en la posición horizontal. Se colocó el estátor de forma que los conectores estuvieran ubicados en el lateral de 80 mm de la carcasa que más tarde sería la cara superior del bloque móvil en los ensayos en horizontal.

Con el ensamblaje completo del bloque móvil del motor se dio paso a la unión de los armazones sobre los canales de la carcasa. Los armazones se podían montar a lo largo de toda la longitud del motor, eligiendo finalmente las posiciones extremas. Por cada armazón se introdujo 6 tuercas de martillo deslizantes sobre los canales de la cara de contacto con el armazón, alineándolas con los orificios $\varnothing 9$ mm de la placa T. Se completó la unión entre la carcasa y el armazón mediante el uso de tornillos M8x16 y arandelas finas M8, restringiendo los movimientos del armazón relativos al estátor (Figura 3.30).

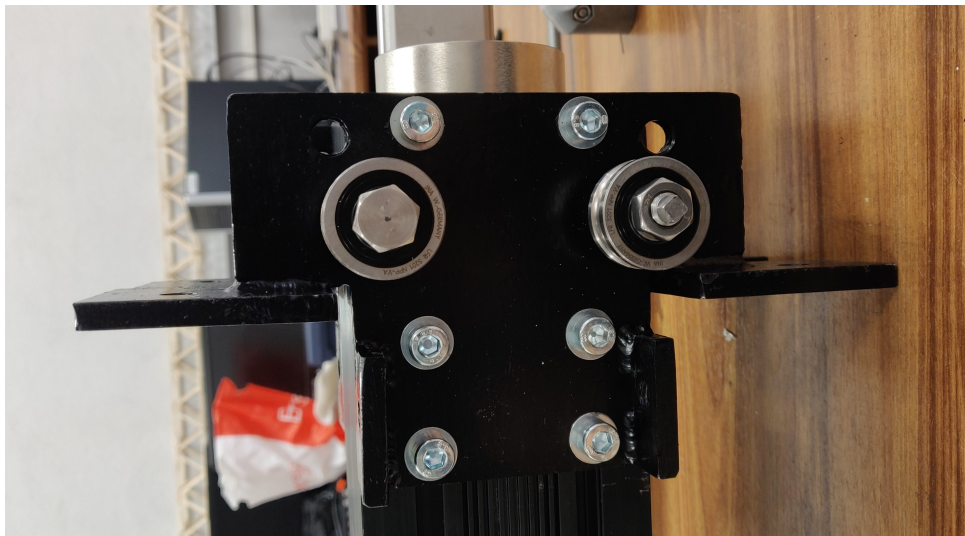


Figura 3.30: Taladrado de la base del bastidor.

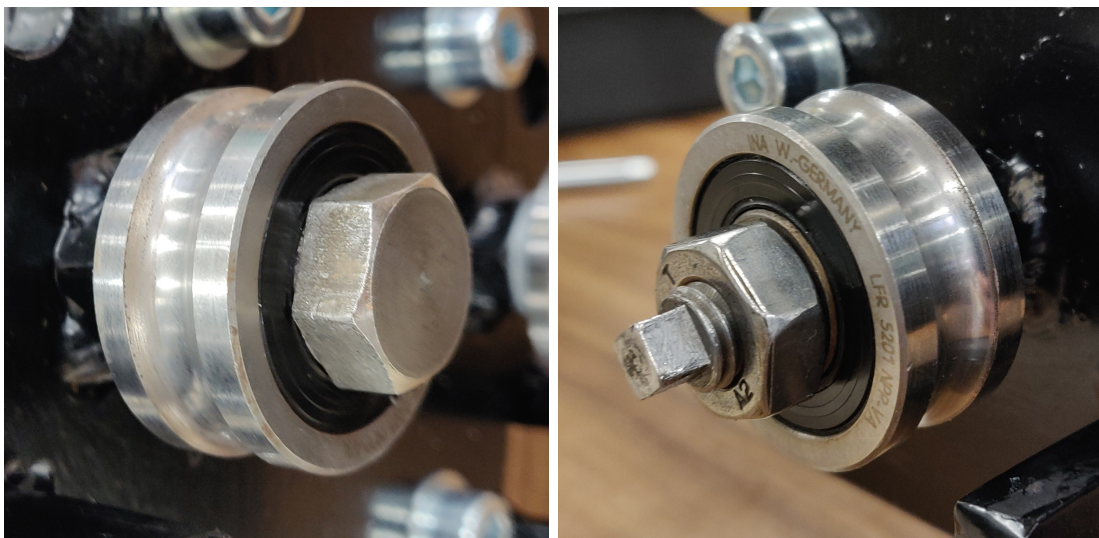
Posteriormente se introdujeron los rodillos sobre los armazones, colocando entre el rodamiento y la tuerca del armazón 2 arandelas planas M10, además de la arandela de contacto con el rodamiento que venía incluida en el montaje inicial de los rodillos sobre el carro del sistema de guiado lineal. No se introdujo todo el cuerpo roscado del perno sobre el armazón, debido a que el rodillo debía colocarse a una altura determinada sobre la superficie de la placa principal para que la unión entre los rodillos y el carril guía fuera la adecuada, habiendo tenido en cuenta además la correcta anchura del motor en esa zona. Al no haber una precarga en la unión las arandelas no cumplen una función de mantenimiento del valor de precarga, sino que cumplen la función de proteger el filo de rosca del perno.

Solo se podría haber realizado una unión con par de apriete se se hubiera tenido acceso a arandelas de ajuste, de los que no se tenía disponibilidad. A pesar de ello una vez realizada la unión entre los rodillos y el carril la posición del perno queda perfectamente restringida en su cota vertical debida a la unión entre los rodamientos y la guía perfectamente fija.

A la hora de introducir los rodillos sobre los armazones en función de si poseían pernos concéntricos o excéntricos (Figura 3.31) se aplicaron los siguientes criterios:

- Lo armazones de una misma cara del motor lineal debían tener los rodillos concéntricos en la misma posición lateral. De esta forma al realizar los ajustes de obturación el carril puede dejarse en reposo con uno de sus ejes de acero sobre los rodillos concéntricos, ajustando la obturación de los rodillos excéntricos de ambos armazones sobre el otro eje de la guía (Figura 3.32).
- Los armazones de caras opuestas del motor lineal debían poseer los rodillos de pernos excéntricos ubicados sobre la tuerca más cercana a la misma cara lateral de 80 mm de la carcasa del motor. Con esta distribución, al colocar el excitador inercial en la posición horizontal, todos los rodillos excéntricos se encuentran ubicados en la parte superior del montaje, facilitando su acceso para realizar ajustes in situ de las obturaciones entre los carriles y los rodamientos.

Una vez colocados los rodillos sobre sus respectivos lugares del armazón y colocar los pernos a la altura indicada se realizó un proceso de preajuste entre las guías y los rodillos, controlando la obturación presente en los puntos de rodadura, comprobando que el movimiento lineal fuera suave y sin susceptibilidad a vibraciones entre la guía y el bloque móvil a lo largo de todo el desplazamiento.



(a) Rodillo concéntrico.

(b) Rodillo excéntrico.

Figura 3.31: Montaje de los rodillos.

La severidad de los diferentes preajustes con respecto a la rodadura de los rodillos sobre las guías tiene su influencia posteriormente al realizar la unión entre el bloque móvil del excitador lineal con los carriles guía y el bastidor, presentando dos posibles escenarios:

- Si el ajuste entre los rodillos y la guía es de tipo juego, la unión posterior entre los dos elementos a la hora de realizar la unión entre los bloques móvil y fija del excitador es más sencilla, pero requiere de un mayor ajuste posterior de la rodadura.
- Si el ajuste entre los rodillos y la guía es de tipo apriete, se requiere de menores ajustes tras realizar todo el montaje del excitador pero sin embargo complica de forma severa la introducción de las guías a través de los rodamientos como paso previo al atornillamiento del carril al bastidor, llegando incluso a imposibilitar el montaje en caso de aprietes muy severos.

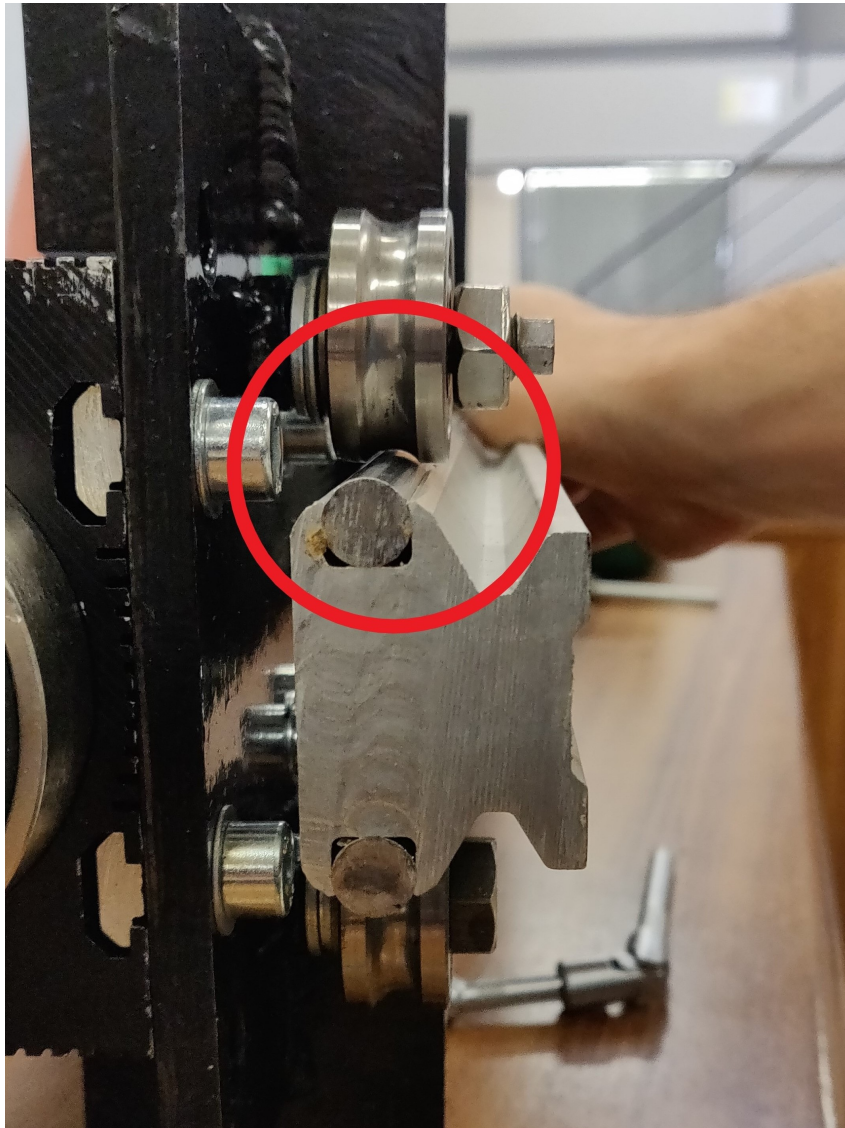


Figura 3.32: Preajuste del sistema de guiado lineal.

3.3.2. Unión bloques fijo y móvil

Con ensamblaje completo de todos de los componentes principales del bloque móvil, el siguiente proceso de montaje consistió en unir el bloque móvil del motor lineal con el resto de la estructura del excitador. El bloque móvil se debe de encontrar conectada con el bloque fijo principalmente a través de dos zonas de unión:

- El estátor se desliza sobre el vástago que permanece fijo. Dicho slider se encuentra unido al bastidor haciendo uso de dos uniones atornilladas entra cada placa testa y el extremo del vástago.
- El armazón se une a través del bloque fijo mediante el contacto de rodadura entre los rodillos y el carril guía del sistema de guiado. El excitador inercial cuenta con dos guías ubicadas en cada cara lateral del motor lineal.

A la hora de realizar el montaje del excitador inercial es importante que las trayectorias lineales de movimiento del excitador, formadas por el desplazamiento del estátor con respecto al vástago y los desplazamientos del bloque móvil con respecto a las 2 guías, estén todas ellas contenidas dentro de un mismo plano geométrico al mismo tiempo que sean paralelas entre sí . De esta forma se obtiene un movimiento suave del bloque móvil libre de restricciones de movimiento derivadas de un mal alineamiento entre los carriles y el vástago, que produciría vibraciones no deseadas y la aparición de momentos inducidos aplicados sobre la estructura. Dicha colocación de los ejes de desplazamiento requiere de un correcto posicionamiento de cada uno de los elementos en el montaje.

Durante la etapa de diseño de las piezas del excitador se decidió realizar un sobredimensionamiento del los distintos taladros pasantes de las distintas piezas metálicas del bastidor que servirían como puntos de unión para el atornillamiento en la etapa de montaje. El motivo de tal decisión reside en las altas restricciones que presentan distintas piezas en el montaje. La mayoría de piezas cuentan con multitud de puntos de unión sobre dos o más elementos distintos con un bajo grado de juego y con todos los grados de libertad restringidos. Un aumento del juego entre las uniones atornilladas elimina posible restricciones en el montaje, disminuyendo el impacto de los distintos grados de tolerancia presentes en las piezas fabricas y que de otro modo pudieran impedir el montaje.

En contrapartida, no era posible lograr un correcto alineamiento entre los carriles guía y el vástago de forma directa en el ensamblaje, sino que se desarrolló un protocolo de montaje en el que se hicieran los ajustes adecuados de las posiciones del sistema de guiado, la colocación del vástago y la rodadura de los rodamientos sobre los carriles. En la Tabla 3.1 se muestran las etapas seguidas durante el proceso de ensamblaje entre los bloques fijo y móvil del excitador inercial.

Inicialmente se colocó el bastidor sobre la superficie de trabajo en posición horizontal. Seguidamente se dejó el bloque móvil apoyado sobre el suelo, colocado entre la abertura entre los pilares del bloque fijo del excitador y con la cara lateral del motor vista desde la parte superior, dejando de forma accesible los conectores del estátor y los rodillos de cabeza excéntrica (Figura 3.33).

Tabla 3.1: Procesos del montaje entre los bloques fijo y móvil

Etapa	Descripción	Ajustes de la unión
1	Ensamblaje del vástago con el bloque móvil y el estátor	Bajo par de apriete
2	Introducción y unión de las guías	Bajo par de apriete
3	Eliminar unión entre vástago y bastidor	-
4	Ensamblaje y ajuste entre vástago y bastidor	Concentricidad y alto par de apriete
5	Ajuste de las guías sobre el bastidor	Alto par de apriete
6	Ajuste del movimiento lineal entre rodillos y guías	Control obturación y rozamiento

A continuación se realizó el montaje del vástago sobre el bastidor. El primer paso fue introducir el vástago a través de la abertura central de la testa superior. El slider cuenta con multitud de imanes en su interior, lo que le confieren propiedades ferromagnéticas. En consecuencia el vástago presenta interacciones muy fuertes de atracción ante los materiales ferrosos del bastidor o el armazón.

Para facilitar el montaje se hizo uso de unos rodamientos de bolas cuya carcasa circular de plástico coincidía en tamaño con la apertura de las testas. El slider se introdujo sobre el tubo de acero inoxidable del interior del rodamiento, de forma que el acoplamiento del vástago con respecto al bastidor fuera centrado.

Se levantó el bloque móvil a hasta que se pudiera ser atravesado en su totalidad por el vástago. Tras introducir el vástago en su totalidad se realizaría una unión atornillada entre el slider y la testa inferior mediante un tornillo M8x16 y una arandela plana. En el otro extremo del bastidor se introduciría la placa de atornillamiento, realizando las 4 uniones roscadas entre dicha placa y la testa inferior, haciendo uso de 1 tornillo M10x30, 1 tuerca M10 y 2 arandelas planas M10 por cada unión. Finalmente se atornillaría el vástago con la placa de atornillamiento utilizando solamente un tornillo M10x16. Las uniones se realizaron aplicando un bajo par de apriete, permitiendo el desplazamiento entre el eje del vástago y los orificios centrales de las testas.

Para realizar todo este proceso se necesita de al menos 3 operarios trabajando simultáneamente, habiendo una encargado para manejar el vástago desde la testa superior, otro encargado de mantener el bloque móvil suspendida a la altura necesaria para introducir el slider y un último operario para atornillar el vástago a la testa inferior. No se podía soltar el bloque móvil hasta que el vástago se encontrara perfectamente fijado al resto del bloque fijo.

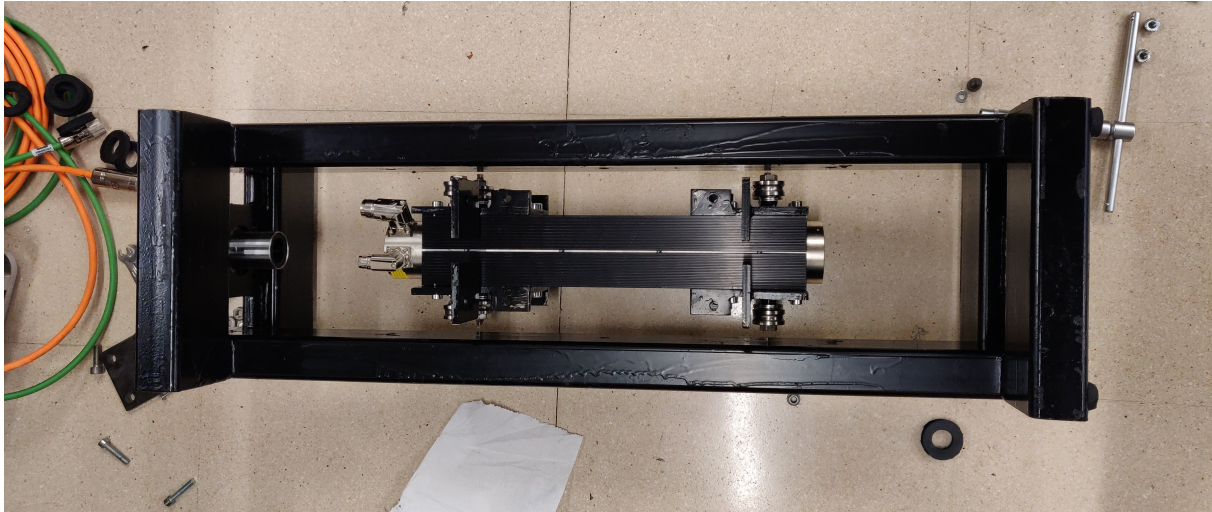


Figura 3.33: Colocación del bastidor y el bloque móvil previa al ensamblaje.

Con el slider y el resto del motor lineal restringido sobre el bastidor, se dio paso al ensamblaje de los carriles guía al bloque fijo del excitador inercial. Cada una de las 2 guías se introdujeron horizontalmente desde las aperturas laterales de la placa testa superior. Antes de realizar las uniones roscadas de los carriles sobre los pilares, estos tuvieron que ser introducidos a través de los rodillos del armazón, de forma que haya contacto de rodadura entre los rodamientos con su eje de acero correspondiente. La facilidad de acoplamiento de las guías en contacto con los rodamientos depende del ajuste previo realizado sobre el perno excéntrico de los rodillos.

Una vez introducidos ambos carriles fueron atornillados a los pilares haciendo uso de tuercas autoblocantes M8 y tornillos M8x45. De los 3 orificios que presentaba cada carril solo se atornillaron los agujeros de los extremos, colocando la cabeza del tornillo sobre la superficie de la guía y situando la tuerca sobre la cara interior del pilar. El par de apriete de las uniones no debía de ser elevado, permitiendo un desplazamiento limitado de las guías para poder alinearlas posteriormente en función de la posición final del vástago. Para realizar dicha unión fácilmente se hizo uso de una llave Allen que restringía la rotación del tornillo al mismo tiempo que se aplicaba el par de apriete sobre la tuerca mediante una llave de vaso con prolongador que se introducía sobre las aperturas $\varnothing 25$ mm de la cara exterior de los pilares.

En este punto del montaje se encontraría ya ensamblado completamente el bloque móvil del excitador sobre el bloque fijo, pero no se tendría garantizado el alineamiento de las guías con respecto al vástago, así como la correcta posición de este último sobre el bastidor. El proceso de ajuste del excitador inercial se inició desmontando las uniones entre el vástago y el slider del motor, retirando la placa porta de atornillamiento y dejando que el estátor pudiera desplazarse linealmente a través de los carriles guía. Salvo que se aplicara una fuerza relativamente elevada sobre el vástago, en esta posición el slider permanece unido de forma rígida al resto del motor, actuando como si un sólido rígido se tratase.

Tras dar por adecuados la rigidez y suavidad proporcionada por el sistema lineal de guiado, se volvió a atornillar el vástago sobre el bloque móvil, esta vez garantizando un alto grado de concentricidad entre el vástago y los orificios centrales de la testa inferior y la placa de atornillamiento en el otro extremo. De esta manera, la posición del bloque móvil se encuentra centrada sobre el bastidor, conservando la simetría del montaje. Al no estar fuertemente atornilladas a los pilares, los carriles guía se adaptan a la nueva posición del bloque móvil. Previamente al atornillamiento del vástago se tuvieron que introducir los topes de goma del sistema de fin de carrera, colocando 2 aros de caucho sobre la parte inferior del vástago y 7 topes sobre la parte superior, donde se encontraba el cabezal del estátor.

Con el ensamblaje ajustado del slider, se comprobó que el estátor pudiera desplazarse de forma suave a lo largo de todo el recorrido, comprobando que los ejes de los carriles guía estén correctamente posicionados. Para ello fue necesario aplicar la suficiente fuerza para provocar un desplazamiento relativo entre el bloque móvil y el vástago.

Comprobado el correcto posicionamiento entre el sistema de guiado y el vástago del motor se atornillaron en su totalidad las uniones roscadas entre las guías y los pilares, introduciendo adicionalmente la unión central del pilar. En esta unión la colocación del tornillo y la tuerca autoblocante es inversa, con la cabeza del tornillo introducida desde el pilar y la tuerca colocada sobre el orificio del carril.

Esta fase de montaje finalizó con el ajuste de obturación de los rodillos sobre los carriles guía del sistema de guiado. Tanto las guías como los pernos concéntricos permanecieron fijos mientras que se ajustó la posición de los rodillos excéntricos. A la hora de realizar el ajuste se ha tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si hay una obturación elevada, el rozamiento producido durante el movimiento es menor, teniendo un movimiento más suave. Sin embargo este juego entre el eje de carril y los rodillos puede provocar la presencia de elevadas vibraciones entre el bloque móvil y el resto del excitador inercial, además como la pérdida total de la rodadura en caso de una obturación excesiva.

- Si hay un ajuste de tipo apriete entre los rodillos y la guía lineal se reducen las posibles vibraciones entre los bloques fija y móvil del excitador inercial. En contrapartida un apriete excesivo puede provocar un elevado aumento de las fuerzas de rozamiento del sistema de guiado, perdiendo suavidad en el desplazamiento hasta el punto de impedir el mismo en caso de que el motor no aplicara la suficiente fuerza electromagnética.
- El posible desalineamientos entre el eje de movimiento del vástago y las guías puede provocar que el grado de obturación entre la guía y los rodillos varíe en función de la posición del estátor sobre el bastidor, pudiendo tener una unión rodamiento-guía de tipo juego con alta obturación en un extremo y un ajuste de tipo apriete en el otro.

3.3.3. Sistemas auxiliares

Tras ensamblar y ajustar el bloque móvil sobre el bastidor y el sistema de guiado del excitador inercial, este ya puede ponerse en funcionamiento. Sin embargo es preciso realzar montajes adicionales en función de los ensayos a realizar.

Adición de masa móvil

Para aumentar la carga desplazable del sistema se han montado las masas móviles de menor tamaño sobre el armazón, realizando uniones roscadas entre los dos orificios de la masa con cada uno de los agujeros pasantes de la placa soporte correspondiente a cada extremo de la masa. La adición de masas debe ser lo más distribuida y simétrica posible sobre todo el excitador inercial para obtener un comportamiento dinámico más estable. La unión está formada principalmente por un tornillo M8x16 más una tuerca hexagonal M8. Ninguno de estos dos elementos roscados están en contacto directo con la superficie de la masas, sino que siempre se introduce entre medias una arandela plana M8.

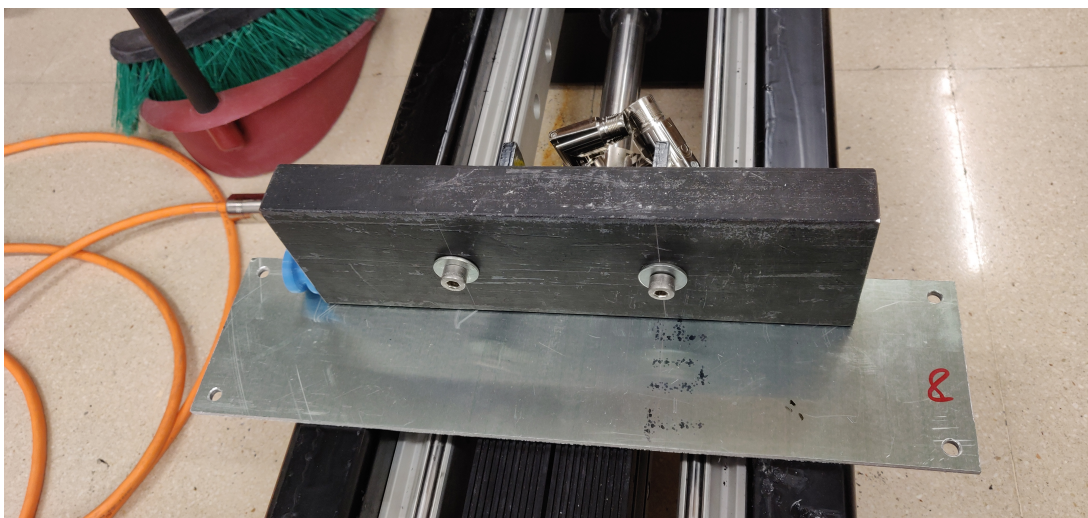


Figura 3.34: Adición de masa móvil al armazón.

A la hora de realizar el montaje se recomienda colocar el excitador en posición horizontal para facilitar el ensamblaje, poniéndolo en posición invertida para adicionar las masas colocadas en la parte posterior. Para hacer coincidir los ejes de los taladros la masa no se apoya sobre el lateral de la carcasa del motor, sino que se debe encontrar en suspensión, a 5 mm de dicha superficie. Para realizar el montaje correctamente se recomienda colocar una chapa de dicho espesor que sirva de apoyo para la masa móvil (Figura 3.29).

En caso de querer colocar una cantidad elevada de masas móviles se utilizarán varillas M8 en lugar de los tornillos. Dichas se encargarán de mantener rígidamente unidas las masas al bloque móvil del excitador, completando las uniones con tuercas M8 y siempre utilizando arandelas planas para la mejor distribución las fuerzas aplicadas sobre la superficie de las masas.

Sistema de suspensión

Se debe incluir en el sistema cada vez que se van a realizar ensayos en la posición vertical o utilizando el modo corriente. Para ello se deben roscar los soportes de gomas del sistema de suspensión sobre los orificios roscados de métrica M8 que se encuentran sobre las caras exteriores de los pilares así como en los laterales de las masas móviles que previamente se han tenido que acoplar al armazón. Por cada soporte en un orificio del pilar le corresponde un soporte colocado en el lateral de la masa móvil más cercana.

La posición de dichos soportes sobre el armazón dependen de la función a realizar. En caso de colocar el excitador inercial en posición vertical, en primer lugar se debe determinar la posición deseada del motor sobre el vástago cuando este se encuentre apagado. Determinada la altura consigna, los soportes acoplados a los pilares se deben encontrar siempre a una altura superior con respecto a la posición final que tendría el soporte asociado que se encuentra atornillado a la masa móvil cuando el motor se encontrara en la posición objetivo. El siguiente paso es unir los distintos pares de soportes vinculados con tubos de goma hasta que la fuerza proporcionada por la deformación de los elementos elásticos sitúen el estátor en un posición adecuada (Figura 3.35).



Figura 3.35: Sistema de suspensión instalado para el modo corriente.

4. Control del movimiento

Tras el prototipado del excitador inercial, el siguiente paso consistió en configurar el servo controlador que gobierna sobre el motor lineal. Para que el excitador fuera completamente operativo para la experimentación se precisó tanto de realizar el cableado completo del drive como la configuración de dicho módulo de control, haciendo uso del software LinMot-Talk 6.8. Dependiendo del modo de funcionamiento deseado del motor lineal se tuvieron que realizar diferentes configuraciones del sistema.

4.1. Lazo de control

El motor lineal P10-70x400U-BL-QJ es un actuador electromagnético que cuenta con sensor de posición interno que es capaz de medir y controlar la ubicación actual del vástago con respecto al estátor. Aplicando un sistema de control lazo cerrado haciendo uso el servo controlador se consigue que el motor sea capaz de replicar los diferentes perfiles de movimiento requeridos por el usuario, siempre que dichas acciones estén dentro de las limitaciones operacionales del aparato.

En la Figura 4.1 se muestra un diagrama simplificado del sistema de control [16, 27]. El principio básico reside en que el movimiento del motor replique las parámetros dados por la señal de referencia, que determina no solo la posición de consigna, sino que puede imponer adicionalmente unos determinados valores de velocidad y aceleración dependiendo del comando de movimiento que se esté utilizando.

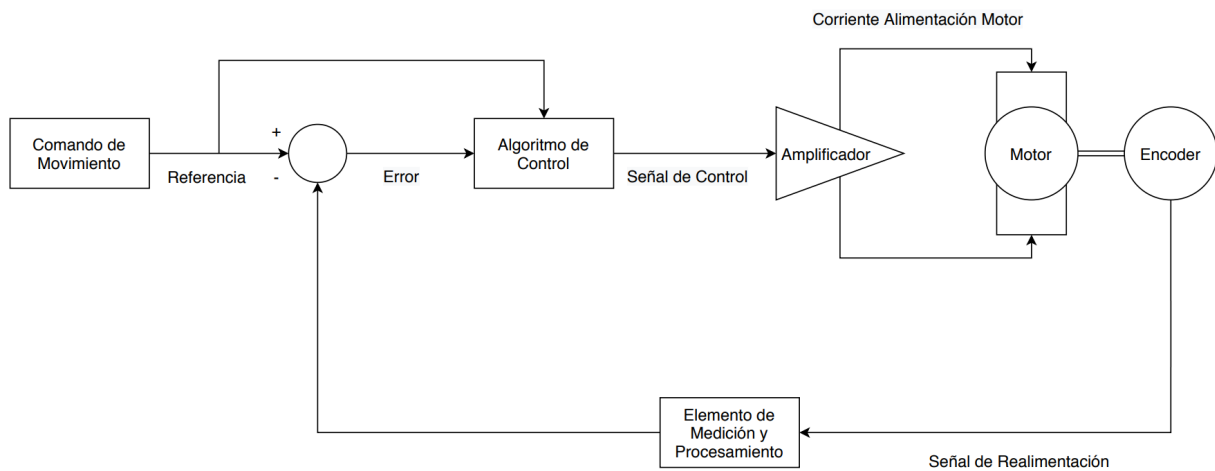


Figura 4.1: Esquema de control lazo cerrado del motor lineal.

El drive cuenta con un controlador interno PID que actúa como algoritmo de control con el objetivo de determinar, en función de la señales de consigna y error, la demanda de corriente necesaria a la salida del amplificador para alimentar el bobinado interior del estátor, generando la fuerza electromagnética necesaria para realizar el movimiento lineal deseado.

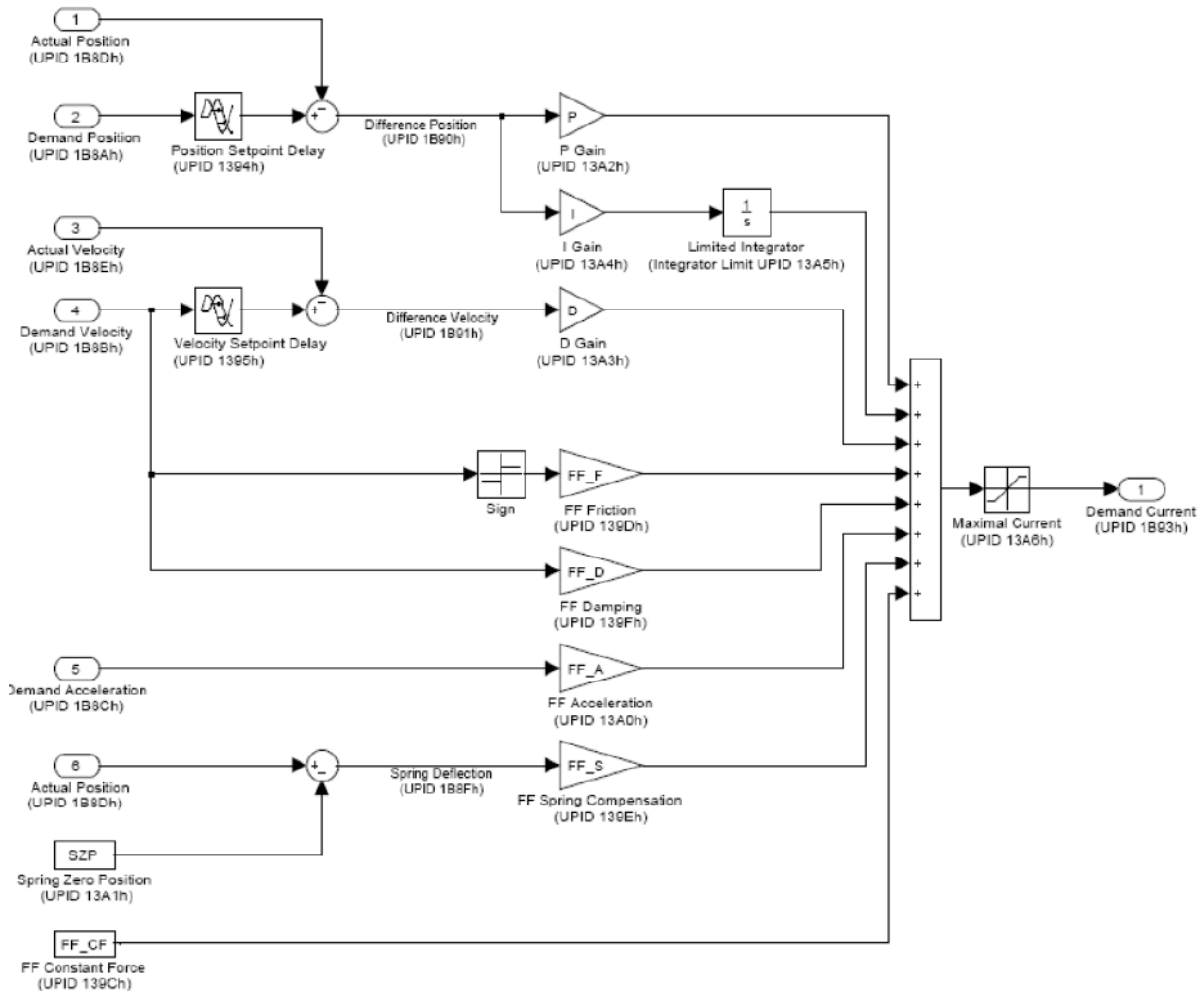


Figura 4.2: Estructura del sistema de control de posición [21]

La Figura 4.2 contiene esquemáticamente la estructura del algoritmo de control utilizado para la monitorización del motor lineal LinMot. Para determinar la corriente trifásica necesaria el módulo de control utiliza los siguientes parámetros motrices:

- Posición actual y de consigna del motor.
- Velocidad actual y de consigna del motor.
- Demanda de aceleración del motor.

Los términos proporcional e integral del PID actúan sobre la señal de error de posición del motor lineal, mientras que se utiliza la diferencia entre velocidades para determinar el término derivativo sin que para ello se tenga que derivar la señal de error de posición. El driver tiene en cuenta el retardo que poseen las señales que determinan el movimiento actual del motor con respecto a la consigna de movimiento a la hora de determinar las señales de error.

Adicionalmente el módulo de control hace uso de una serie de parámetros que actúan de pre filtros que se utilizan en el algoritmo de control para compensar perturbaciones fijas o conocidas del sistema. Los parámetros utilizados para el lazo de control son:

- FF Friction: Parámetro que compensa las fuerzas de rozamiento que se producen en el sistema mecánico. En caso del excitador inercial, este pre filtro es el encargado de neutralizar las fuerzas de rozamiento generadas en el sistema de guiado en caso de que fueran de valor conocido.
- FF Damping: Componente del algoritmo de control encargado de proporcionar la corriente de salida del PID que se encarga de compensar las fuerzas de amortiguación del sistema que se hayan determinado previamente.
- FF Acceleration: Pre filtro que neutraliza la fuerza generada al aplicar un perfil de movimiento con una determinada aceleración sobre el total de la masa desplazada del excitador inercial.
- FF Spring Compensation: Parámetro que neutraliza la fuerzas elásticas conocidas del sistema.
- FF Constand Force: Pre filtro utilizado para determinar la corriente adicional que se añade a la salida del PID con el objetivo de compensar la fuerza constante debida al peso de la masa del bloque móvil del excitador cuando este esté operando en posición vertical. El total de la masa desplazable está formada por la masa del actuador, la masa de los armazones y la masa móvil adicionada.

Tanto los términos de ganancia proporcional, integral y derivativo, así como los parámetros de control Feed-Forward pueden modificarse manualmente durante la configuración del driver del motor haciendo uso del Software LinMot-Talk (Apartado 4.3.2).

Para obtener los valores actuales del motor referentes a su posición y velocidad, el motor lineal tiene incorporado un encoder lineal seno coseno. Este dispositivo electromagnético proporciona a la salida del motor dos señales analógicas sinusoidales desfasadas 90 grados en lugar de señales de pulsos digitales propias de los encoder incrementales [3]. La ventaja de este tipo de encoder reside en las gran resolución que proporciona, gracias a que la lectura de la amplitud de las señales analógicas de salida [34].

Las señales analógicas seno y coseno poseen una amplitud de 0,5 V con un periodo equivalente a un desplazamiento de 40 mm, consiguiendo una resolución de $5 \mu\text{m}$. Ambas salidas cuentan con dos señales complementarias y de fase invertida, utilizadas para mitigar el ruido del encoder.

La velocidad y el sentido del desplazamiento se calcula a partir de las propias señales sinusoidales mientras que para determinar la posición absoluta del vástago se dispone de dos señales digitales de referencia que generan un pulso cada vez que se realiza un periodo magnético completo. Las señales seno positivo y negativo siempre se encuentran en fase con las señal trifásica U de la corriente de alimentación del estátor (Figura 4.3).

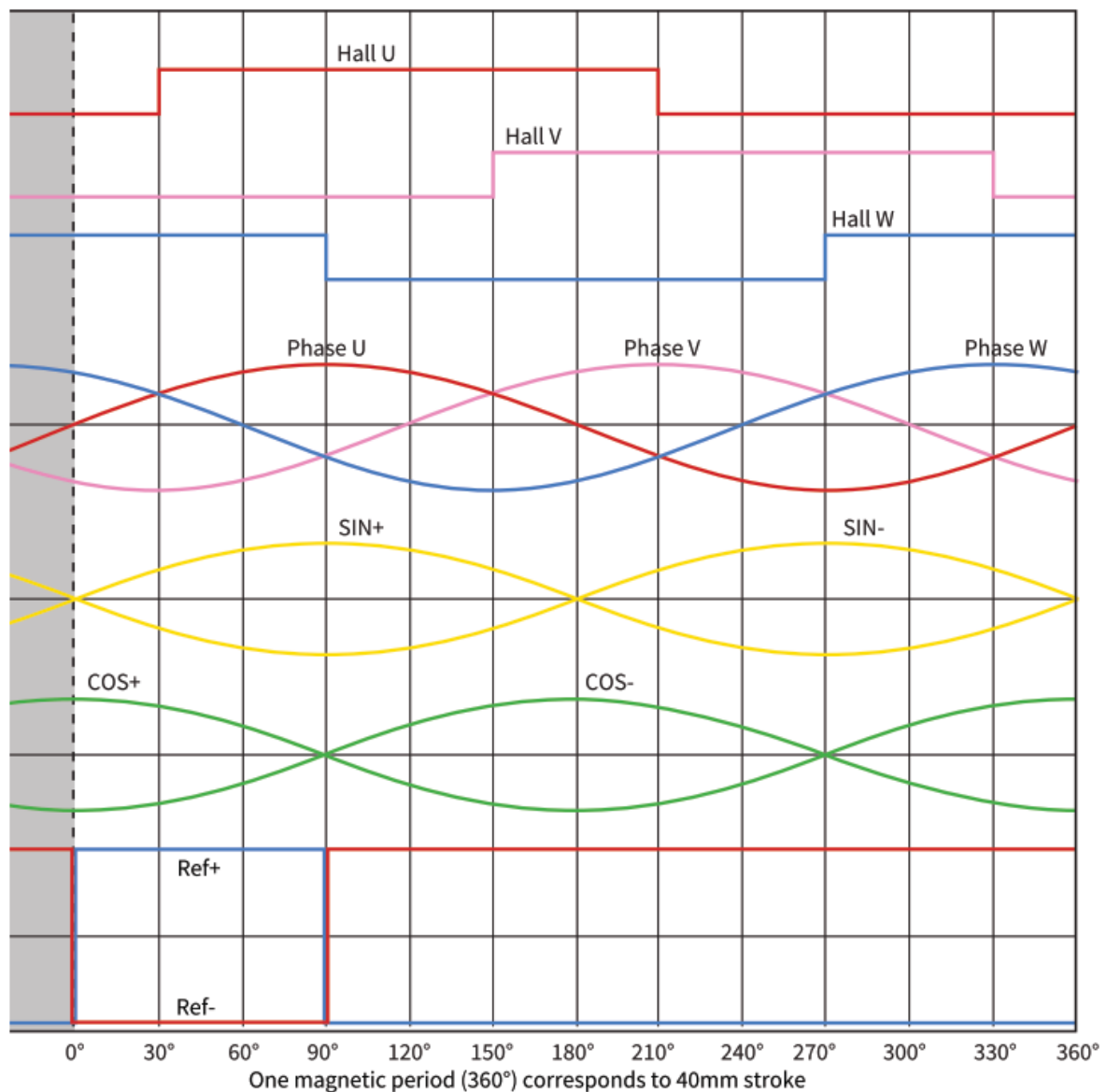


Figura 4.3: Encoder lineal seno coseno [17].

4.2. Funcionamiento del Drive

Además de contener el algoritmo de control, el servo controlador tiene la función de monitorizar el comportamiento operacional del motor. El drive debe ser capaz de controlar de forma simultánea dos interfaces de control de movimiento del motor lineal:

- Estado máquina: El funcionamiento del motor lineal está regido por un modelo de comportamiento mediante máquina de estados. En función de la señales o palabra de entrada (Control Word) y el estado anterior de funcionamiento, el eje del motor se encontrará en una situación operativo distinta. Movimiento habilitado (Operation Enabled) o generación del sistema de referencia (Homing) son ejemplos de los estados en el que el motor puede encontrarse. En ningún caso el estado máquina gobierna sobre el perfil de movimiento a realizar.
- Interfaz de comando de movimiento: Encargada de transmitir las órdenes del usuario con respecto al tipo de movimiento dinámico ha realizar por parte del motor. La interfaz cuenta con un interpretador de comandos que traduce las ordenes en la señal de consigna de entrada al lazo de control. El drive de control cuenta con centenares de comandos de movimiento disponibles, la mayoría están asociados a un tipo determinado de desplazamiento con características dinámicas diferentes.

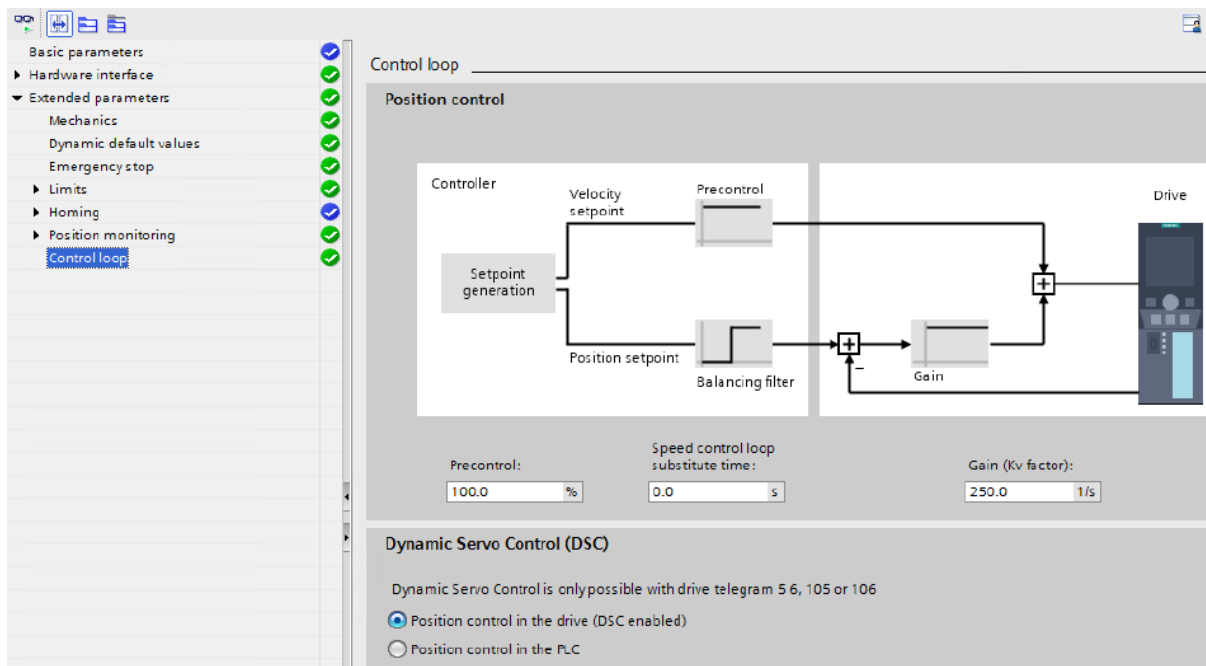


Figura 4.4: Control del movimiento mediante PLC [24].

Ambas interfaces pueden gobernarse vía software, que a su vez sirve de comunicación con sistemas de control de nivel superior, distinguiendo dos tipos de funcionamiento:

- **Control a tiempo real:** Se genera un relación Maestro-Esclavo con un autómata programable u otro dispositivo que es capaz de monitorizar el motor a través de un bus serial, pudiendo enviar y recibir datos con el servo controlador [11]. Desde el software del propio PLC se puede configurar el estado máquina del motor así como generar comandos de movimiento (Figura 4.4). Este tipo de control permite al driver poder actuar de forma coordinada con otros dispositivos.
- **Monitorización, testeo y simulación:** Mediante el uso del software LiMot-Talk (Figura 4.5) se puede acceder a todas las funcionalidades y configuraciones del servo controlador. Este programa permite configurar el funcionamiento del motor lineal, pudiendo generar secuencias de programa con diversos modos de funcionamiento que quedan almacenadas en la memoria interna del drive. Adicionalmente es posible realizar un control manual que permite modificar el valor de las entradas del driver e imponer ciertos estados máquina para simular el comportamiento del motor bajo ciertas situaciones. Si bien es posible comunicarse con otros dispositivos a través de las entradas y salidas del módulo de control, así como sincronizarse con otros motores lineales LinMot a través del Master Encoder, no es posible modificar la secuencia de programa externamente.

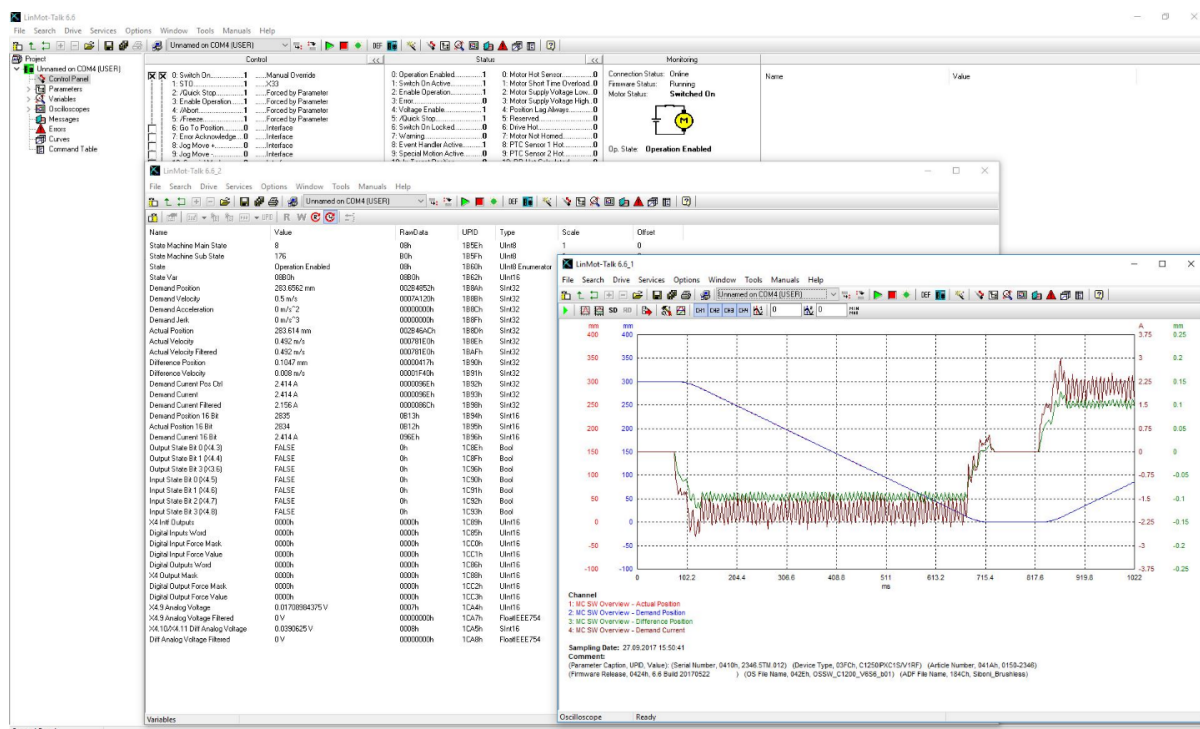


Figura 4.5: Software de configuración del drive LinMotTalk 6 [22].

En la Figura 4.6 se muestra un diagrama simplificado del control del motor. Desde un PLC o mediante el software de configuración del servo controlador, se envían la palabra de entrada a la máquina de control de estados así como al mismo tiempo se selecciona y se realiza un registro de comandos de movimiento que son posteriormente interpretados por el driver. De forma simultánea el servo controlador envía información al usuario sobre el estado máquina, a través de la palabra de estado (Status Word), información sobre el movimiento realizado por el motor lineal, por medio de un registro de la respuesta dinámica.

Ante la aparición de eventos, puede haber una modificación en el registro de los comandos a realizar. Dicho evento es notificando a través de la modificaciones pertinentes de la palabra estado que recibe el usuario proveniente del módulo de control del motor.

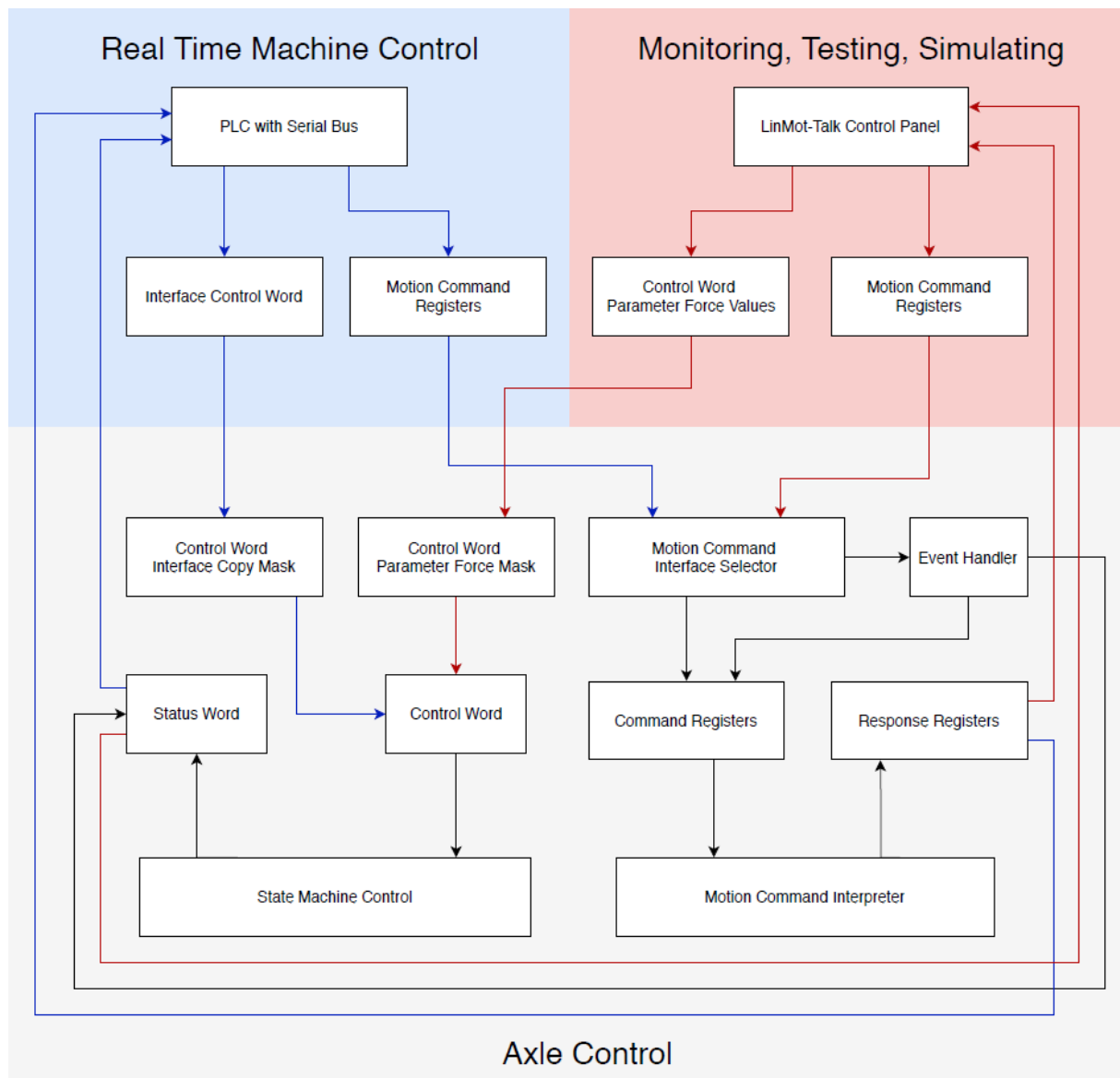


Figura 4.6: Diagrama de control de movimiento del motor [23].

4.2.1. Estado máquina

En la Figura 4.7 se muestra el diagrama de estados del motor lineal. Desde el estado 0 (Not Ready to Switch On) hasta el estado 8 (Operation Enabled) los estados se encuentran relativamente concatenados, de forma que el motor no puede volver directamente de un estado al anterior. En cambio los estados 9-20 corresponden a determinados fenómenos o acciones que pueden producirse mientras el motor se encuentra realizando alguna operación de desplazamiento, pudiendo transitar del estado 8 a cualquiera de los otros estados siguientes y viceversa. Se observa que el estado 7 no se encuentra definido.

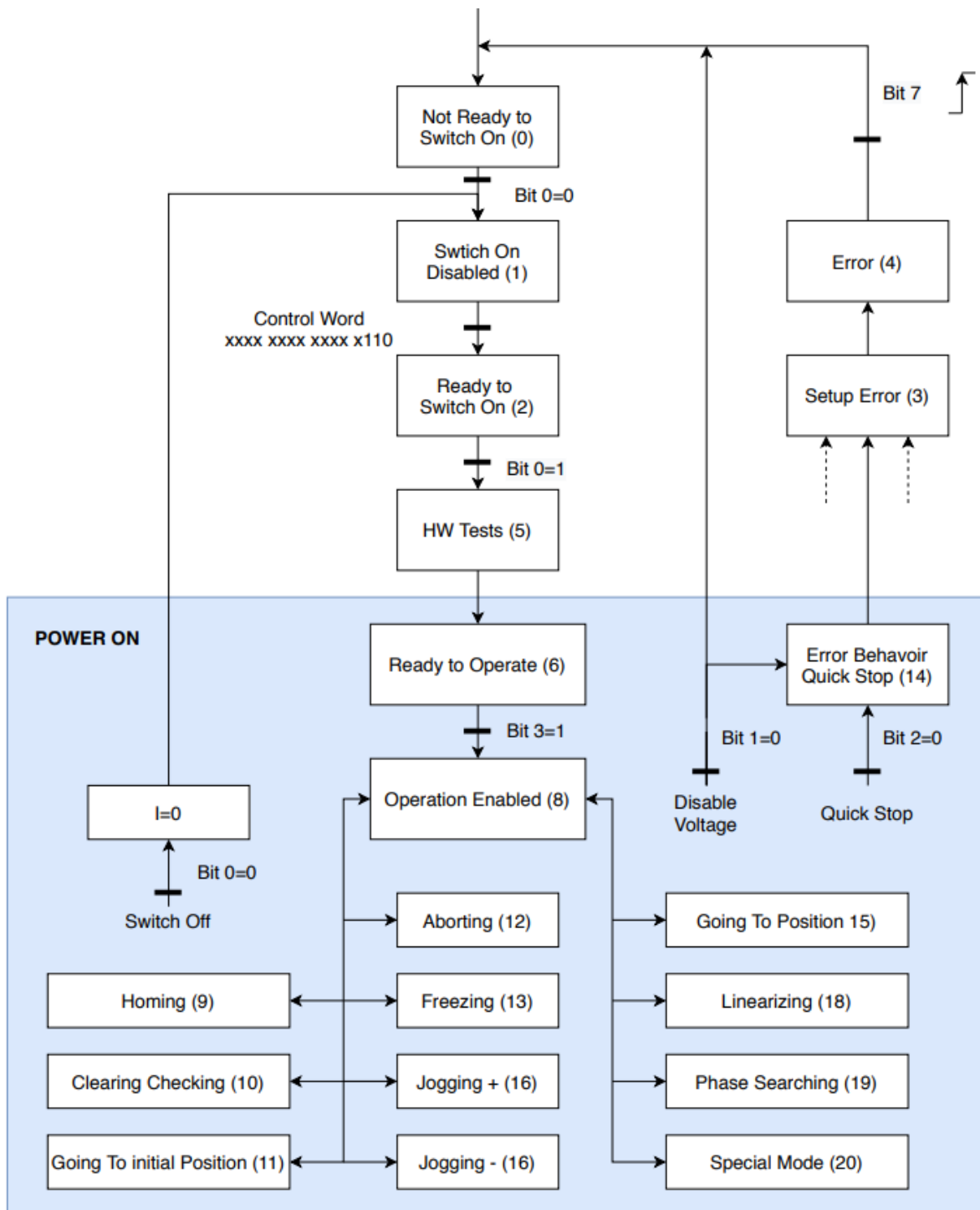


Figura 4.7: Estados máquina del excitador inercial [15].

El estado máquina se puede monitorizar por un autómata programable con un bus de campo incorporado a través de la palabra StateVar, una cadena de 16 bits (Tabla 4.1) que se divide en 2 secciones:

- Main State: Sección correspondiente a los 8 bits de orden más alto y que contiene la información acerca del estado actual en el que se encuentra el motor.
- Sub State: Corresponde a los 8 bits de menor orden y contiene información adicional vinculada al estado principal.

Tabla 4.1: State Var [23].

Main State								Sub State							
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

En función del valor del Main State podemos distinguir todos los siguientes estados:

- State 00 Not Ready To Switch On: Estado en el que el motor lineal se encuentra apagado, tanto el actuador como el driver, pudiendo solo transicionar al estado 1 cuando el bit 0 de la palabra de control pase a tener valor 0. Mediante este procedimiento se evita posibles auto encendidos del motor en caso de que todos los demás bit del Control Word para el arranque sean correctos. El valor del Sub State es siempre de valor 0.
- State 01 Switch On Disabled: El excitador permanece en el estado de encendido deshabilitado hasta que los bits 1 y 2 de la palabra de control, correspondientes a la habilitación de voltaje y la parada rápida, tengan ambos valor 1. En este estado valor del Sub State es siempre de valor 0.
- State 02 Ready To Switch On: En este estado el motor se encuentra listo para el encendido, y solo podrá pasar al siguiente estado si el bit 0 de Control Word pasa a 1, indicando que se ordena el encendido del mismo. El valor del Sub State es siempre de valor 0.
- State 03 Setup Error State: En caso de aparición de un error durante el funcionamiento el motor pasa a este estado, y permanecerá en él hasta que el bit 0 de la palabra de control pase a tener valor 0, indicando la orden de apagado. En este estado el Sub State carga el código correspondiente al tipo de error producido.
- State 04 Error: En caso de tener un error reconocido el motor lineal podrá salir de este estado por medio de un salto a nivel alto del bit 7 ‘Error ‘Acknowledge’ de la palabra de control. En caso de error fatal el motor permanece en este estado al mismo tiempo que se notifica al usuario mediante el bit 12 ‘Fatal Error’ de la palabra de estado, que pasa a tener valor 1. El problema debe de ser solucionado antes de poder reiniciar el sistema. El valor del Sub State sigue correspondiendo al código del error producido.

- **State 05 HW Test:** Estado intermedio previo al encendido del driver. Se realiza un test, de 300 ms de duración, que comprueba el estado del servo controlador. En caso de pasar el test el motor cambia al estado 6. El valor del Sub State es siempre de valor 0.
- **State 06 Ready to Operate:** El motor se encuentra encendido, bien con una demanda de corriente nula o sin la capacidad de realizar comandos de movimiento. En caso de recibir comandos de movimiento en este estado se generará el error ‘Motion command sent in wrong state’ y se pasará al estado 3. Solo se podrá transicionar al estado 8 ‘Operation Enable’ en caso de que el bit 3 de la palabra de control, correspondiente a permitir operación, posea valor 1. En caso de que en estados superiores el bit 3 del Control Word pase a 0 el motor automáticamente volverá al estado 6. Si dicho cambio de valor se produce durante un desplazamiento es posible que se genere un error, realizando entonces la transición al estado 4.
- **State 08 Operation Enabled:** Estado en el que el motor ejecuta los distintos comandos de movimiento. En dicho estado el Sub State contiene información relevante acerca del funcionamiento del motor lineal:
 - Bits 0,1,2 y 3: Se ha que comando de movimiento se encuentra activo.
 - Bit 4: Indica si hay algún evento activo
 - Bit 5: Hace referencia al bit ‘Motion Active’ de la apalabra de estado, que informa si el driver ha generado el perfil de movimiento a realizar.
 - Bit 6: Indica el valor del bit ‘In Target Position’ del Status Word. Muestra si el motor ha alcanzado la posición de consigna.
 - Bit 7: Presenta el valor del bit ‘Homed’ de la apalabra de estado, referente a si el driver ha generado el sistema de referencia para realizar el movimiento.

La localización de información referente a los comandos de movimiento y los bits mencionados de la palabra de estado en el mismo byte evita posibles problemas de inconsistencia de datos con el bus de campo. Solo se podrá cargar un un nuevo comando de movimiento cuando los 4 bits de menor orden coincidan con el último envió, al mismo tiempo que debe cumplir una de las siguientes condiciones:

- El bit 5 (Motion Active) del Sub State es 0.
 - El bit 6 (In Target Position) del propio Sub State es de valor 1 siempre y cuando el perfil de movimiento requiera posiciones exactas.
- **State 09 Homing:** Estado en el que el motor define el sistema de referencia para realizar los desplazamientos. Sub State marca el valor hexadecimal 0Fh cuando el Home ha finalizado.
 - **State 10 Clearance Check:** Secuencia normalmente vinculada al proceso de Homing, en el cual el motor se dirige a dos puntos distintos del vástago para comprobar que todo el rango de movimiento está disponible. Sub State marca el valor 0Fh cuando el Clearance Check ha finalizado.

- State 11 Going To Initial Position: Estado en el que motor lineal, tras realizar el proceso de Homing, se dirige a la posición inicial como origen del sistema de referencia. Tras la aparición de un error se recomienda siempre desplazar el motor de vuelta a la posición inicial. Sub State marca el valor 0Fh cuando se ha alcanzado la posición inicial.
- State 12 Aborting: El motor realiza una parada rápida, bloqueando el desplazamiento. El motor permanecerá inmóvil hasta que se vaya a ejecutar un nuevo comando de movimiento.
- State 13 Freezing: Estado es similar al anterior con la salvedad de que el motor es capaz de retomar el movimiento que realizaba en el momento de la parada. En determinadas circunstancias no será posible retomar el perfil de movimiento en caso de que el motor se encuentre en ciertos modos de funcionamiento tales como Time Curve (Apartado 4.2.2).
- State 14 Error Behaviour Quick Stop: Estado en el que debido a un error el motor realiza una parada rápida, interrumpiendo desplazamiento. Después de finalizar la parada, el driver desactiva el control de posición.
- State 15 Going To Position: Estado en el que el motor se desplaza hacia la posición de consigna. Un ejemplo de este estado es aquel en el cual el motor realiza un desplazamiento hacia la posición inicial tras un error. Sub State marca el valor hexadecimal 0Fh cuando se ha alcanzado la posición consigna.
- State 16 Jogging +: El servomotor se ejecuta un cierto incremento de posición o se desplaza hacia la posición máxima con una velocidad limitada. Sub State marca el valor 01h cuando el movimiento es positivo y 0Fh cuando se ha finalizado el movimiento.
- State 17 Jogging -: El servomotor ejecuta un cierto decremento de posición o se desplaza hacia la posición mínima con una velocidad limitada. Sub State marca el valor 01h cuando el movimiento es negativo y 0Fh cuando se ha finalizado el movimiento.
- State 18 Linearizing: Estado en el que el motor corrige los parámetros de la señal realimentación, mejorando la linealidad de dicha señal.
- State 19 Phase Searching: Estado en el que se pueden ejecutar movimientos de Phase Searching los cuales determinan el offset de los sensores del encoder de posición del motor.
- State 20 Special Mode: Estado en el que el motor permite el uso del modo corriente.

Para controlar el estado de la máquina el servo controlador se comunica con el usuario o sistema de control a través de las palabras de intercambio. Cada palabra está formada por 16 bits, y a su vez cada bit corresponde a un variable bipolar asociada a una determinada función o parámetro del motor lineal.

En total el módulo de control hace uso de 3 palabras de intercambio: La palabra de control (Control Word), palabra de estado (Status Word) y la palabra de alarma (Warn Word). Hay que tener en cuenta que cada palabra no puede administrar más de 16 variables booleanas, lo que condiciona la cantidad máxima de información que se puede transmitir por cada palabra entre el usuario o sistema de supervisión y el motor lineal.

Control Word

Palabra que utiliza el usuario o sistema de control para gobernar sobre el estado máquina del motor, pudiendo modificar aquel estado en el que se encuentra el dispositivo. Cada bit de la palabra de control corresponden a la siguientes variables booleanas:

- Bit 0 Switch On: El valor 1 de este bit de control habilita el encendido del motor lineal.
- Bit 1 Voltage Enable: Permite la entrada de voltaje que alimenta al microcontrolador del drive. Con el bit en valor 0 el motor permanece apagado.
- Bit 2 Quick Stop: Si el bit tiene valor 0 se produce una parada rápida, cortando la corriente del motor lineal.
- Bit 3 Enable Operation: Habilita, en caso de tener el bit en valor 1, que el controlador de posición pueda ejecutar los comandos de movimiento.
- Bit 4 Abort: En caso de valor 0 se realiza una parada rápida, anulando el comando de movimiento.
- Bit 5 Freeze : En caso de valor 0 se realiza una parada rápida, pero manteniendo el comando de movimiento en vigor.
- Bit 6 Go To Position: Con valor 1 el motor lineal entra en el estado 15 y se dirige a la posición de consigna. Al finalizar la maniobra el bit de control vuelve al valor 0.
- Bit 7 Error Acknowledge: Un salto del valor del bit a nivel alto determina que se ha reconocido el origen del error abandonar el estado 4.
- Bit 8 Jog Move +: Un valor positivo del bit indica desplazamiento incremental del motor.
- Bit 9 Jog Move -: Un valor positivo del bit indica desplazamiento decremental del motor.
- Bit 10 Special Mode: El valor positivo del bit habilita el modo corriente en el motor lineal.
- Bit 11 Home: Un valor positivo del bit inicia el proceso de de generación del sistema de referencia, manteniendo el valor hasta que el proceso de Homing sea completado.
- Bit 12 Clearance Check: Un salto de valor a nivel alto del bit inicia el proceso a ejecutar en el estado 10.

- Bit 13 Go To Initial Position: Un salto a nivel alto del valor del bit habilita el estado 15, permitiendo el motor desplazarse a la posición consigna.
- Bit 14 Linearizing: El valor positivo del bit habilita el estado 18.
- Bit 15 Phase Search: El valor 1 del bit habilita el estado 19, permitiendo ejecutar los movimientos de Phase Searching.

La modificación de los valores de los bits de la palabra de control por parte del sistema de control de orden superior se realiza por medio de la aplicación de una máscara de bits. Se aplica un filtro tipo Copy Mask, que permite adoptar los bits de la palabra proporcionada por el bus de campo mediante el uso de operaciones lógicas tipo AND y OR, modificando el valor de los bits deseados de la palabra de control que se envía posteriormente al drive. A la hora de realizar comprobaciones el software LinMot-Talk cuenta con un filtro tipo Force Mask, el cual sobrescribe el valor de aquellos bits que se deseen, e impide que puedan modificar su valor en ningún momento. Dicha herramienta está diseñada para realizar test, así como herramienta de depuración o debugging.

Status Word

Palabra que transmite el servo motor al exterior para informar del funcionamiento del mismo en función del estado máquina en el que se encuentra. Cada bit de la palabra de estado corresponden a la siguientes variables booleanas:

- Bit 0 Operation Enabled: El valor positivo del bit muestra que el motor se encuentra ejecutando las operaciones de movimiento, indicando que el motor en el estado máquina 8 o superior.
- Bit 1 Switch On Active: Indica si el encendido del motor está habilitado. El valor del bit es el mismo al bit 0 de la palabra de control.
- Bit 2 Enable Operation: Muestra si están habilitadas las operaciones de movimiento. El valor del bit es el mismo al bit 3 de la palabra de control.
- Bit 3 Error: Valor positivo mientras haya un error en el motor. El error se puede resetear a partir del bit 7 de la palabra de estado
- Bit 4 Voltage Enable: Indica si el motor recibe el voltaje requerido. El valor del bit es el mismo al bit 1 de la palabra de control.
- Bit 5 Quick Stop: Bit que señala si el motor se encuentra bloqueado. El valor del bit es el mismo al bit 2 de la palabra de control.
- Bit 6 Switch On Locked: El valor del bit es positivo si el encendido del motor está bloqueado. Dicho encendido se puede habilitar a través del valor negativo del bit 0 de la palabra de control.
- Bit 7 Warning: El valor positivo del bit señala que hay aviso de alarma del motor. En ese caso la palabra de alarma tiene al menos un bit de valor 1.

- Bit 8 Event Handler Active: El valor 1 de este bit indica que hay un evento activo, pasando al valor negativo al finalizarse.
- Bit 9 Special Motion Active: Bit que pasa a tener un valor positivo en caso de que el motor ejecute algún comando especial, como podría ser el Homing.
- Bit 10 In Target Position: Bit que señala con valor 1 que el motor se encuentra en la posición de consigna tras ejecutar el movimiento.
- Bit 11 Homed: Bit cuyo valor positivo expone que el motor posee el sistema de referencia definido.
- Bit 12 Fatal Error: En caso de error fatal no reseteable se pone a 1 el valor del bit.
- Bit 13 Motion Active: El valor 1 del bit informa que el driver ha generado el perfil de movimiento a realizar.
- Bit 14 Range Indicator 1: En caso de realizar una supervisión sobre un determinado parámetro único de 16 bits del driver (UPID), el bit alcanzará el valor positivo del bit en caso de que dicho parámetro se encuentra dentro del rango 1.
- Bit 15 Range Indicator 2: Similar al bit anterior con la diferencia de que se utiliza un rango distinto.

Warn Word

Palabra que se transmite desde el motor lineal y que da aviso al sistema de control de posibles errores o valores anómalos relacionados con el funcionamiento o integridad del motor, con relativa independencia del estado máquina en el que se encuentre. En condiciones normales de funcionamiento del motor lineal, la palabra de alarma posee todos sus bits en valor negativo. Un bit en valor 1 funciona como una alarma que se transmite al usuario, señalando el origen de la misma en función de la posición de dicho bit. Cada bit, en valor positivo, de la palabra de alarma corresponden a la siguientes variables booleanas:

- Bit 0 Motor Hot Sensor: El sensor del motor detecta una temperatura muy elevada.
- Bit 1 Motor Short Time Overload I^{2t} : La temperatura calculada del motor sobrepasa el límite de seguridad.
- Bit 2 Motor Supply Voltage Low: El voltaje que alimenta el motor es insuficiente.
- Bit 3 Motor Supply Voltage High: EL valor del voltaje que alimenta el motor demasiado elevado.
- Bit 4 Position Lag Always: El error de posición sobrepasa el rango estipulado.
- Bit 5 Reserved: Ninguna función en especificada.
- Bit 6 Drive Hot: La temperatura del servo controlador es demasiado elevada.

- Bit 7 Motor Not Homed: El motor no tiene el sistema de referencia definido.
- Bit 8 PTC Sensor 1 Hot: El termistor 1 colocado en el interior del motor ha detectado que la temperatura es muy elevada.
- Bit 9 PTC Sensor 2 Hot: El termistor 2 colocado en el interior del motor ha detectado que la temperatura es muy elevada.
- Bit 10 RR Hot Calculated: Se ha calculado que la temperatura del regenerador resistivo del motor lineal, encargado de frenar el movimiento del mismo, es muy elevada
- Bit 11 Speed Lag Always: El error de velocidad sobrepasa el rango estipulado.
- Bit 12 Position Sensor: No se está recibiendo la señal de realimentación de posición.
- Bit 13 Reserved: Ninguna función en especificada.
- Bit 14 Interface Warn Flag: Funcionamiento incorrecto de la interfaz del sistema.
- Bit 15 Application Warn Flag: Mal funcionamiento de la aplicación del sistema.

4.2.2. Interfaz de comandos de movimiento

Para que el motor pueda realizar el movimiento deseado, el drive de control debe de poder de comunicarse con el usuario a través del la interfaz de movimiento. El tipo y características de desplazamiento a realizar por el motor, así como las condiciones necesarias para iniciar su ejecución, viene definidas en el comando de movimiento. En la Tabla 4.2 se observa como se almacena un comando de movimiento digitalmente.

El comando de movimiento está definido por el Command ID, una palabra de 16 bits que contiene la información acerca del modo de desplazamiento seleccionado, además de hasta un máximo de otras 15 palabras adicionales de 16 bits, las cuales almacenan los parámetros de comando o ‘Command Parameter’, que condicionan la naturaleza del movimiento, como podrá tratarse de la posición final, la velocidad máxima o la aceleración.

Tabla 4.2: Comando de movimiento [15].

Word	Descripción	Ejemplo de comando\parámetro
1	Command ID	VAI 16 bit Go To Absolute Position
2	Parámetro 1	Posición final
3	Parámetro 2	Velocidad máxima
4	Parámetro 3	Valor aceleración
5	Parámetro 4	Valor deceleración
6-16	Parámetros 6-16	No usado

En función del comando de movimiento aplicado, el módulo de control, con la ayuda del interpretador de comandos, determina tanto las señales de consigna a la entrada del lazo de control como el tipo de algoritmo de control del sistema, obteniendo perfiles de movimiento muy diferentes en función del comando de movimiento escogido.

Tabla 4.3: Bits del Command ID [15].

Master ID								Sub ID				Command Count			
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

El Command ID es el componente principal del comando de movimiento y que determina la naturaleza y condicionalidad del desplazamiento. La palabra del Command ID (Tabla 4.3) se divide a su vez en 3 secciones:

- Master ID: Sección de 8 bits que especifica el grupo principal del comando.
- Sub ID: Sección de 4 bits identifica el comando seleccionado dentro del mismo grupo principal de comandos.
- Command Count: Sección de 4 bits cuyo cambio de valor es el que permite al sistema realizar el siguiente comando de movimiento.

En función de los diferentes Command ID, el controlador E1450-EC-QN-1S cuenta con un total de más de 200 comandos de movimiento distintos. La mayoría de comandos de movimiento está asociado a un determinado tipo de desplazamiento, si bien el módulo de control cuenta con comandos que actúan como sentencias de programa, aplicando funciones como ‘Wait’, ‘Write’ o ‘If’. Dichos comandos de movimiento no determinan un perfil de desplazamiento particular pero que son de gran utilidad la hora de poder ejecutar secuencias de programa complejas, haciendo uso del modo Table Command.

En cuanto al modo de desplazamiento, la gran mayoría de comandos de movimiento se pueden agrupar en la siguientes modos de funcionamiento [25]:

- Desplazamiento mediante interpolador VA: Dado el punto de partida y la posición final de consigna, el módulo de control genera los puntos de la curva de desplazamiento discreto aplicando métodos de interpolación. Además de los puntos inicial y final, el algoritmo de control utiliza como condiciones de contorno la velocidad máxima permitida y los valores de aceleración de desaceleración. Hay que tener en cuenta que con este método de generación de setpoints la variación de la velocidad en función del tiempo es lineal, mientras que en el caso de la aceleración solo puede tomar 3 valores: Aceleración máxima, deceleración máxima y aceleración nula (Figura 4.8).

Algunos servo drive LinMot cuentan con un interpolador VAJ (Velocidad-Aceleración-Jerk), el cual permite movimientos con incrementos variables de la velocidad en función del tiempo, así como aplicar un rango de aceleraciones cuya variación en el tiempo es lineal, de forma similar a la velocidad en caso del interpolador VA.

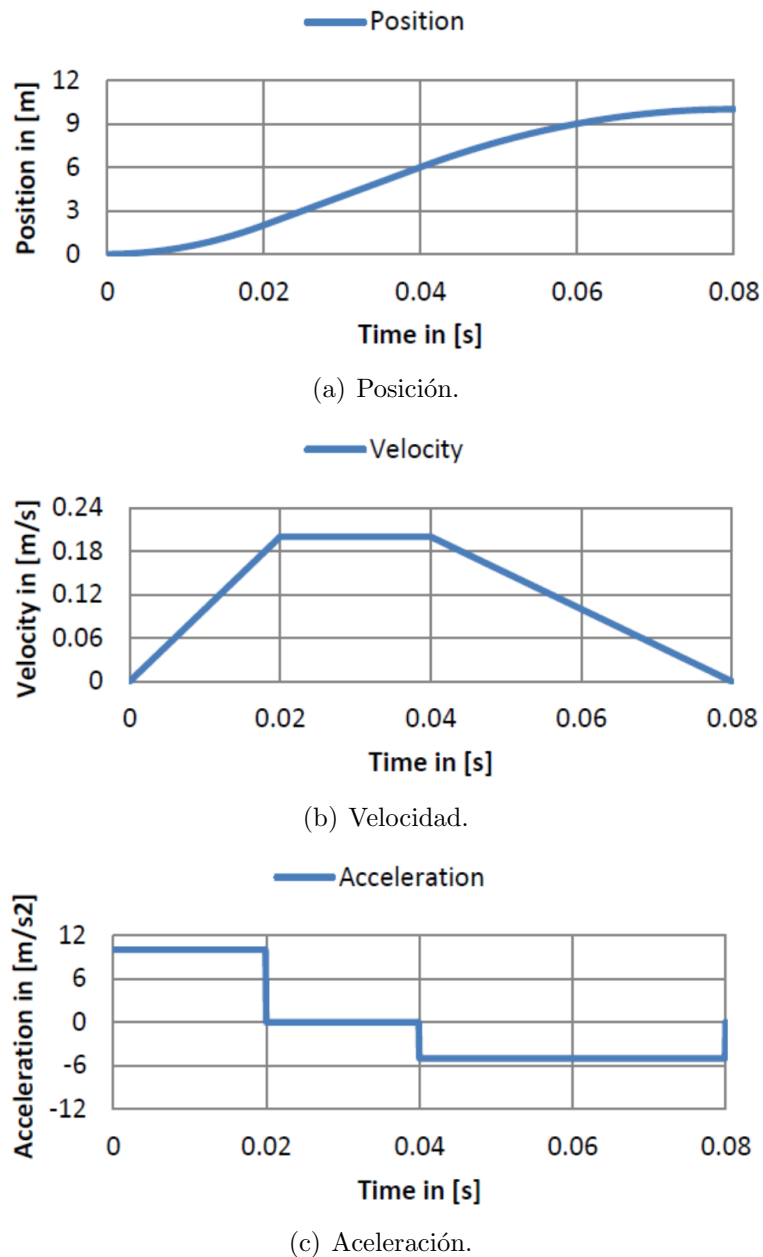
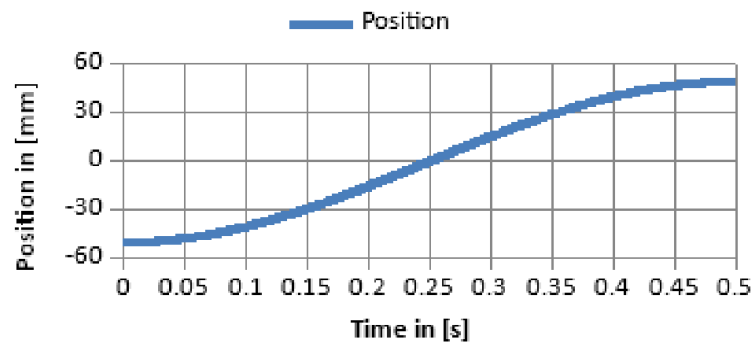


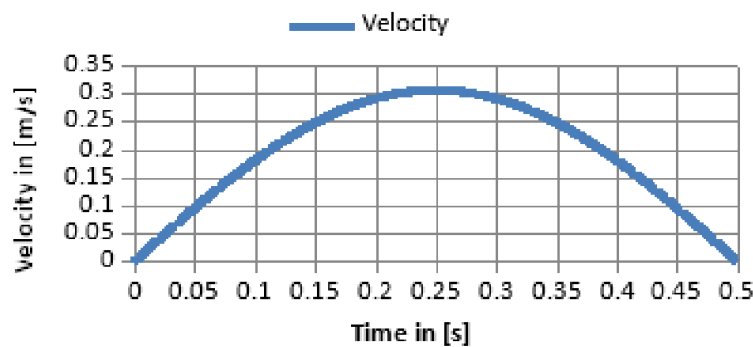
Figura 4.8: Desplazamiento mediante interpolador VA [23].

- Modo analógico: En este modo de funcionamiento la posición de consigna viene dada por una señal analógica externa que se conecta al controlador. La señal analógica tiene un rango de valores entre 0-10 V o ± 10 dependiendo de la configuración escogida, siendo el punto de consigna con respecto al rango de movimiento habilitado proporcional a la tensión de dicha señal. En este modo de funcionamiento hay que tener en cuenta que, debido a la tensión de la señal analógica introducida puede ser variable en el tiempo, como en el caso de introducir una señal sinusoidal, la posición de consigna del desplazamiento también se vuelve variable, generando un desplazamiento continuo. A la hora de realizar dicho desplazamiento, el método de cálculo de la curva de movimiento es mediante interpolación VA, lo que implica ciertas limitaciones en cuanto a las prestaciones de velocidad y aceleración.

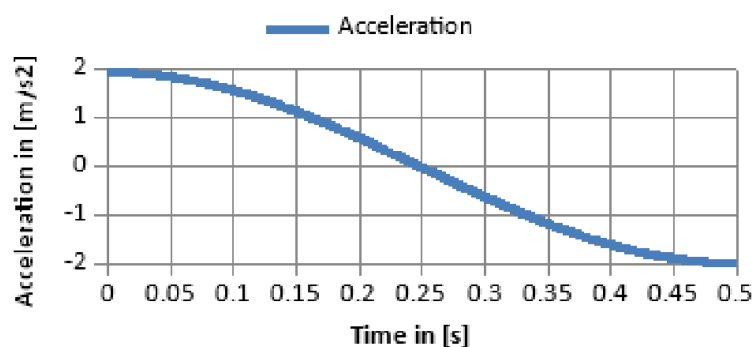
- Modo curva: Este modo de funcionamiento permite al motor realizar ciertas curvas de movimiento generadas por el usuario para que puedan cumplir con ciertas características dinámicas. Las curvas de posición son generadas desde el software del drive, definiendo los puntos consigna en función del tiempo y el método de cálculo de la curva, pudiendo escoger entre interpolación VA, curva sinusoidal, curva de mínimo jerk y curva de jerk limitado. Adicionalmente en este modo de funcionamiento es posible importar un perfil de movimiento desde un archivo CSV (Excel).



(a) Posición.



(b) Velocidad.



(c) Aceleración.

Figura 4.9: Modo curva sinusoidal [23].

Al seleccionar el movimiento sinusoidal, las curvas de velocidad y aceleración obtenidas presentan un perfil de senoide, desfasadas 180 y 360 grados respectivamente con respecto al movimiento, y limitadas por los rangos de velocidad, aceleración y desaceleración máximas (Figura 4.9).

Por lo general el modo curva es utilizado para realizar desplazamientos discretos con puntos de inicio y fin, que corresponden al modo de funcionamiento específico ‘Time Curve’. En caso de realizar desplazamientos continuos, como podría ser el caso de un movimiento sinusoidal periódico, corresponde al modo de funcionamiento específico ‘Continuous Curve’.

- Position Indexing: Modo de funcionamiento donde el motor realiza desplazamientos incrementales en función de dos señales digitales de entrada. La primera señal digital determina el sentido del desplazamiento, mientras que la segunda señal determina el instante de inicio del desplazamiento incremental mediante saltos a nivel alto. Adicionalmente hay que definir la resolución del incremento de desplazamiento, así como las velocidades y aceleraciones máximas.

Atendiendo a la activación de los comandos de movimiento, los desplazamientos pueden ejecutarse de forma inmediata en cuanto el motor lineal se encuentre en un estado máquina que permita la habilitación de las operaciones, o por el contrario el comando de movimiento empezará a ejecutarse solo en el momento de que una señal digital de entrada al módulo de control tenga cierto valor, ya sea positivo o negativo. Este método de activación corresponde a los comandos de movimiento con la especificación ‘Triggered’, cuya activación debe ser asociada a una determinada entrada digital del conector IO X4 del drive [18]. Al mismo tiempo la especificación ‘Triggered’ puede presentar las siguientes adiciones:

- Rise Event: El comando de movimiento se ejecuta cuando haya un salto a nivel alto de la señal de entrada.
- Fall Event: El comando de movimiento se ejecuta cuando haya un salto a nivel bajo de la señal de entrada.

La aplicación conjunta del Rise Event y el Fall Event permite realizar secuencias de movimiento en las que el perfil de desplazamiento de ida difiere completamente del perfil de desplazamiento de retorno.

Es necesario que el usuario conozca la formulación de los comandos de movimiento del motor en caso de querer que el motor replique un comando en específico, haciendo uso de la interfaz de comandos, o programar secuencias complejas de movimiento, a través de la tabla de comandos. Para la mayoría de funcionalidades del motor lineal, se puede realizar una configuración completa del desplazamiento del motor sin necesidad de utilizar los comandos de movimiento de forma directa, a través de la sección de parámetros del software LinMot Talk, principalmente a partir del directorio ‘Run Mode’.

4.3. Configuración del Drive

La configuración del movimiento del motor se inició con el cableado del servo controlador y el motor lineal. Seguidamente se realiza una conexión entre el drive y el PC, el cuál contiene el software LinMot-Talk 6.8, que permite configurar el funcionamiento completo del drive, modificando tanto los parámetros del lazo de control, como del estado máquina y la interfaz de comandos de movimiento. En función del tipo de funcionamiento a replicar por el motor se realizaron distintas configuraciones de los comandos, destacando 4 estructuras: Modo analógico, modo corriente, modo sinusoidal y modo tabla de comandos.

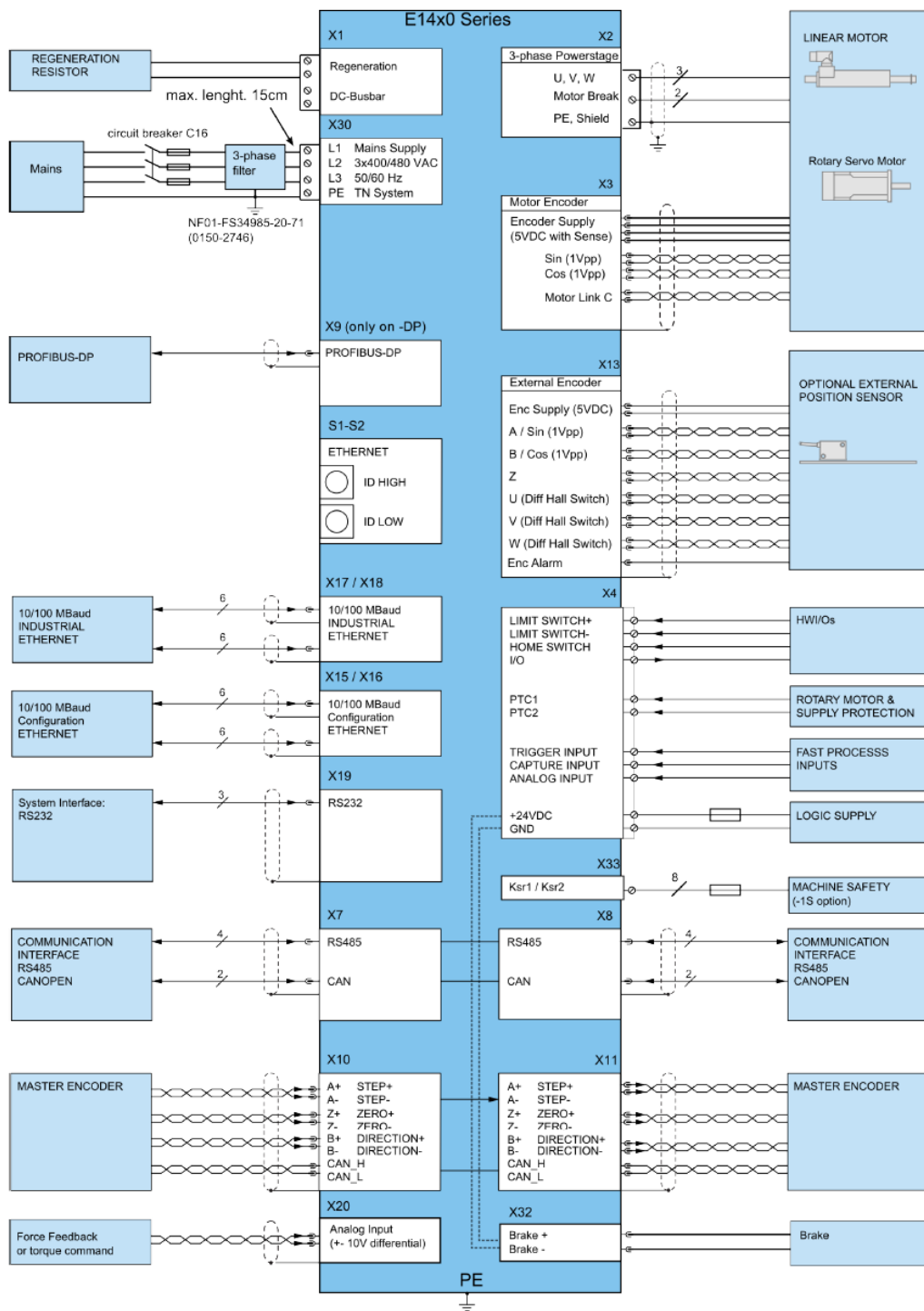


Figura 4.10: Conexiones del controlador E1400 [18].

4.3.1. Conexiones del Drive

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestra los diferentes puertos de conexión que presenta el drive modelo E1450-EC-QN-1S. Para el cableado final del excitador inercial se han utilizado las siguientes conexiones:

- Entrada X19 Config R232: Conector que permite al drive comunicarse con un PC, gracias al uso de una interfaz de comunicación RS-232 y un cable Ethernet con adaptador tipo USB.
- Salida X2 Motor Phases: Punto de conexión en la cual el driver transmite la corriente trifásica que alimenta al motor lineal, utilizando para ello el cable naranja que se incluyen en el motor LinMot P10-70X400U-BL-QJ.
- Entrada X20 Analogic IN: En esta entrada se inserta el conector BNC proveniente de la tarjeta de adquisición de datos. A través de dicha conexión el servo controlador recibe la señal analógica $\pm 10V$ que sirve como señal de consigna para el modo analógico.
- Entrada X3 Motor Encoder: Conexión donde a través del cable de codificación verde, recibe la señal de realimentación del motor lineal.

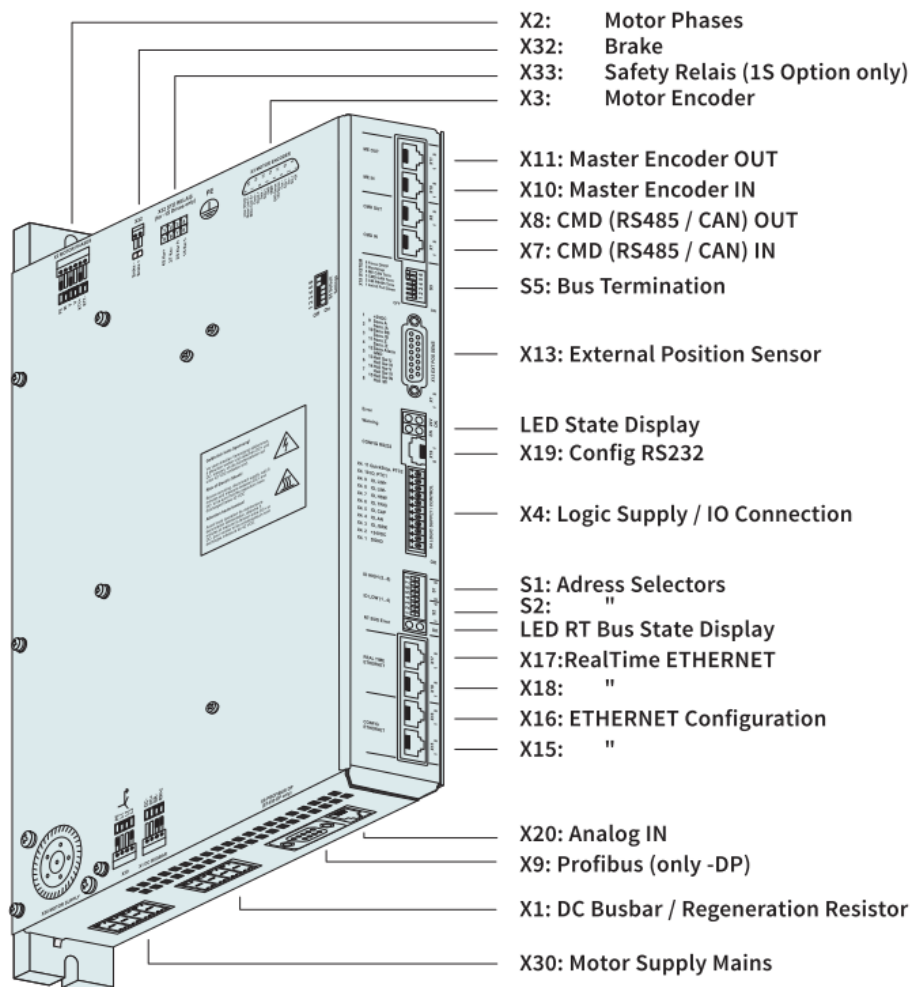


Figura 4.11: Colocación de los conectores del drive E1400 [20].

- Entrada X30 Motor Supply Mains: Conector que cumple la función de suministrar energía al motor, previo paso por el drive. Dicha corriente debe ser proveída por de una red trifásica de 400 V. La conexión a la red no se realiza directamente sino que previamente dicha corriente debe pasar por un filtro de red trifásica.
- Entrada X33 Safety Relais: Entrada exclusiva de los drive de la gama 1s que forma parte del sistema de seguridad común e la industria denominado Safe Torque Off. Si la entrada digital al drive es de valor 0, el sistema de seguridad bloquea la entrada de corriente al motor, impidiendo su funcionamiento. A efectos prácticos la entrada STO actúa como señal de control del bit 1 del Control Word, Voltage Enable. A la hora de configurar o testar el motor lineal, la relación entre la entrada X33 y el bit 1 de la palabra de control es indicada al usuario por medio del panel de control del LinMot-Talk.
- Conexiones X4: Conjunto de conexiones contenidas en un bloque de terminales fijos que sirve como conector para alimentar la electrónica interna del módulo de control. Al mismo tiempo el bloque cuenta con multitud de entradas y salidas que pueden utilizarse para gobernar el motor a través de un dispositivo externo, como podría ser una botonera externa. En la Tabla 4.4 se muestra la funcionalidad de cada una de los 11 terminales.

Tabla 4.4: Conector X4 [18].

Nr	Nomenclatura	Tipo	Funciones Especiales
1	Alimentación	Toma Tierra	-
2	Alimentación	24 VDC	-
3	X4.3	I/O	-
4	X4.4	I/O	Entrada Analógica 0-10 V
5	X4.5	I/O	-
6	X4.6	I/O	Entrada Activación Trigger
7	X4.7	I/O	Entrada Analógica 0-10V. Configurable para aplicaciones EasySteps
8	X4.8	I/O	-
9	X4.9	I/O	-
10	X4.10	I/O	Entrada PTC2
11	Parada Rápida	Entrada	Entrada PTC1

El cableado del conector X4 se divide en dos secciones bien diferenciadas. Los dos primeros pines del bloque se encargan de la alimentación de la electrónica del sistema. Dicha alimentación proviene de una toma de corriente monofásica de 220 V con origen en la línea eléctrica, la cual atraviesa una fuente de alimentación que reduce la tensión de la línea hasta tener la tensión de 24 V en corriente continua que el drive necesita.

El resto de pines corresponden a la sección de entradas y salidas que se utilizan para comunicar el motor con dispositivos o terminales externos. La mayoría de conectores pueden servir como entrada o salida de señales digitales indistintamente, si bien solo algunos pines están habilitados para realizar ciertas funciones especiales, como podría ser el uso del terminal X4.4 como entrada para un señal analógica 0-10 V.

En caso del excitador inercial, se ha hecho uso de un mando de control con la que es posible gobernar el motor, permitiendo que este pueda conmutar en distintos modos de funcionamiento gracias a la secuencia de comandos de movimiento programada en el modo de funcionamiento Run Mode 'Table Command'.

En lo referente a las conexiones con la botonera, el pin X4.11 tiene función de entrada digital y está asociado al interruptor de encendido. Los pines X4.5 y X4.6 actúan como salidas digitales para activar los LEDs del modo corriente analógico y curva sinusoidal de la botonera. Los pines X4.4 y X4.7 sirven de entradas analógicas 0-10 V, ambas vinculadas a cada potenciómetro del mando de control. Los pulsadores de cambio de modo, aumento y disminución de amplitud están asociados a la entradas digitales X4.10, X4.9 y X4.8 respectivamente. Finalmente el pin X4.3 funciona como entrada digital gobernada por el interruptor del modo corriente.

Hay que tener en cuenta que la propia botonera cuenta con una fuente de alimentación de 12 V alojada en el maletín de control, que se encarga de proporcionar energía a todo el sistema electrónico del mando, además de la señal analógica regulable que alimenta a los pines de entrada X4.4 y X4.7.

4.3.2. LinMot-Talk 6.8: Project

El software LinMot-Talk 6.8 utiliza un árbol de proyecto como base para configurar la actividad operacional del motor lineal, al mismo tiempo que permite realizar funciones de control y monitorización del excitador. La estructura interna del proyecto es dependiente del tipo de modelo de servo controlador utilizado, de forma que dos driver de características diferentes pueden compartir un mismo actuador, parametrizado a través del menú Motor Wizard, pero deben poseer proyectos diferentes.

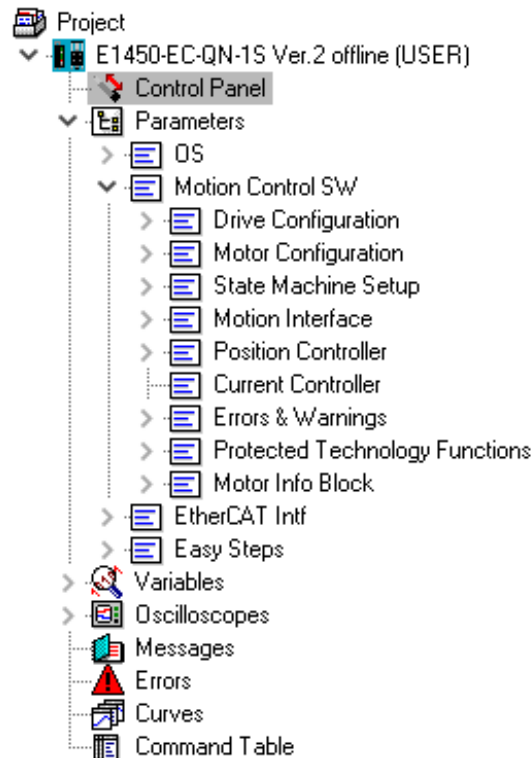


Figura 4.12: Árbol del proyecto.

En la Figura 4.12 se muestra las partes principales que constituyen el árbol del proyecto y que se van a detallar a continuación: Panel de control, parámetros, variables, osciloscopio, mensajes, errores, curvas y tabla de comandos.

Como paso previo a la manipulación del proyecto se ha de realizar la identificación y parametrización del actuador, así como instalar el Firmware. En el Anexo A.1 se muestran el procedimiento inicial de configuración del software LinMot-Talk 6.8.

En el Anexo A.2 se indica los pasos a seguir para realizar la configuración específica para los distintos modos de funcionamiento escogidos para el excitador inercial, distinguiendo entre el modo analógico, el modo curva sinusoidal y el modo corriente. También se incluyen los cambios necesarios para implementar todas las funcionalidades de la botonera externa.

Panel de Control

A través de este panel el usuario puede acceder mediante un PC al software del módulo de control, de forma directa y permitiendo un control manual y a tiempo real del mismo (Figura 4.13).

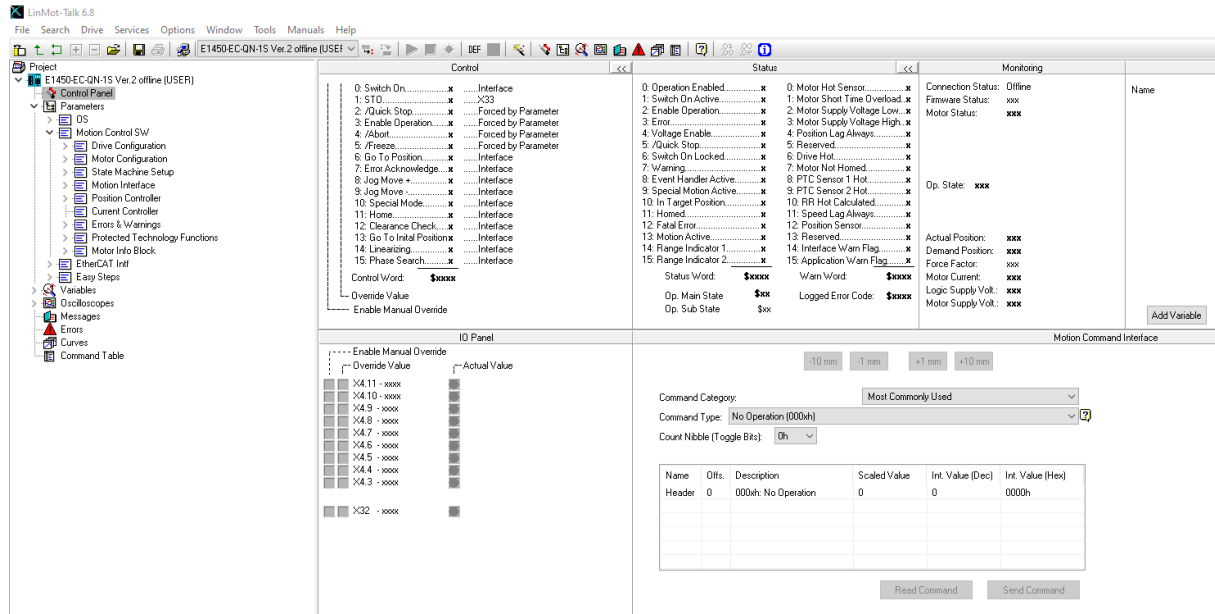


Figura 4.13: Panel de Control.

En la parte superior se encuentran las palabras de intercambio que permite al usuario comunicarse con el drive y alterar el estado máquina del excitador (Figura 4.14). La interfaz del programa LinMot proporciona visualmente el valor de cada uno de los 16 bits de cada palabra, indicando adicionalmente el valor total de la cadena de bits en formato hexadecimal.

A partir del sub panel Control el operador tiene la posibilidad de sobrescribir manualmente el valor de todos los bits de la palabra de control y modificar el estado máquina del motor lineal, a excepción de los estados 1 al 5, que solo pueden ser modificados mediante parámetros internos del controlador o por el sistema Safety Relais. Adicionalmente es indicado al usuario que factores son capaces de alterar los bits de la palabra de control, ya que función de la configuración realizada, es posible que además del control mediante la interfaz, el valor de ciertos bit estén vinculados a entradas X4 del servo controlador.

En cuanto a las palabras de estado y de alarma, el sub panel Status muestra adicionalmente al usuario los valores, en formato hexadecimal, del Main State y Sub State de la palabra StateVar, que informa el estado máquina en el que se encuentra el motor lineal. En caso de fallo en el sistema también se puede observar en dicho sub panel el código error asociado.

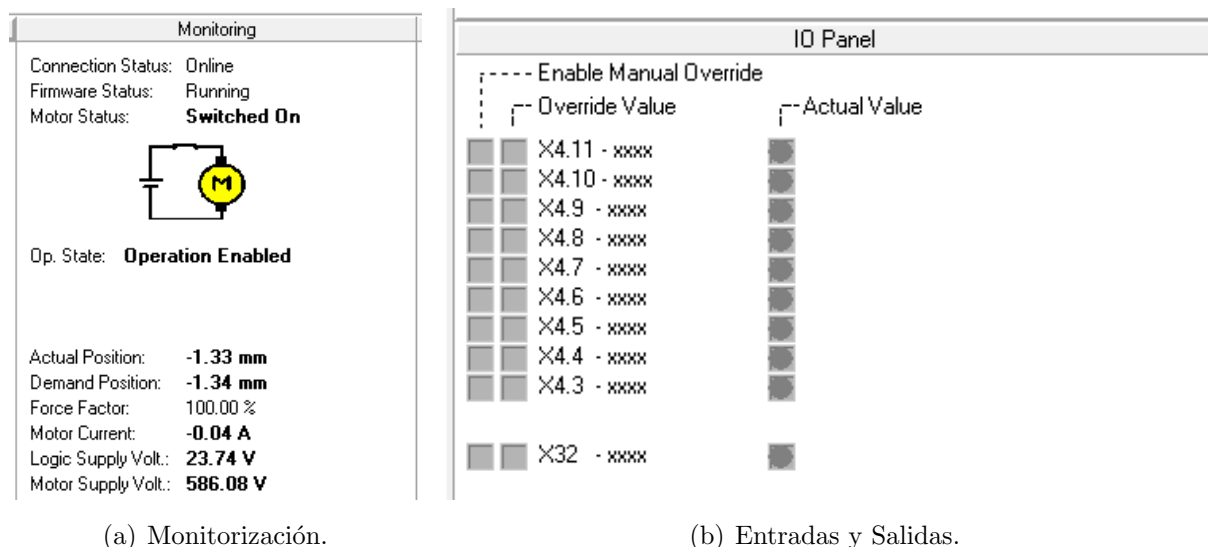
<table border="0"> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>0: Switch On.....1</td><td>.....IO X4.11 Function</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>1: STO.....1</td><td>.....X33</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>2: /Quick Stop.....1</td><td>.....Forced by Parameter</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>3: Enable Operation.....1</td><td>.....Forced by Parameter</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>4: /Abort.....1</td><td>.....Forced by Parameter</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>5: /Freeze.....1</td><td>.....Forced by Parameter</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>6: Go To Position.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>7: Error Acknowledge.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>8: Jog Move +.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>9: Jog Move -.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>10: Special Mode.....0</td><td>.....IO X4.3 Function</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>11: Home.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>12: Clearance Check.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>13: Go To Inital Position.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>14: Linearizing.....0</td><td>.....Interface</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td>15: Phase Search.....0</td><td>.....Interface</td></tr> </table> <p>Control Word: 003Fh</p> <p>Override Value</p> <p>Enable Manual Override</p>	<input type="checkbox"/>	0: Switch On.....1IO X4.11 Function	<input type="checkbox"/>	1: STO.....1X33	<input type="checkbox"/>	2: /Quick Stop.....1Forced by Parameter	<input type="checkbox"/>	3: Enable Operation.....1Forced by Parameter	<input type="checkbox"/>	4: /Abort.....1Forced by Parameter	<input type="checkbox"/>	5: /Freeze.....1Forced by Parameter	<input type="checkbox"/>	6: Go To Position.....0Interface	<input type="checkbox"/>	7: Error Acknowledge.....0Interface	<input type="checkbox"/>	8: Jog Move +.....0Interface	<input type="checkbox"/>	9: Jog Move -.....0Interface	<input type="checkbox"/>	10: Special Mode.....0IO X4.3 Function	<input type="checkbox"/>	11: Home.....0Interface	<input type="checkbox"/>	12: Clearance Check.....0Interface	<input type="checkbox"/>	13: Go To Inital Position.....0Interface	<input type="checkbox"/>	14: Linearizing.....0Interface	<input type="checkbox"/>	15: Phase Search.....0Interface	<table border="0"> <tr><td>0: Operation Enabled.....1</td><td>1: Switch On Active.....1</td></tr> <tr><td>2: Enable Operation.....1</td><td>3: Error.....0</td></tr> <tr><td>4: Voltage Enable.....1</td><td>5: /Quick Stop.....1</td></tr> <tr><td>6: Switch On Locked.....0</td><td>7: Warning.....0</td></tr> <tr><td>8: Event Handler Active.....1</td><td>9: Special Motion Active.....0</td></tr> <tr><td>10: In Target Position.....0</td><td>11: Homed.....1</td></tr> <tr><td>12: Fatal Error.....0</td><td>13: Motion Active.....1</td></tr> <tr><td>14: Range Indicator 1.....0</td><td>15: Range Indicator 2.....1</td></tr> </table> <p>Status Word: A937h</p> <p>Op. Main State 08h</p> <p>Op. Sub State B0h</p>	0: Operation Enabled.....1	1: Switch On Active.....1	2: Enable Operation.....1	3: Error.....0	4: Voltage Enable.....1	5: /Quick Stop.....1	6: Switch On Locked.....0	7: Warning.....0	8: Event Handler Active.....1	9: Special Motion Active.....0	10: In Target Position.....0	11: Homed.....1	12: Fatal Error.....0	13: Motion Active.....1	14: Range Indicator 1.....0	15: Range Indicator 2.....1	<table border="0"> <tr><td>0: Motor Hot Sensor.....0</td><td>1: Motor Short Time Overload..0</td></tr> <tr><td>2: Motor Supply Voltage Low...0</td><td>3: Motor Supply Voltage High..0</td></tr> <tr><td>4: Position Lag Always.....0</td><td>5: Reserved.....0</td></tr> <tr><td>6: Drive Hot.....0</td><td>7: Motor Not Homed.....0</td></tr> <tr><td>8: PTC Sensor 1 Hot.....0</td><td>9: PTC Sensor 2 Hot.....0</td></tr> <tr><td>10: RR Hot Calculated.....0</td><td>11: Speed Lag Always.....0</td></tr> <tr><td>12: Position Sensor.....0</td><td>13: Reserved.....0</td></tr> <tr><td>14: Interface Warn Flag.....0</td><td>15: Application Warn Flag.....0</td></tr> </table> <p>Warn Word: 0000h</p> <p>Logged Error Code: 0000h</p>	0: Motor Hot Sensor.....0	1: Motor Short Time Overload..0	2: Motor Supply Voltage Low...0	3: Motor Supply Voltage High..0	4: Position Lag Always.....0	5: Reserved.....0	6: Drive Hot.....0	7: Motor Not Homed.....0	8: PTC Sensor 1 Hot.....0	9: PTC Sensor 2 Hot.....0	10: RR Hot Calculated.....0	11: Speed Lag Always.....0	12: Position Sensor.....0	13: Reserved.....0	14: Interface Warn Flag.....0	15: Application Warn Flag.....0
<input type="checkbox"/>	0: Switch On.....1IO X4.11 Function																																																																																
<input type="checkbox"/>	1: STO.....1X33																																																																																
<input type="checkbox"/>	2: /Quick Stop.....1Forced by Parameter																																																																																
<input type="checkbox"/>	3: Enable Operation.....1Forced by Parameter																																																																																
<input type="checkbox"/>	4: /Abort.....1Forced by Parameter																																																																																
<input type="checkbox"/>	5: /Freeze.....1Forced by Parameter																																																																																
<input type="checkbox"/>	6: Go To Position.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	7: Error Acknowledge.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	8: Jog Move +.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	9: Jog Move -.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	10: Special Mode.....0IO X4.3 Function																																																																																
<input type="checkbox"/>	11: Home.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	12: Clearance Check.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	13: Go To Inital Position.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	14: Linearizing.....0Interface																																																																																
<input type="checkbox"/>	15: Phase Search.....0Interface																																																																																
0: Operation Enabled.....1	1: Switch On Active.....1																																																																																	
2: Enable Operation.....1	3: Error.....0																																																																																	
4: Voltage Enable.....1	5: /Quick Stop.....1																																																																																	
6: Switch On Locked.....0	7: Warning.....0																																																																																	
8: Event Handler Active.....1	9: Special Motion Active.....0																																																																																	
10: In Target Position.....0	11: Homed.....1																																																																																	
12: Fatal Error.....0	13: Motion Active.....1																																																																																	
14: Range Indicator 1.....0	15: Range Indicator 2.....1																																																																																	
0: Motor Hot Sensor.....0	1: Motor Short Time Overload..0																																																																																	
2: Motor Supply Voltage Low...0	3: Motor Supply Voltage High..0																																																																																	
4: Position Lag Always.....0	5: Reserved.....0																																																																																	
6: Drive Hot.....0	7: Motor Not Homed.....0																																																																																	
8: PTC Sensor 1 Hot.....0	9: PTC Sensor 2 Hot.....0																																																																																	
10: RR Hot Calculated.....0	11: Speed Lag Always.....0																																																																																	
12: Position Sensor.....0	13: Reserved.....0																																																																																	
14: Interface Warn Flag.....0	15: Application Warn Flag.....0																																																																																	

(a) Control Word. (b) Status Word. (c) Warn Word.

Figura 4.14: Palabras de intercambio.

A la derecha de las palabras de intercambio se encuentra el sub panel de monitorización, el cual proporciona información general acerca del actuador y el drive (Figura 4.15). En el sub panel de monitorización se muestra a tiempo real el estado de la conexión, del actuador y el Firmware, además de señalar el estado máquina del sistema.

Durante las operaciones de desplazamiento se actualiza en pantalla los valores de la posición actual, posición de demanda, el factor de fuerza del actuador y la corriente trifásica de alimentación del bobinado. También se transmite al usuario información acerca de la tensión de suministro tanto al motor como a la electrónica del módulo de control. Si se producen un error o alarma, estos son notificados visualmente al usuario mediante el uso de señales de advertencia.



(a) Monitorización. (b) Entradas y Salidas.

Figura 4.15: Sub paneles de control.

En la parte inferior izquierda se ubica el sub panel de conexiones digitales IO. Dicha interfaz proporciona usuario información acerca del estado de las entradas y salidas digitales utilizadas del bloque de terminales fijos X4, incluyendo también la conexión X33, correspondiente al freno motor (Figura 4.15). Con la finalidad de poder testar la configuración almacenada en el módulo de control, a través de este sub panel el usuario puede sobrescribir manualmente el valor de las conexiones y comprobar si el funcionamiento tanto del motor lineal como de los aparatos externos vinculados a las salidas del drive actúan de la forma esperada.

Finalmente en el extremo inferior derecha del panel de control se encuentra la interfaz de comandos de movimiento. Es la interfaz con la que el usuario puede registrar de forma manual e individualizada comandos de movimiento para su lectura e interpretación por parte del software del motor lineal, generando un perfil de desplazamiento. Para poder hacer uso de este sub panel, previamente se debe seleccionar la opción ‘Motion Command Interface’ como modo de funcionamiento del sistema, utilizando la ruta Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings/Run Mode Selection dentro del árbol de parámetros. Durante el uso de dicha interfaz, no solo se debe de seleccionar el Command ID en concreto, sino especificar cada uno de los parámetros necesarios para definir el comando (Figura 4.16).

Name	Offs.	Description	Scaled Value	Int. Value (Dec)	Int. Value (Hex)
Header	0	011xh: VAI Increment Dem...	272	272	0110h
1. Par	2	Position Increment	1 mm	10000	00002710h
2. Par	6	Maximal Velocity	0.01 m/s	10000	00002710h
3. Par	10	Acceleration	1 m/s ²	100000	000186A0h
4. Par	14	Deceleration	1 m/s ²	100000	000186A0h

Figura 4.16: Interfaz de comandos de movimiento [28].

Parámetros

Apartado principal del proyecto que está destinado a realizar la configuración de funcionamiento del actuador. El directorio de parámetros se divide a su vez en 4 desplegables principales: OS, Motion Control SW, EtherCat y EasySteps (Figura 4.17). Cada parámetro individual y configurable del módulo de control cuenta con un único código UPID (Unique Parameter ID) de 16 bits [15].

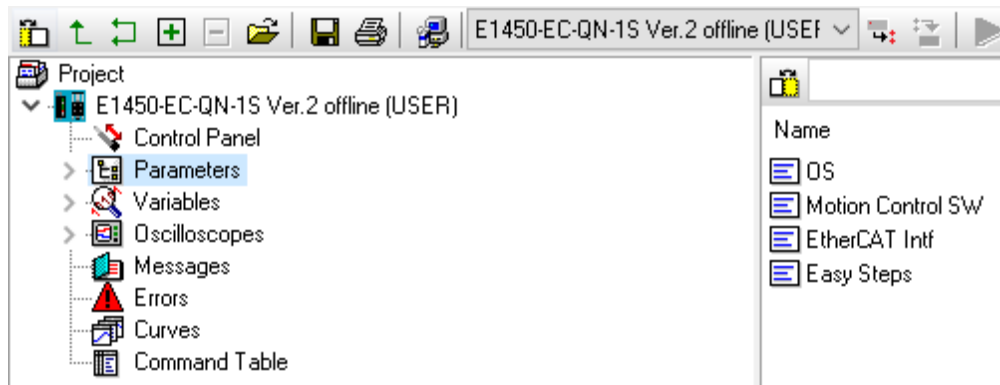


Figura 4.17: Desplegables principales.

El directorio OS (Operative System) es un desplegable que contiene principalmente información acerca de los parámetros descriptivos del módulo de control (Figura 4.18). Las opciones configurables en el directorio son escasas y poco relevantes en cuanto a la operatividad del motor lineal, siendo una sección del árbol de parámetros destinada principalmente a mostrar características del sistema, como podrían ser la identificación y dirección MAC del hardware, versión del software, dirección de los archivos del proyecto o la configuración Ethernet utilizada para la comunicación entre el drive y el PC.

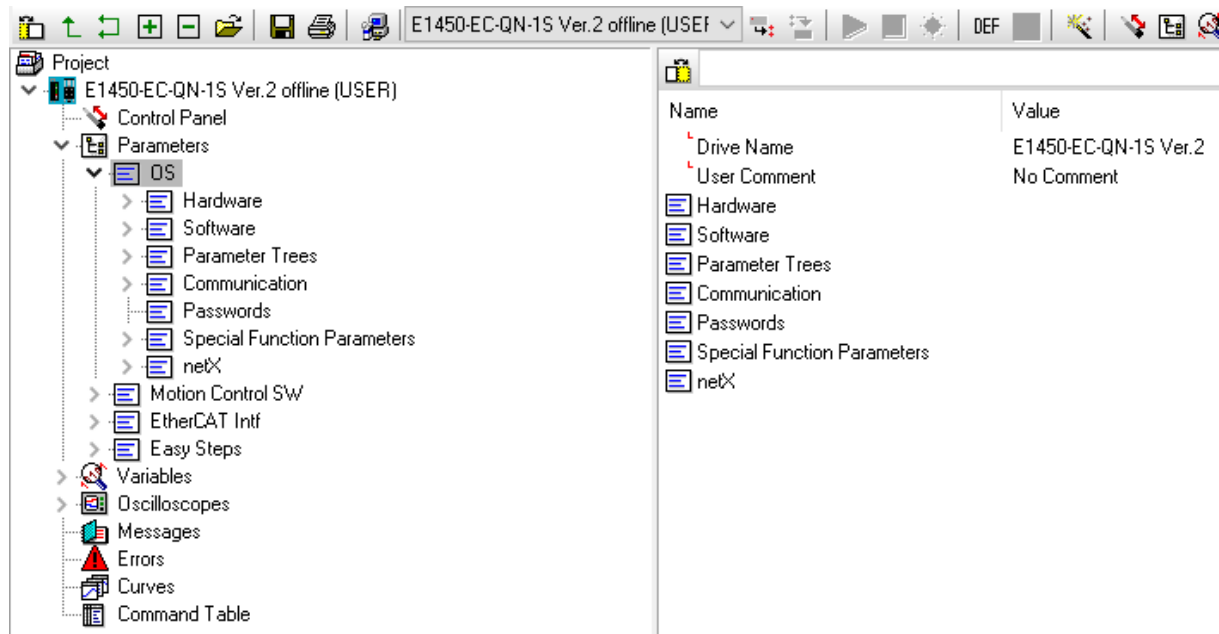


Figura 4.18: Directorio OS.

El desplegable Motion Control SW es la sección principal del árbol de parámetros donde se realiza la configuración del control de movimiento que ejerce el software del módulo de control sobre el actuador. Dicho desplegable se divide a su vez en 9 subdirectorios, cada uno enfocado a ciertas funcionalidades del motor lineal:

- Drive Configuration: Contiene los parámetros relacionados con el propio servo controlador. A través de la carpeta Power Bridge el usuario puede establecer el límite superior de corriente trifásica con la que el drive puede alimentar el bobinado del motor. El subdirectorio contiene también una carpeta, llamada X4 I/O Definitions (Figura 4.19), orientada a la definición de las entradas y salidas X4 de drive, que permite asociar las conexiones del bloque de terminales a palabras de intercambio, de forma que ciertos bits de la palabra de control se activen a través de ciertas entradas digitales, o que el módulo de control transmite a dispositivos externos el estado del sistema mediante salidas digitales que transmitan los valores de los bit de la palabra de estado.

Adicionalmente cada conexión X4 puede cumplir con ciertas funciones especiales propias de cada terminal y que también son configurables a través de dicha carpeta. Mediante el subdesplegable Drive Configuration también permite alterar parámetros acerca de la entrada analógica X20, el Master Encoder y la monitorización de valores críticos del drive.

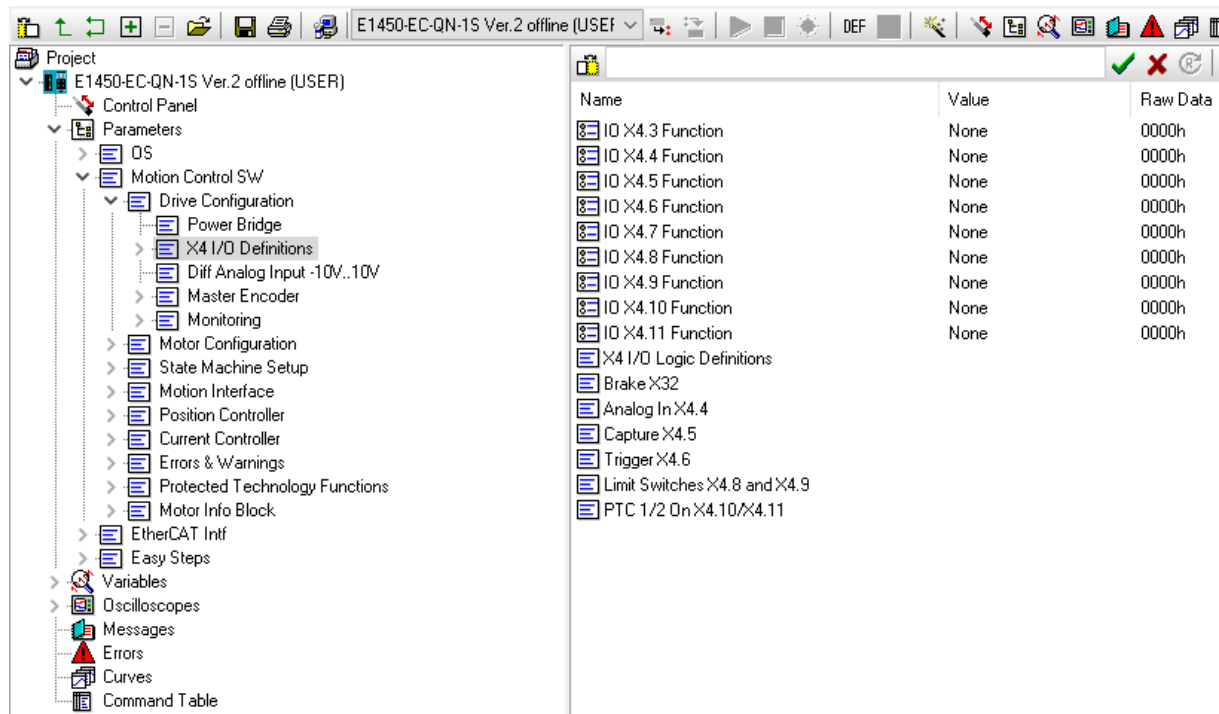


Figura 4.19: X4 I/O Definitions.

- **Motor Configuration:** Subdirectorio que concentra los parámetros referentes al actuador electromagnético encargado de realizar los movimientos. En él se define el tipo básico de motor (lineal o rotativo) y se muestran sus especificaciones principales. A través de la carpeta Position Feedback se puede configurar el tipo y propiedades de los sensores de desplazamiento del motor, tanto del encoder interno que se realiza al drive desde la entrada X3 como del sensor de posición externo conectado a la entrada X13, en caso de utilizarse.

Motor Configuration cuenta con un apartado de monitorización, en el que el usuario define el rango máximo de desplazamiento con respecto al sistema de referencia, así como el error máximo de desplazamiento y velocidad permitido, actuando de forma automática sobre los bits 4 (Position Lag Always) y 11 (Speed Lag Always) de la palabra de alarma en caso de sobrepasar los límites impuestos (Figura 4.20).

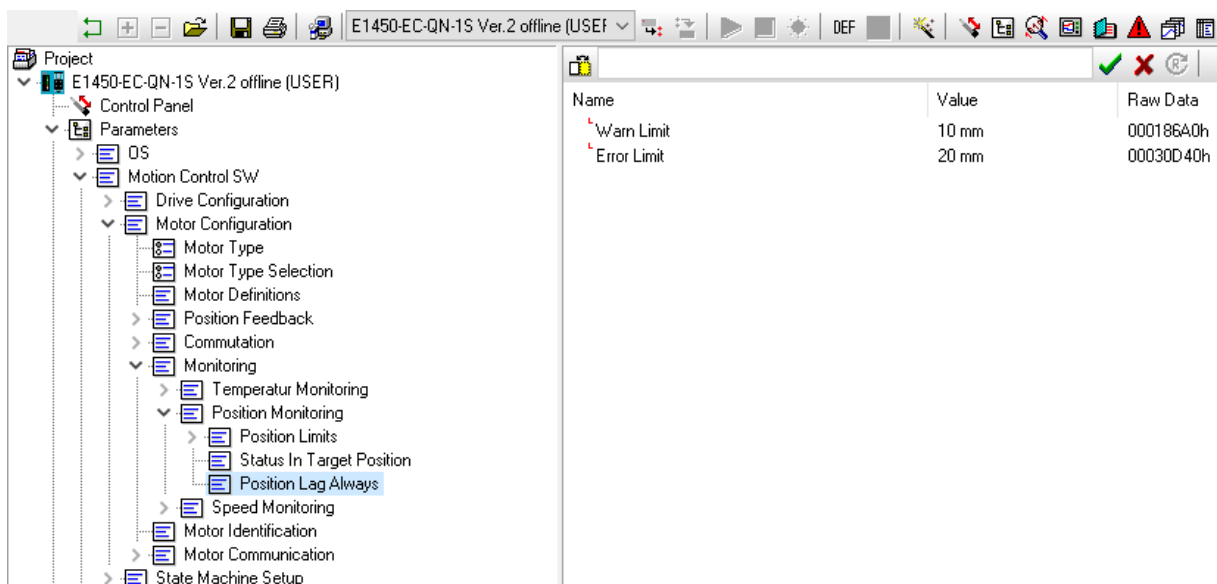


Figura 4.20: Position Lag Always.

- **State Machine Setup:** Desplegable centrado en la configuración del estado máquina del sistema, pudiendo modificar parámetros que alteran el funcionamiento de ciertos estados y las palabras de intercambio. En cuanto a las palabras de intercambio, se puede modificar el campo de aplicación de los filtros tipo Force Mask y Copy Mask sobre la palabra de control, así como determinar que parámetros, mediante el código UPID, se utilizan como condicionante para la activación de los bits 14 y 15 de la palabra de estado, correspondientes a las indicaciones Range Indicator 1 y Range Indicator 2 respectivamente. Al utilizar la botonera externa, configurar dichos bits de la palabra de estado permite que los LEDs de la botonera externa se encienden dependiendo del Run Mode activo.

En cuanto a los estados máquina del motor, en este subdirectorio se pueden modificar parámetros acerca del proceso de Homing, destacando la posibilidad de cambiar el protocolo de Homing, la posición inicial y la Home Position (Figura 4.21). Adicionalmente es posible configurar el modo de funcionamiento de los estados Quick Stop (4), Going to Position (15), Jogging + (16), Jogging - (17), Ready to Operate (6) Linearizing (18) y Phase Searching (19), así como contener la carpeta donde se activa de forma permanente el estado Special Mode (20) que habilita el modo corriente del sistema. Dentro de esta última carpeta se incluye el directorio Current Command Config, el cual establece la relación directa entre el voltaje se la señal analógica de entrada y la corriente trifásica que alimenta al bobinado durante el modo corriente.

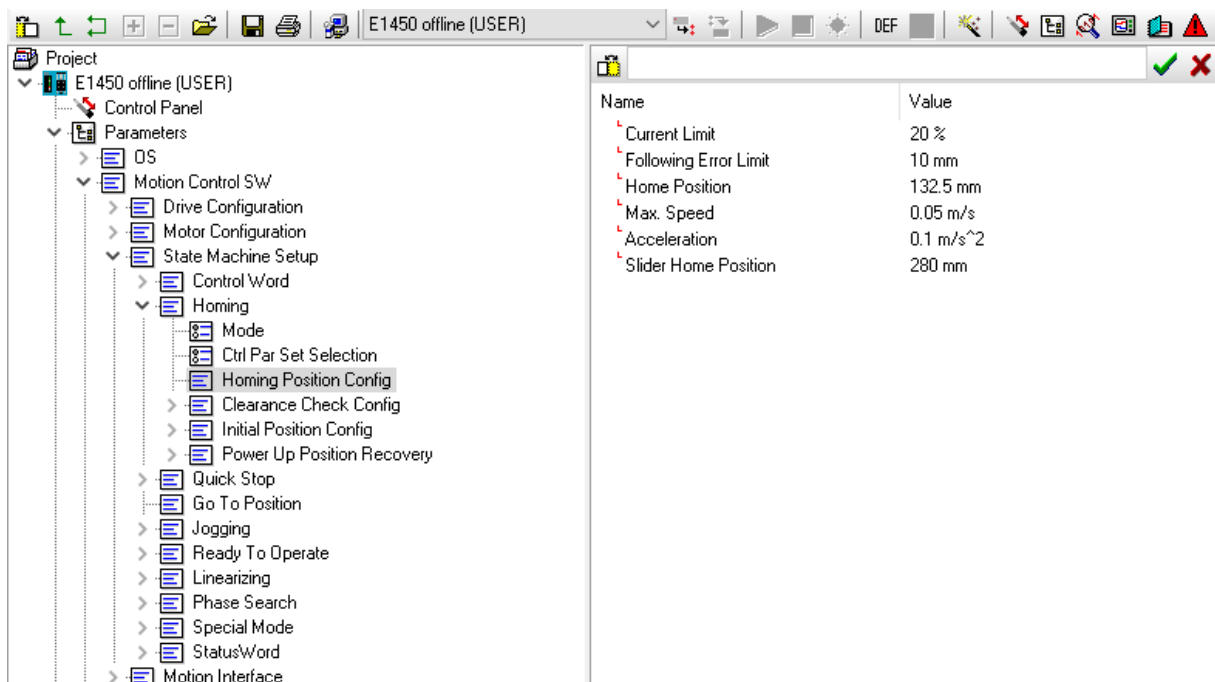


Figura 4.21: Home Position Configuration.

- Motion Interface: Aglutina los parámetros relacionados con la interfaz de movimiento y que determinan los comandos de movimiento que se envían al motor sin necesidad de que el usuario tenga que introducir dichos comandos de forma manual. Dentro de la carpeta Run Mode Settings se encuentra el directorio Run Mode Selection, que permite seleccionar cualquiera de los modos de funcionamiento predefinidos del sistema y que agrupan la mayoría de operaciones y comandos de movimiento disponibles (Figura 4.22). La carpeta Run Mode Settings también cuenta con multitud de directorios adicionales, cada uno vinculado a un modo de funcionamiento en concreto y que permite realizar una configuración más profunda del mismo.

Al mismo tiempo, el subdirectorio Motion Interface contiene directorios especializados, en los que destacan las carpetas que permiten determinar la resolución máxima de desplazamiento, velocidad y aceleración, las condiciones de contorno del interpolador VA y un modificador de desplazamiento en modo curva (Time Curve Settings) el cual permite modificar el offset, amplitud y periodo de un perfil de movimiento generado previamente, con la posibilidad de hacerlo en tiempo real.

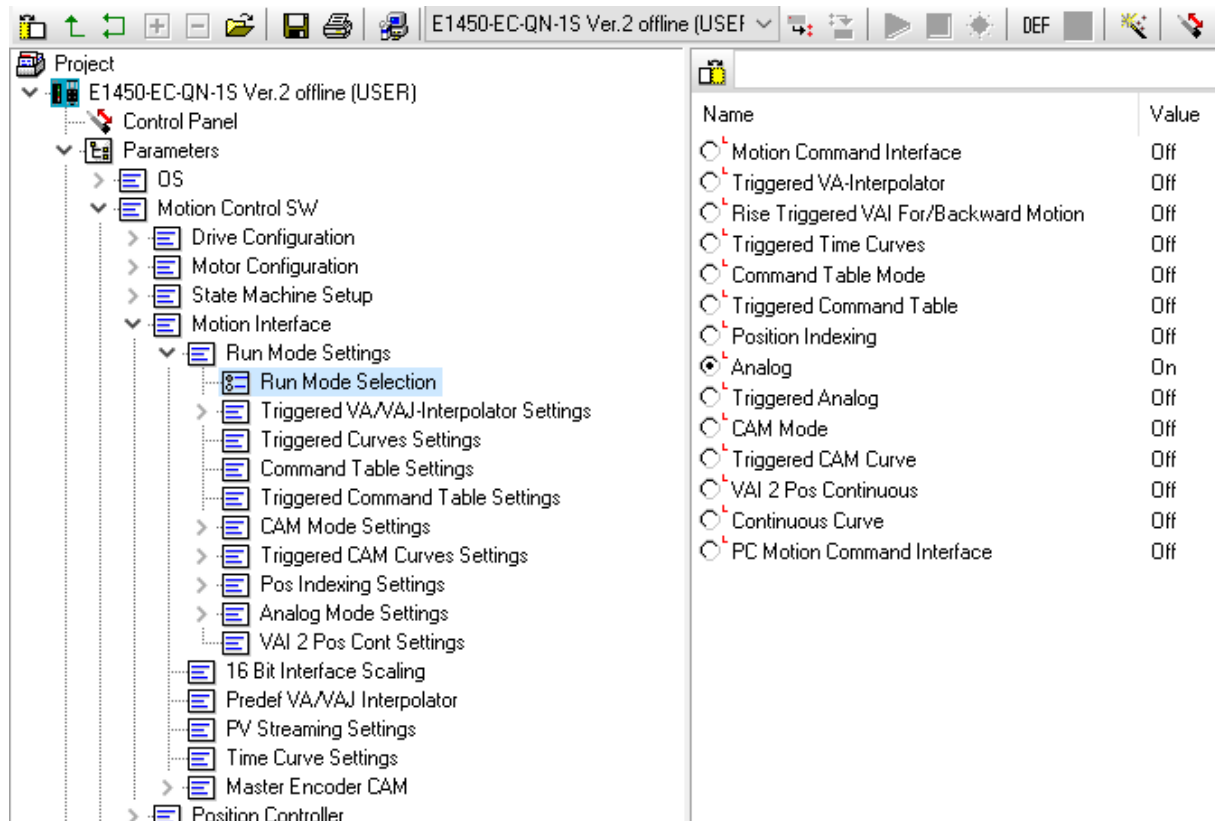


Figura 4.22: Run Mode Selection.

- Position Controller: Apartado que hace referencia a la configuración de los parámetros internos del PID. El árbol de parámetros proporciona por defecto dos configuraciones del algoritmo de control: El Set A, que ofrece una respuesta más rápida, y el Set B, que produce una respuesta más lenta pero de menor ruido. Dentro del subdirectorio Position Controller el usuario puede seleccionar que Set utilizar, así como modificar cada uno de los valores y pre filtros del PID escogido (Figura 4.23). A través de la carpeta Feedback Selection, el usuario puede seleccionar que entrada, correspondientes a las conexiones X3 (encoder interno) y X13 (sensor externo), se va a utilizar como señal de realimentación para el algoritmo de control.

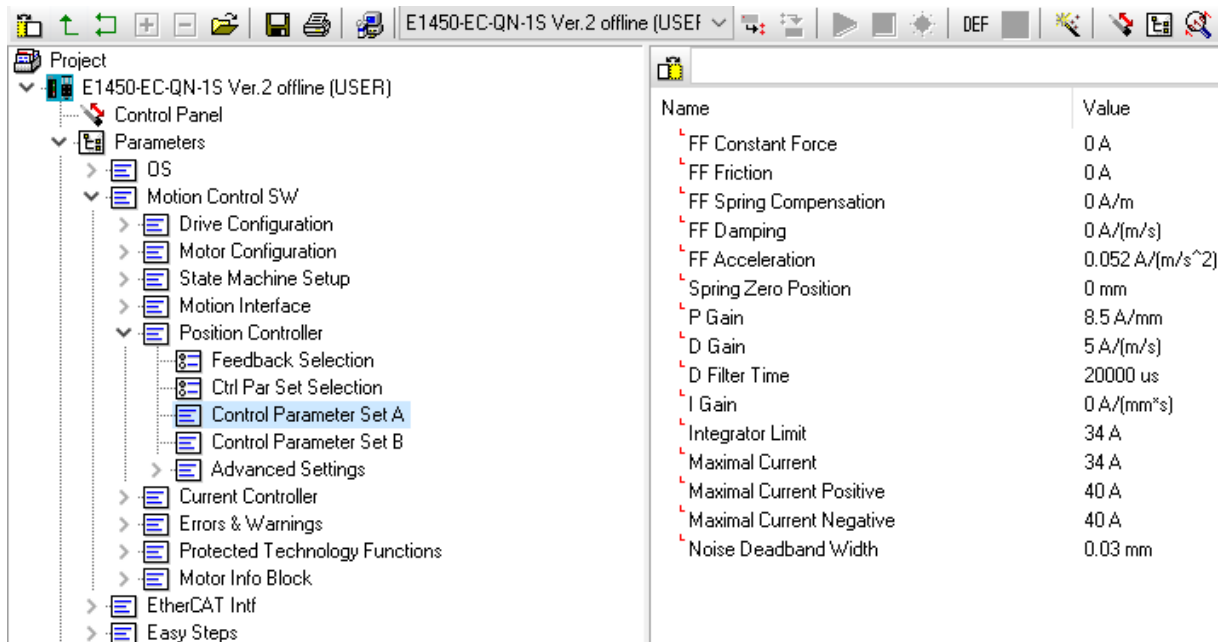


Figura 4.23: Control Parameter Set A.

- **Current Controller:** Subdirectorio orientado a configurar los parámetros del controlador de corriente, pudiendo alterar los valores de la frecuencia del controlador, la modulación de ancho de pulsos y del filtro paso bajo.
- **Error & Warnings:** Contiene la configuración de los de las máscaras de bits para la detección errores ya alarmas. Adicionalmente se puede configurar que tipo de errores activan el estado máquina 14 Error Behaviour Quick Stop.
- **Protected Technology Functions:** Los servo controladores de la gama E1400 ofrecen como funcionalidad extra la posibilidad de aplicar un sistema de control en lazo cerrado de la fuerza de contacto que puede ejercer el vástago del motor sobre un objeto o superficie, alcanzando una resolución de 0.1 N [19]. Dentro de Protected Protected Technology Functions se puede modificar los parámetros internos del algoritmo de control que rige la fuerza de contacto. Para activar dicha función se necesita de un clave que no se ha adquirido para este proyecto.
- **Motor Block Info:** Carpeta que contiene información referente a la identificación del bloque motor, aportando datos como el número de serie.

El tercer desplegable principal del árbol de parámetros, EtherCat Intf, contiene todos los parámetros relacionados con el protocolo de comunicación industrial EtherCat, diseñado para aplicaciones con intercambio de datos en tiempo real que hacen uso eficiente del ancho de banda de una red Ethernet estándar [11].

El desplegable EasySteps es un módulo opcional de LinMot-Talk que ofrece nuevas funcionalidades acerca del uso de la palabra de estado y de la configuración acerca de las señales digitales y analógicas de entrada al drive [14]. Hay que tener en cuenta que la configuración de los parámetros definidos en el módulo EasySteps no puede entrar en conflicto con la configuración del menú Motor Wizard y el desplegable Motion Control SW, induciendo a error en caso contrario. El desplegable se divide en 3 subdirectorios principales:

- **Smart Control Word Behaviour:** Carpeta que contiene una serie de nuevos parámetros asociado al uso de la palabra de control. Contiene las 4 siguientes funcionalidades activables:
 - **Intf Switch On Flag Behaviour:** El bit 0 Switch On de la palabra de control está siempre a nivel alto en cuanto se enciende el servo controlador, habilitando el autoencendido del motor.
 - **Intf Home Flag Behaviour:** El motor realiza el Homing en cuanto se se enciende el drive, mediante la alteración automática del bit 11 del Control Word
 - **Intf Error Acknowledge Flag Behaviour:** Mediante esta opción el módulo de control realiza un reconocimiento automática de los errores al apagar el motor.
 - **Intf Go To Initial Pos Flag Behaviour:** Modificación automática del bit 13 de la palabra de control que permite al motor desplazarse hacia la posición de consigna tras el encendido del módulo de control.
- **Analog Parameter Scale:** Función que permite escalar el valor en tiempo real de un parámetro único UPID a elección en función de una señal de entrada analógica de rango 0-10 V. El drive E1450-EC-QN-1S cuenta las entradas analógicas X4.4 y X4.7 que pueden utilizarse como señales de escalado para parámetros. Para configurar dicha función, el usuario debe especificar el UPID modificable, e imponer los valores que debe tomar el parámetro cuando la señal analógica de entrada tome los valores extremos 0 y 10 V.
- **I0 Motions:** Aplicación del software LinMot-Talk que permite asociar el salto a nivel alto de cualquier entrada digital del conector X4 a modos de funcionamiento completos formados por secuencias de comando de movimiento, como se muestra en la Figura 4.24. De esta forma, el motor lineal puede alternar diversos modos de desplazamiento en función de las señales digitales de entrada, sin necesidad de programar manualmente las secuencias de comandos de movimiento a través de la tabla de comandos.

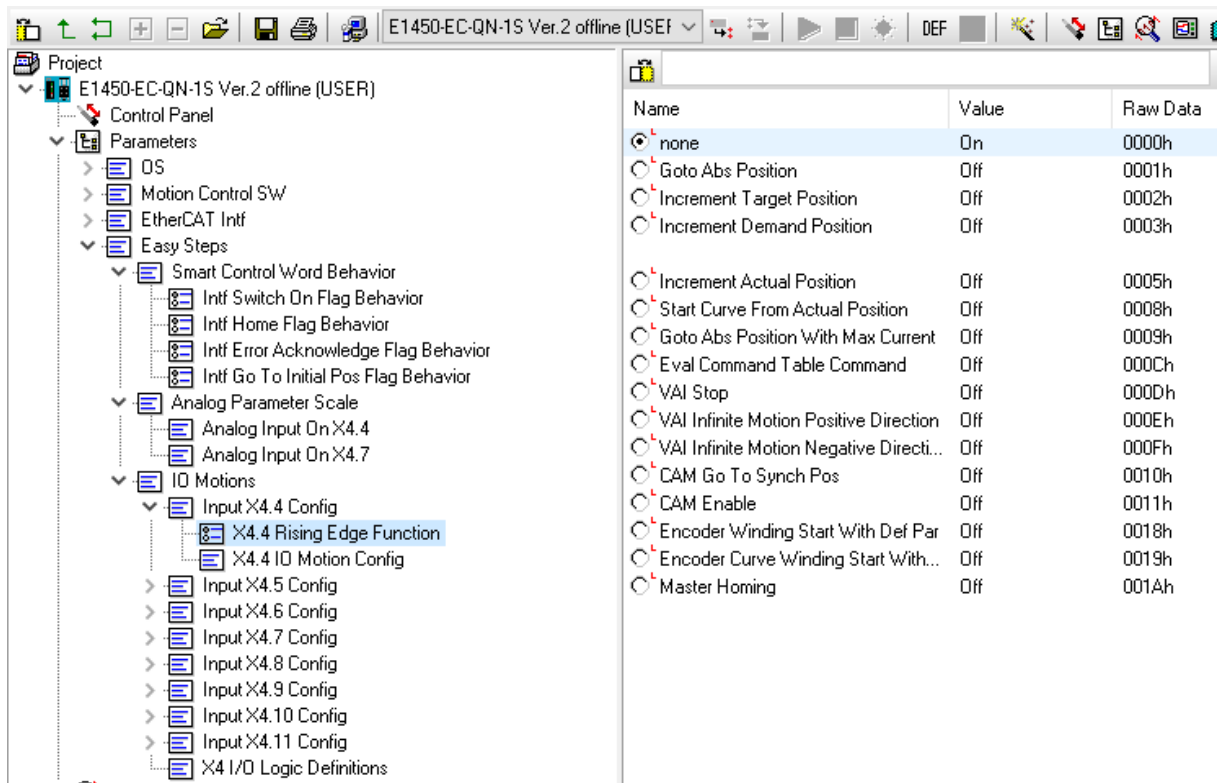




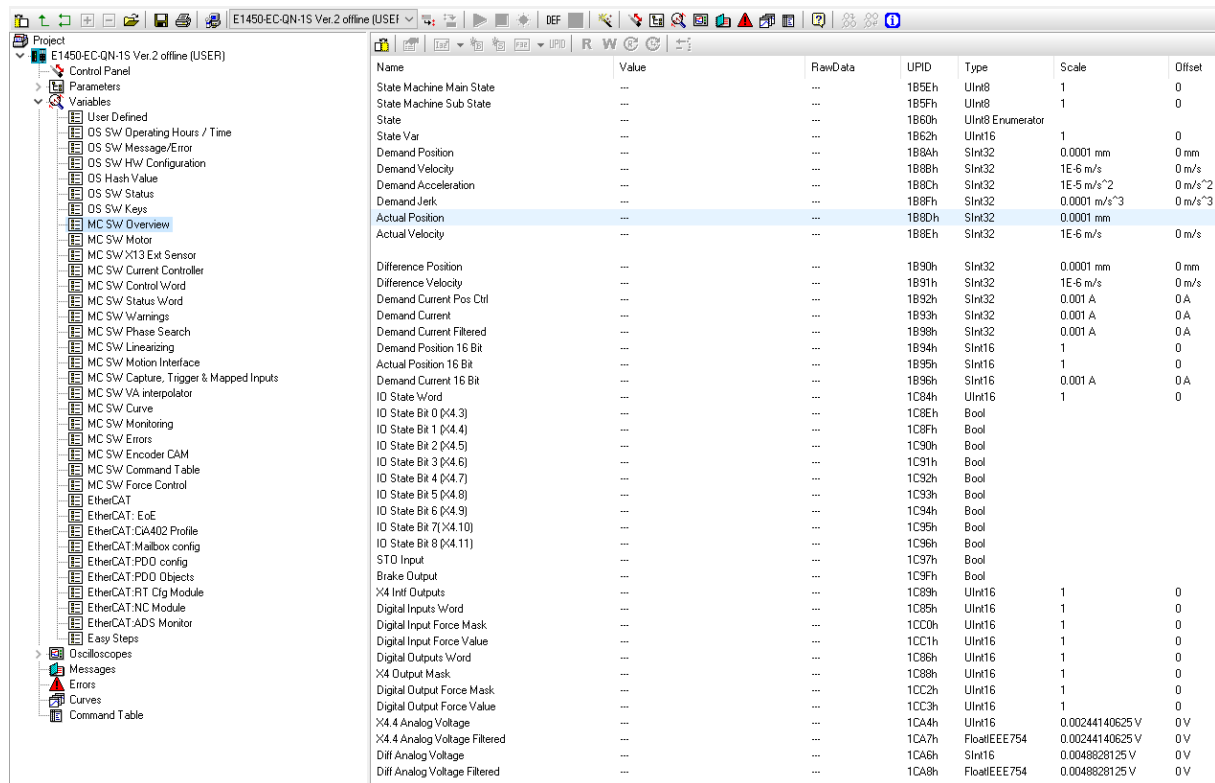
Figura 4.24: Módulo EasySteps.

Variables

Sección del proyecto donde se puede visualizar en tiempo real todas las variables utilizadas y monitorizadas por parte del módulo de control. Dichas variables son agrupadas en distintas carpetas, con partición similar a la utilizada en el apartado de parámetros. Para realizar una supervisión rápida del funcionamiento, el directorio MC SW Overview contiene agrupadas la mayoría de variables de interés, como los valores actuales y de demanda de la posición, velocidad y aceleración, el valor de las entradas digitales y analógicas del bloque de conexiones X4 entre otras variables (Figura 4.25).

Pulsando el icono Read All Variables  se mostrarán el valor de todas las variables en ese determinado instante de tiempo, mientras que si se selecciona la opción Read All Variables Cycled  dichas variables se actualizarán automáticamente cada cierto intervalo de tiempo.


Adicionalmente el usuario tiene la posibilidad de aglutinar todas las variables que sean de interés en la carpeta User Defined, utilizando el código UPID para identificar las variables a visualizar. En caso de querer observar gráficamente la evolución de una determinada variable, puede ser visualizada en el osciloscopio mediante click derecho y pulsando la opción Variable To Oscilloscope.





Name	Value	RawData	UPID	Type	Scale	Offset
State Machine Main State	185Eh	Ulnr8	1	0
State Machine Sub State	185Fh	Ulnr8	1	0
State	1860h	Ulnr8 Enumerator		
State Var	1862h	Ulnr16	1	0
Demand Position	188Ah	Slnr32	0.0001 mm	0 mm
Demand Velocity	188Bh	Slnr32	1E-6 m/s	0 m/s
Demand Acceleration	188Ch	Slnr32	1E-5 m/s ²	0 m/s ²
Demand Jerk	188Fh	Slnr32	0.0001 m/s ³	0 m/s ³
Actual Position	188Dh	Slnr32	0.0001 mm	
Actual Velocity	188Eh	Slnr32	1E-6 m/s	0 m/s
Difference Position	1890h	Slnr32	0.0001 mm	0 mm
Difference Velocity	1891h	Slnr32	1E-6 m/s	0 m/s
Demand Current Pos Ctl	1892h	Slnr32	0.001 A	0 A
Demand Current	1893h	Slnr32	0.001 A	0 A
Demand Current Filtered	1898h	Slnr32	0.001 A	0 A
Demand Position 16 Bit	1894h	Slnr16	1	0
Actual Position 16 Bit	1895h	Slnr16	1	0
Demand Current 16 Bit	1896h	Slnr16	0.001 A	0 A
ID State Word	1C84h	Ulnr16	1	0
ID State Bit 0 (x4.3)	1C8Eh	Bool		
ID State Bit 1 (x4.4)	1C8Fh	Bool		
ID State Bit 2 (x4.5)	1C90h	Bool		
ID State Bit 3 (x4.6)	1C91h	Bool		
ID State Bit 4 (x4.7)	1C92h	Bool		
ID State Bit 5 (x4.8)	1C93h	Bool		
ID State Bit 6 (x4.9)	1C94h	Bool		
ID State Bit 7 (x4.10)	1C95h	Bool		
ID State Bit 8 (x4.11)	1C96h	Bool		
STD Input	1C97h	Bool		
Brake Output	1C9Fh	Bool		
X4 Infr Outputs	1C89h	Ulnr16	1	0
Digital Inputs Word	1C85h	Ulnr16	1	0
Digital Input Force Mask	1C00h	Ulnr16	1	0
Digital Input Force Value	1C01h	Ulnr16	1	0
Digital Outputs Word	1C86h	Ulnr16	1	0
X4 Output Mask	1C88h	Ulnr16	1	0
Digital Output Force Mask	1C02h	Ulnr16	1	0
Digital Output Force Value	1C03h	Ulnr16	1	0
X4.4 Analog Voltage	1CA4h	Ulnr16	0.00244140625 V	0 V
X4.4 Analog Voltage Filtered	1CA7h	FloatIEEE754	0.00244140625 V	0 V
Diff Analog Voltage	1CA6h	Slnr16	0.0048828125 V	0 V
Diff Analog Voltage Filtered	1CA8h	FloatIEEE754	0.0048828125 V	0 V

Figura 4.25: MC SW Overview.

Osciloscopio

Panel que permite observar la evolución temporal de las variables mediante un osciloscopio (Figura 4.26). El panel cuenta con un máximo de 8 canales para la visualización de cualquier variable presente en el drive, seleccionándolas a través de la opción Oscilloscope Settings .

Al pulsar el icono Start  se realiza el registro de las variables durante un espacio de tiempo definido por el usuario y se muestra en pantalla. También mediante la opción Oscilloscope Settings se puede habilitar la actualización cíclica de los canales del osciloscopio, indicando el periodo de registro de forma similar el panel de variables. Se recomienda utilizar la opción Fit View  para una mejor visualización de los canales.

Mensajes

Panel que registra y muestra cronológicamente todos los mensajes cargados por el módulo de control durante el uso del motor lineal. Además del propio mensaje, el panel visualiza el origen fuente y la fecha exacta de aparición del evento.

Errores

Panel que tiene la función de mostrar los errores de funcionamiento del motor lineal ocurridos durante la sesión de uso. De forma similar al panel de mensajes, se muestra en pantalla la fecha del evento, así como el origen fuente del mismo. Se recomienda utilizar el inspector de objetos para obtener más información acerca del error ocurrido y como solucionarlo.

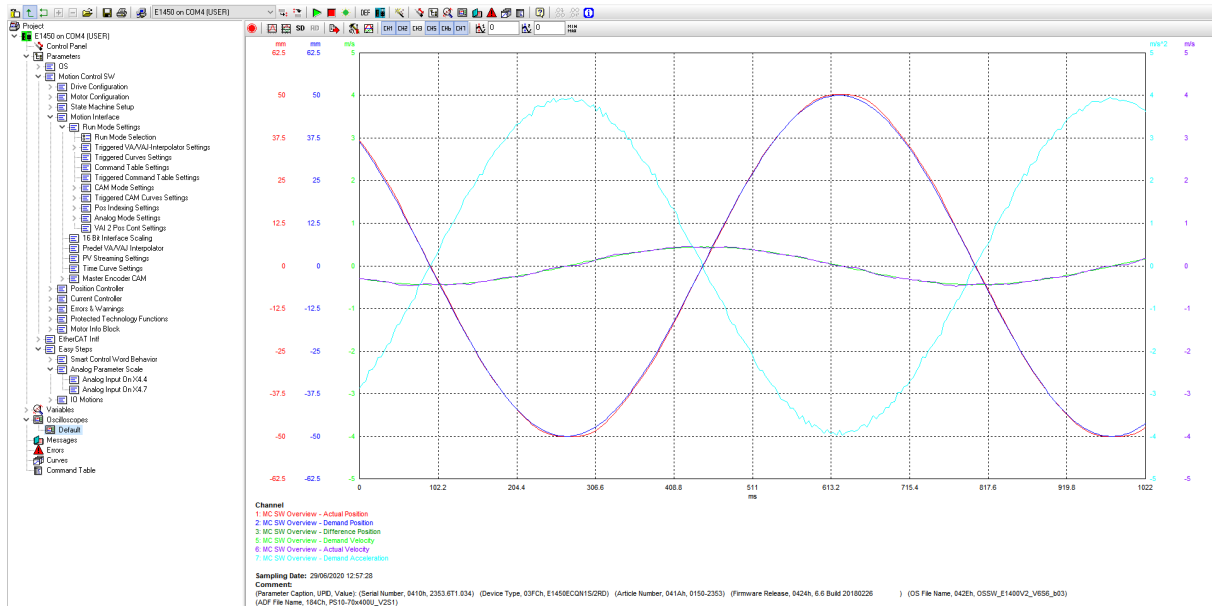


Figura 4.26: Osciloscopio.

Curvas

Apartado donde el usuario crea las curvas que son almacenadas y utilizadas por el módulo de control cuando el motor lineal se encuentra funcionando en modo curva, ya sea a través del Run Mode Time Curve o Continuous Curve. El menú permite crear curvas en función del tiempo o del incremento de posición del encoder, aplicando diferentes modos de cálculo de la curva, como la interpolación VA o generación de curva sinusoidales. Como condiciones de contorno el usuario especifica los puntos inicial y final del desplazamiento, así como el periodo temporal del desplazamiento.

Una vez generadas las curvas, estas se sitúan en el menú superior del panel. Para que puedan ser cargadas en el drive de control el usuario debe incluir las curvas creadas en el menú inferior del panel de curvas (Figura 4.27). Es importante que cada curva a utilizar esté perfectamente identificada mediante su número ID, valor consigna que se introduce en las carpetas del desplegable Motion Interface para indicar al drive que curva en concreto esta seleccionada para reproducir o modificar en tiempo real.

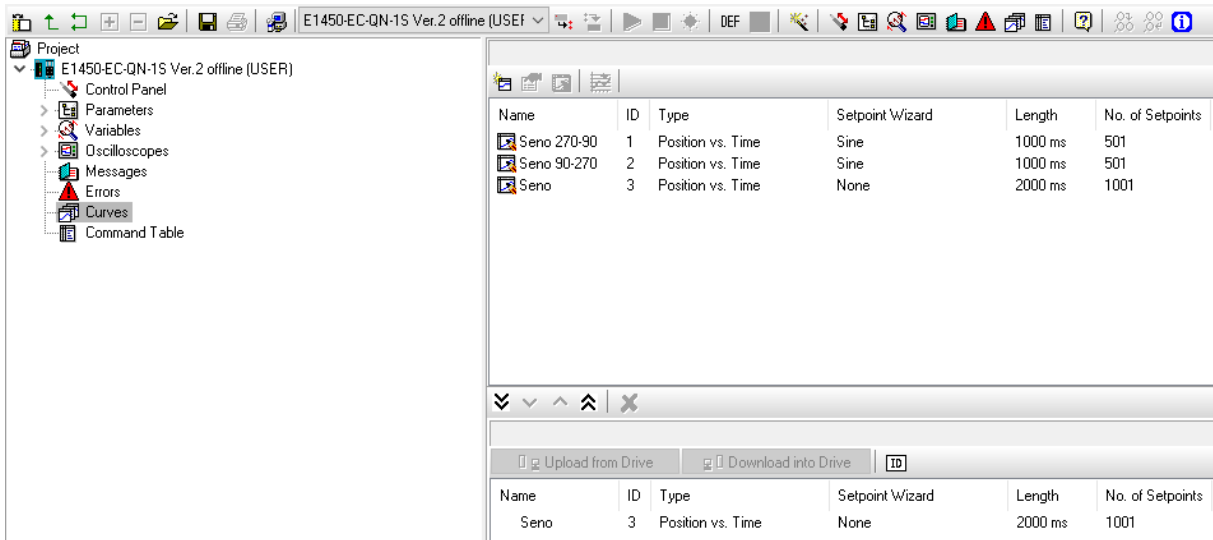



Figura 4.27: Panel de curvas.

En caso de necesitar curvas de mayor complejidad en cuanto al número de puntos de contorno, el software permite unir 2 segmentos curvas existentes para formar un nuevo perfil de desplazamiento (Figura 4.28), haciendo uso de la opción Join Curves . Para generar curvas con especificaciones muy concretas, la solución más práctica es importar el perfil de movimiento desde un archivo CSV creado externamente.

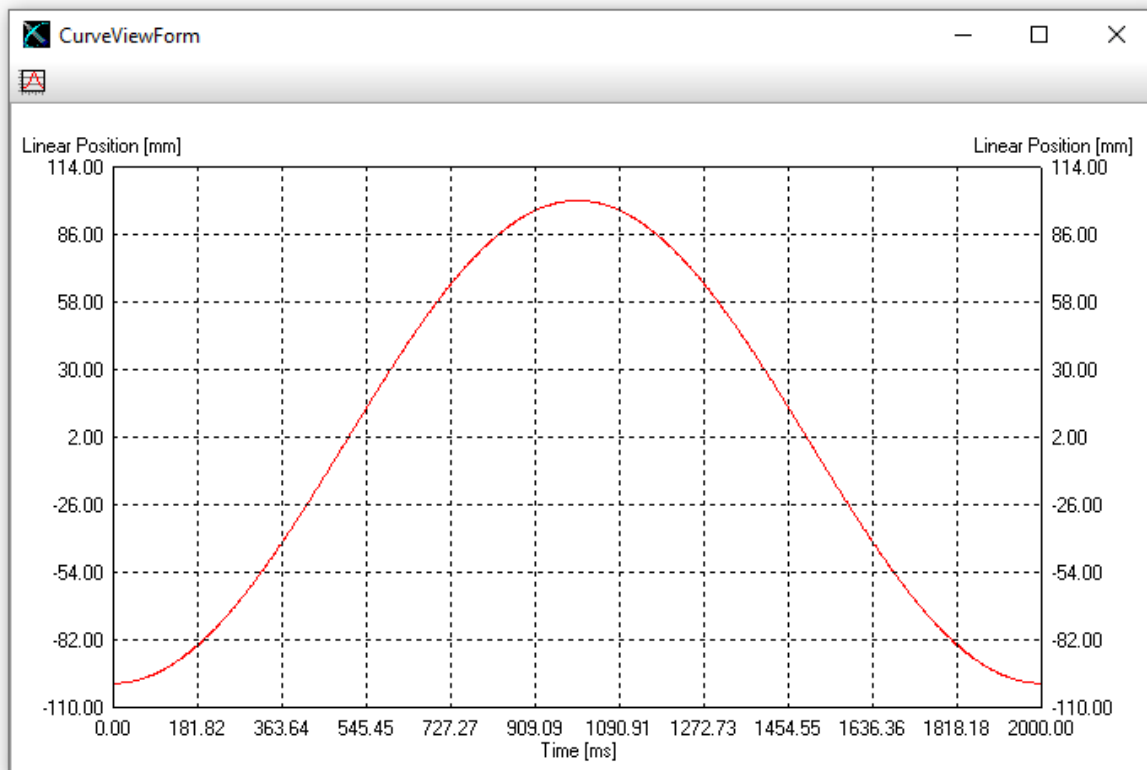


Figura 4.28: Curva compuesta.

Tabla de comandos

Panel del proyecto que permite generar secuencias de programa complejas, permitiendo al motor lineal conmutar distintos modos de funcionamiento y realizar diferentes desplazamientos o protocolos de actuación en función del valor de las entradas, cumplimiento de condicionantes o secuencias directas.

Para crear la secuencias de programa el usuario debe introducir los comandos de movimiento a realizar, especificando tanto el Command ID como el valor de cada uno de los parámetros que si deben incluir en el comando. Para generar sentencias de programa completas, además de comandos que definen los desplazamientos, se debe hacer uso comandos capaces de asignar parámetros o variables temporales, así como comandos de condicionalidad, especificando siempre las relaciones secuenciales entre comandos (Figura 4.29).

Para hacer uso de la tabla de comandos, se debe seleccionar el modo ‘Command Table Mode’ a través de la ruta Motion Control SW/Motion Interface/Run Mode Settings/Run Mode Selection. Adicionalmente se debe especificar el ID del comando de inicio de la secuencia de programa, opción que se sitúa dentro de la carpeta Command Table Settings, que a su vez se encuentra contenida en el desplegable Run Mode Settings.

ID	Name	Type	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8	Sequenced Entry
1	Espera	Wait Time (210h)	Time: 400 ms								2 (Leo Run mode)
2	Leo Run mode	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 1450h (Run Mode Selection)								3 (Condicion Mo...
3	Condicion Mode	IF Cnd Table Var 1 Less Than (250h)	Val: 5								None
4	Leo 5333	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 14D9h (Source Selection)								5 (Condicion Va...
5	Condicion Var2	IF Cnd Table Var 2 Less Than (252h)	Val: 2								None
6	Go to 0	VAI Go To Pos (010h)	Pos: 0 mm								7 (Espera)
7	Espera	Wait until Motion Finished (211h)									8 (Veloc Norma)
8	Veloc Normal	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14BEh (Max. Speed)	Value: 2 m/s							9 (Acel Norma)
9	Acel Normal	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14BFh (Acceleration)	Value: 15 m/s ²							10 (Decel Norma)
10	Decel Normal	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14C0h (Deceleration)	Value: 15 m/s ²							11 (Curva 2)
11	Curva 2	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14C3h (Curve ID)	Value: 2							12 (Modo Curva)
12	Modo Curva	Write Live Parameter (002h)	UPID: 1450h (Run Mode Selection)	Value: 000000...							None
13											
14	Veloc Baja	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14BEh (Max. Speed)	Value: 0.1 m/s							15 (Acel Baja)
15	Acel Baja	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14BFh (Acceleration)	Value: 1.5 m/s ²							16 (Decel Baja)
16	Decel Baja	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14C0h (Deceleration)	Value: 1.5 m/s ²							17 (Analog 0 10V)
17	Analog 0 10V	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14C9h (Source Selection)	Value: 000000...							18 (Go to analog)
18	Go to analog	VAI Go To Analog Pos (013h)	Val: 0.02 m/s								19 (Espera)
19	Espera	Wait until Motion Finished (211h)									20 (Curva 0)
20	Curva 0	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14C3h (Curve ID)	Value: 0							21 (Modo Curva)
21	Modo Curva	Write Live Parameter (002h)	UPID: 1450h (Run Mode Selection)	Value: 000000...							22 (Modo Analo...
22	Modo Analógico	Write Live Parameter (002h)	UPID: 1450h (Run Mode Selection)	Value: 000000...							None
23											
24	Go to 0	VAI Go To Pos (010h)	Pos: 0 mm								25 (Espera)
25	Espera	Wait until Motion Finished (211h)									26 (Analog 10 ...)
26	Analog 10 +10V	Write Live Parameter (002h)	UPID: 14D9h (Source Selection)	Value: 000000...							27 (Modo Analo...
27	Modo Analógico	Write Live Parameter (002h)	UPID: 1450h (Run Mode Selection)	Value: 000000...							None
28	Leo Run mode	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 1450h (Run Mode Selection)								29 (Condicion C...
29	Condicion Curva	IF Cnd Table Var 1 Greater Than (25...	Val: 4								None
30	Leo Amplitud	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 14CAh (Curve Amplitude Scale)								31 (Amplitud +1...
31	Amplitud +10%	Add To Cnd Table Var 2 (2x3h)	Val: 200								32 (Condicion >...
32	Condicion >15%	IF Cnd Table Var 2 Greater Than (25...	Val: 15000								None
33	Paso por cero	Wait until Actual Position Less Than (...)	Pos: 0.1 mm								34 (Paso por ce...
34	Paso por cero	Wait until Actual Position Greater Tha...	Pos: 0.1 mm								35 (Escribo Amp...
35	Escribo Amplitud	Write Cnd Table Var 2 To UPID RAM...	UPID: 14CAh (Curve Amplitude Scale)								None
36											
37											
38	Leo Run mode	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 1450h (Run Mode Selection)								39 (Condicion C...
39	Condicion Curva	IF Cnd Table Var 1 Greater Than (25...	Val: 4								None
40	Leo Amplitud	Write UPID RAM value To Cnd Tabl...	UPID: 14CAh (Curve Amplitude Scale)								41 (Amplitud 10...

Figura 4.29: Tabla de comandos.

4.3.3. Control manual

Para poder manejar el motor lineal de forma efectiva desde el PC se recomienda manejar de forma manual el encendido y Homing del actuador, haciendo uso del subpanel de la palabra de control que se encuentra contenido en el panel de control del proyecto. En primer lugar se marcan las casillas Enable Manual Override de los bits 0 y 11, correspondientes a las funciones Switch On y Home. Seguidamente se marca la casilla Override Value del bit 0, lo que permite el encendido del motor pero sin que se produzca el proceso de Autohome. El siguiente paso consiste en asignar a nivel alto el bit 11, lo que inicia el proceso de generación del sistema de referencia del motor (Figura 4.30). Una vez finalizado el Homing hay que deseleccionar la casilla Override Value del bit 11, finalizando el estado de Homing y dejando al motor listo para operar.

<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0: Switch On.....	1	.....	Manual Override
		1: STO.....	1	.....	X33
		2: /Quick Stop.....	1	.....	Forced by Parameter
		3: Enable Operation.....	1	.....	Forced by Parameter
		4: /Abort.....	1	.....	Forced by Parameter
		5: /Freeze.....	1	.....	Forced by Parameter
		6: Go To Position.....	0	.....	Interface
		7: Error Acknowledge....	0	.....	Interface
		8: Jog Move +.....	0	.....	Interface
		9: Jog Move -.....	0	.....	Interface
		10: Special Mode.....	0	.....	ID X4.3 Function
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	11: Home.....	1	.....	Manual Override
		12: Clearance Check....	0	.....	Interface
		13: Go To Inital Position	0	.....	Interface
		14: Linearizing.....	0	.....	Interface
		15: Phase Search.....	0	.....	Interface

Control Word: **083Fh**

----- Override Value

----- Enable Manual Override

Figura 4.30: Control manual del encendido y el Homing.

Del mismo modo se recomienda manipular manualmente el bit de entrada de la conexión X4.3, encargado de activar el modo corriente en el motor. Adicionalmente resulta de gran interés visualizar en el panel de control los valores numéricos de los parámetros de escala en las entradas X4.4 y X4.7, lo que permite al usuario conocer el valor de corriente máxima permitida en el modo corriente y la frecuencia de la senoide en el modo curva (Figura 4.31).

Name	Value
Scaled Value On X4.7	1862
Scaled Value On X4.4	3081

Figura 4.31: Visualización de los parámetros de escala a tiempo real.

4.4. Control de aceleraciones: Inversión del sistema

Para que sea posible la implementación del excitador inercial como mesa sísmica capaz de reproducir acelerogramas, es de importancia capital que el sistema sea capaz de reproducir de forma fiel los valores de consigna en aceleración que se proporcionan al servo controlador a través de la señal analógica de entrada X20.

Sin embargo el motor lineal LinMot opera mediante un control en lazo cerrado de posición (Figura 4.32), por lo que en condiciones normales de funcionamiento el usuario no tiene un control directo y de la aceleración de salida del actuador, pudiendo monitorizar unicamente el desplazamiento mediante la señal de entrada, variable dinámica que carece de interés para este tipo de ensayos sísmicos.

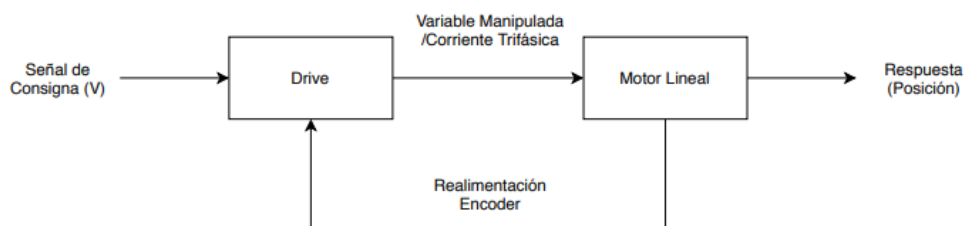


Figura 4.32: Sistema de control de posición.

Una posible solución a dicha problemática es la inclusión de un sistema auxiliar de control, ubicado a la entrada al sistema formado por el módulo de control y el actuador lineal, que sea capaz de manipular la señal analógica de consigna en aceleraciones de tal forma que se obtiene una cierta señal en tensión manipulada. Esta señal manipulada entra al drive y provoca que el motor lineal ejecute un cierto perfil dinámico con un cierto desplazamiento, que no es monitorizado de forma directa por el usuario y que estará ajustado con respecto a la variable manipulada de salida del controlador externo, pero que al mismo tiempo posee una evolución de la aceleración que se ajusta a la señal consigna inicial de entrada a dicho controlador externo (Figura 4.33).

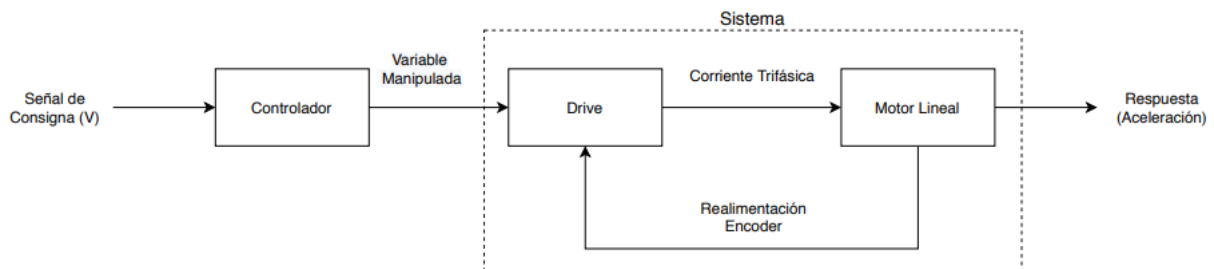


Figura 4.33: Sistema de control en aceleración.

Este tipo de sistemas de control están basados en la solución ideal de los sistemas de control automático en lazo abierto (Figura 4.34). El conjunto formado por el servo controlador y el actuador lineal se puede interpretar como un proceso o sistema con una determinada función de transferencia $G(s)$, que relaciona la señal de entrada al drive con la respuesta $Y(s)$, que en este caso se trata de la aceleración que proporciona el actuador [9]. Si se consigue modelar el proceso y determinar la función transferencia del sistema mediante algoritmos matemáticos, se puede colocar un bloque de control $C(s)$ a la entrada del proceso cuya función transferencia es la inversa a la función propia del sistema modelado. De esta forma la respuesta que se obtiene del motor se ajustará siempre a la señal de consigna $R(s)$ de entrada al bloque de control, solución que se obtiene de aplicar las Ecuaciones 1 y 2.



Figura 4.34: Sistema de control en lazo abierto ideal.

$$Y(s) = G(s) \cdot C(s) \cdot R(s) \quad (1)$$

$$C(s) = G(s)^{-1} \rightarrow Y(s) = R(s) \quad (2)$$

En contrapartida, hay que tener en cuenta que este procedimiento de monitorización ideal puede presentar multitud de inconvenientes que no lo posicionan como una solución verdaderamente viable para muchas aplicaciones de control:

- No siempre es posible conocer o modelar de forma precisa el comportamiento propio del sistema.
- En ocasiones no es posible obtener de forma efectiva una función transferencia que sea equivalente a la inversa de la función transferencia propia del proceso.
- Este sistema de control es incapaz de responder ante perturbaciones presentes en el proceso o a la salida del mismo.

Para poder implementar el bloque de control al entorno en lazo abierto se ha hecho uso de un controlador industrial CompactRIO, que permite realizar funciones de medición, monitorización y control de sistemas deterministas. En la Figura 4.35 se muestra el controlador utilizado que cuenta con los siguientes componentes:

- Chasis NI cRIO-9076: Controlador de 4 Ranuras, con un procesador CPU Dual-Core de 1.33 GHz, 2 GB DRAM y 32 GB de almacenamiento. Cuenta con una conexión de alimentación con la red eléctrica y un puerto Ethernet con el que se puede comunicar con dispositivos externos.

Al igual que con la conexión de comunicación RS-232 del módulo de control de excitador inercial, es necesario el uso de una entrada Ethernet para establecer la conexión entre la CompactRIO y el PC.

- Módulo NI 9263: Componente adicional que posee 10 salidas analógicas $\pm 10V$. Desde este módulo se realiza la conexión entre la CompactRIO y el servo controlador, proporcionando la señal en tensión manipulada en función de la señal analógica en consigna de entrada al chasis través del PC.
- Módulo NI 9233: Módulo extraíble que cuenta con 4 entradas analógicas de rango $\pm 5V$ con puerto tipo BNC. Un acelerómetro acoplado al bloque móvil del excitador inercial es el que se encarga de transmitir al controlador la aceleración que posee el sistema para realizar su identificación y modelación matemática.



Figura 4.35: Controlador CompactRIO.

Hay que tener en cuenta que la aplicación de este controlador no está limitado exclusivamente a su uso como componente externo del excitador inercial para su implementación como mesa sísmica, sino que es compatible con cualquier mecanismo con el que se quiera implantar un control de aceleración, siempre que haya una compatibilidad entre las distintas conexiones y dispositivos.

El controlador CompactRIO está optimizado para ser programado mediante la aplicación LabView, un software de ingeniería de sistemas con alta integración de hardware que proporciona un entorno de desarrollo para la programación gráfica para aplicaciones relacionadas con el adquisición, control y análisis de datos, al mismo tiempo que se facilita la creación de interfaces personalizadas para una cómoda interacción con el usuario final [31].

Para esta aplicación se ha hecho uso de la versión LabView 2016, que cuenta con dos módulos principales para la implementación del control en lazo abierto:

- Identificación del sistema (System ID): Módulo encargado de identificar y modelar el sistema compuesto por el drive y el motor, calculando la función transferencia del controlador.
- Validación del sistema (Shock Test): Módulo que tiene la función de probar la correcto funcionamiento del controlador mediante la aplicación de una determinada señal analógica de entrada y observando si hay una correcta correlación entre los valores de consigna y la respuesta en aceleraciones.

4.4.1. Identificación sistema

Como paso previo a la identificación primera se ha de realizar todo el conexionado referente al controlador externo, PC y el sistema a identificar. Para el ejemplo expuesto para la identificación el laboratorio ha dispuesto de un shaker inercial de dimensiones reducidas fabricado por DynaLabs (Figura 4.36).

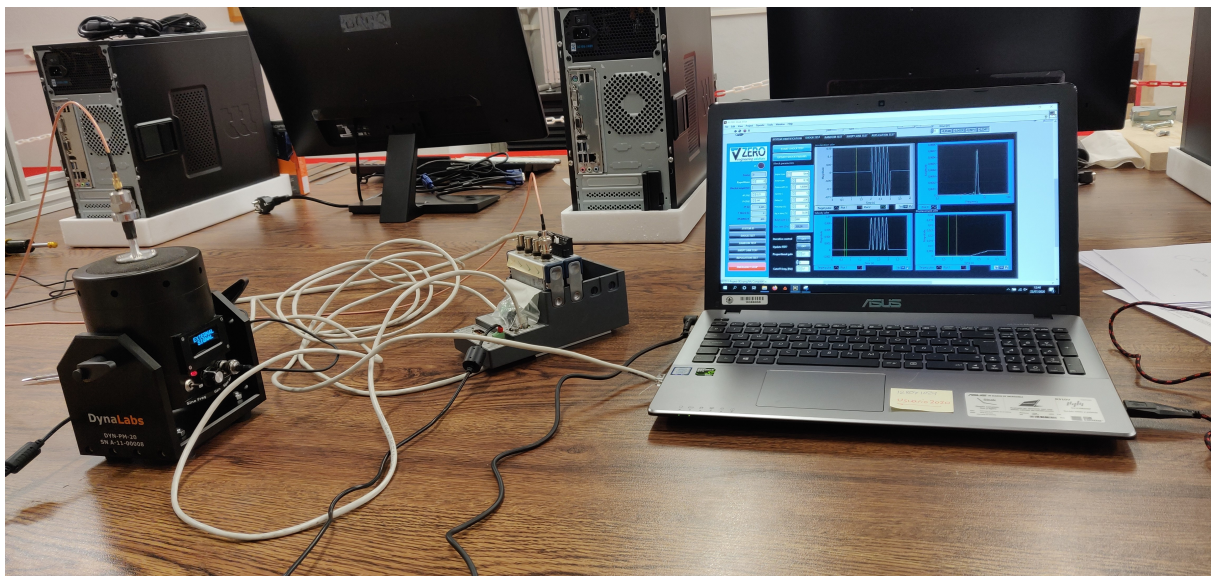


Figura 4.36: Conexionado para la identificación del sistema.

Seguidamente, a través de la aplicación Real Time, el usuario pone en marcha el actuador y comprueba que y tanto el funcionamiento del dispositivo como la captación de la señal de aceleración de salida del shaker son correctos, sirviéndose de una señal senoidal de consigna de tensión, frecuencia y offset ajustable que la CompactRIO transmite al shaker (Figura 4.37).

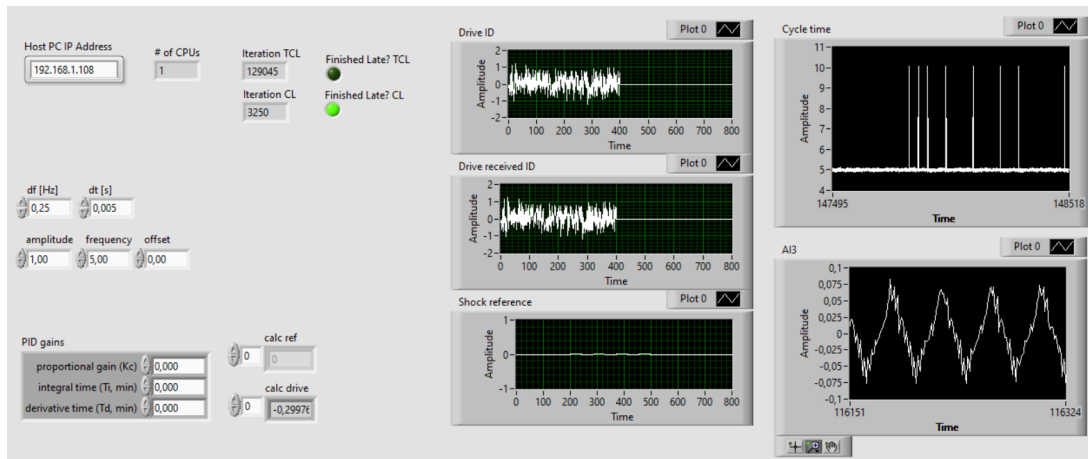


Figura 4.37: Aplicación Real Time.

Con el actuador ya en marcha el usuario hace uso del módulo de identificación del sistema, incluida en la aplicación Host (Figura 4.38). Para el modelado del shaker el software realiza una función de respuesta en frecuencia FRF utilizando como parámetros de interés por un lado la ganancia de amplitud entre la aceleración de salida del actuador y la señal analógica de entrada, y por el otro la frecuencia de la señal de entrada.

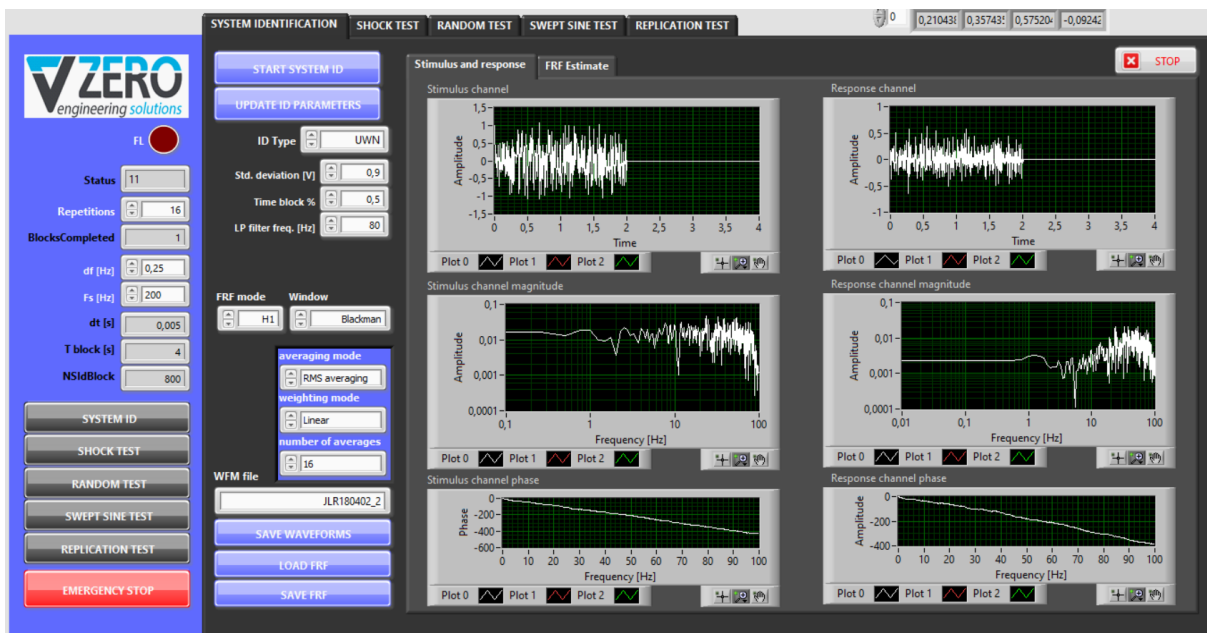


Figura 4.38: Módulo de identificación.

Para realizar en ensayo se debe definir en primer lugar, la naturaleza de los bloques de señal de entrada. Para la identificación del shaker DynaLabs se han utilizado 16 bloques de señal UWN [2] o señal uniforme de ruido blanco con una desviación estándar de 1 V con un 50 % de tiempo con datos en la señal (Figura 4.39).

Para la estimación de la función de respuesta en frecuencia se ha configurado el post-procesado de los registros temporales de la señales, aplicando para ello el estimador H1, el cual considera que el ruido en la señal de entrada es nula y que todos sus valores registrados en el programa son exactos [35]. También se ha incluido en el post-procesado de los datos una función ventana, en este caso BlackMan, que tiene la misión de evitar discontinuidades al principio y fin de cada bloque de señal [12]. Adicionalmente se han definido el número y método de cálculo de medias, la frecuencia de muestreo F_s y el diferencial de frecuencia df .

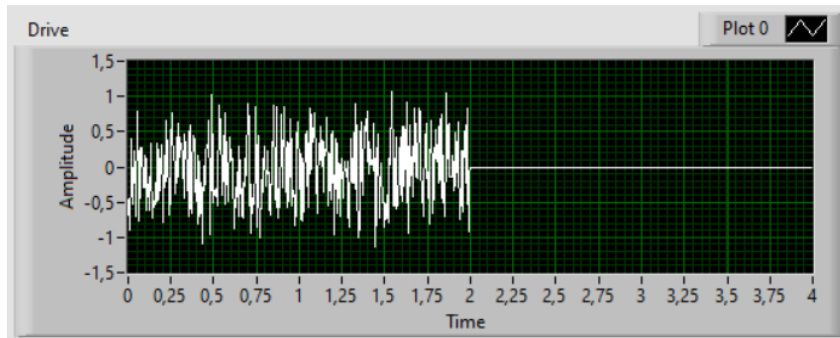


Figura 4.39: Bloque de señal UWN de entrada.

Una vez realizado el ensayo se muestra en pantalla la estimación de la FRF en su magnitud y fase (Figura 4.40), incluyendo adicionalmente la función de coherencia, que relaciona la correlación lineal en frecuencia entre la entrada y las respuesta del dispositivo [33]. A partir de los resultados obtenidos el software realiza la conversión de la FRF en un modelo matemático a partir de métodos paramétricos, obteniendo la función transferencia del sistema [1]. Al invertir y cargar dicha función en la CompactRIO, se establece el control de aceleraciones en lazo abierto para el Shock Test.



Figura 4.40: FRF obtenida en la identificación del sistema.

4.4.2. Validación del sistema

Tras identificar el sistema e implantar la función transferencia al controlador externo, el usuario hace uso del módulo de replicación (Figura 4.43) para generar los desplazamientos en control de aceleraciones y observar el nivel de correlación entre la señal de consigna y la aceleración de salida del shaker.

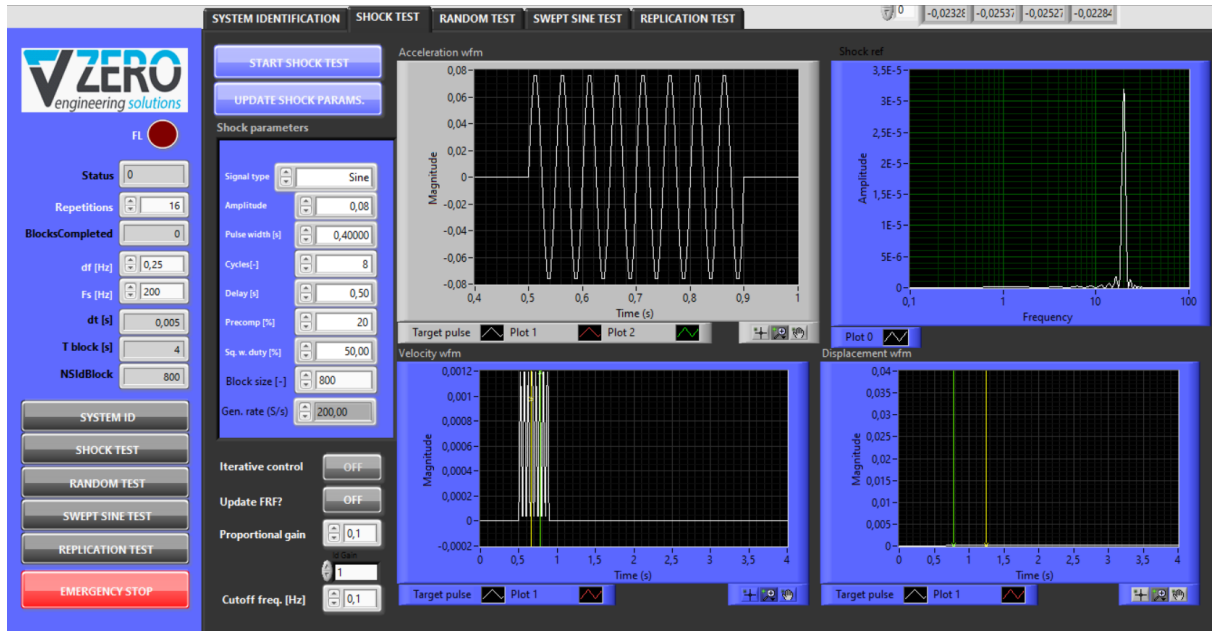


Figura 4.41: Módulo de replicación.

A través de la interfaz se genera la señal de consigna a realizar, especificando el tipo de pulso (sinusoidal, triangular, diente de sierra ect.), la amplitud, la duración de los pulsos, número de ciclos y el retardo al inicio de cada bloque entre otras opciones. Al igual que en el módulo de identificación es imprescindible definir el número de bloques de señal, así como la frecuencia de muestreo y el diferencial de frecuencia. En la Figura 4.42 el software muestra un bloque de señal manipulada de salida del controlador externo que será introducido en el shaker al realizar el ensayo, calculada con acorde a la configuración establecida en el módulo de replicación y a la modelación realizada anteriormente.

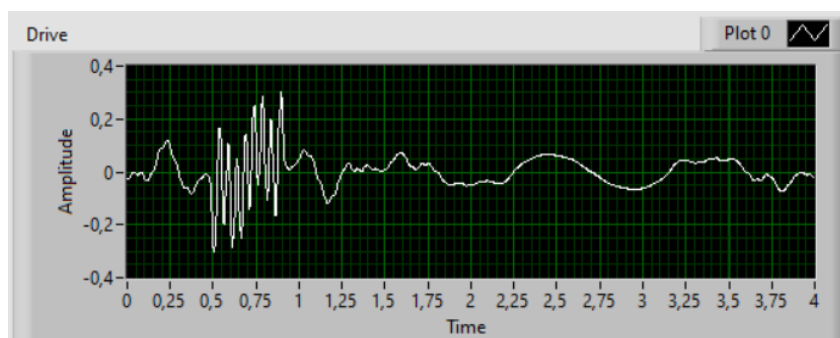


Figura 4.42: Señal de entrada al shaker.

En cuanto a la señal a reproducir es posible importar un perfil de aceleraciones personalizado a través de un archivo de texto, siempre y cuando el incremento temporal y el tamaño de bloque coincidan con los declarados en el programa de control. En la primera columna debe corresponderse a la de tiempos, mientras que la segunda debe indicar la magnitud a reproducir.

Una vez realizado el ensayo de replicación se muestra en pantalla el perfil de aceleraciones obtenido en cada bloque de datos comparada con la señal de salida de referencia, como se observa en la Figura 4.43.

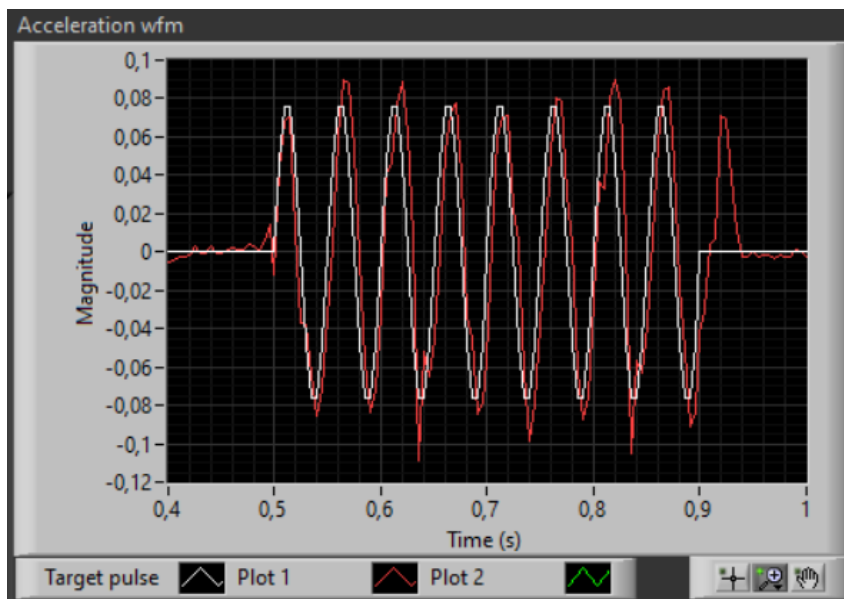


Figura 4.43: Perfil de aceleraciones obtenido.

Aunque se ha comprobado que es posible realizar una inversión de sistema a diversos dispositivos con resultados relativamente prometedores, ha sido imposible aplicar este método de implementación de control de aceleraciones en lazo abierto en los motores lineales LinMot de forma satisfactoria, debido a los siguientes motivos:

- La frecuencia de procesamiento del controlador CompactRIO no es lo suficientemente elevada para proporcionar la frecuencia de muestreo necesitada por parte del módulo de control de motor.
- La CompactRIO 9076 solo cuenta con 1 núcleo de procesamiento, insuficiente para cumplir los requerimientos de procesamiento de señales del servo controlador.
- El controlador consta de una resolución de 12 bits, inferior a la resolución utilizada por el drive de control.
- La complejidad inherente al funcionamiento del drive, que consta de un control en posición en lazo cerrado del actuador, dificulta en gran medida la obtención de una función transferencia que asemeja de forma fiel al funcionamiento del sistema.

5. Experimentación

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento del excitador inercial se han realizado una serie de ensayos para monitorizar el desempeño del sistema en los diferentes modos de desplazamiento principales: Modo analógico, modo curva sinusoidal y modo corriente. Para dichos ensayos se ha optado por colocar el motor lineal en modo horizontal. En el Anexo A.3 se hace una descripción de la configuración de los equipos.

A la hora de realizar los ensayos con el motor lineal se han presentado ciertas limitaciones técnicas que han limitado la amplitud, frecuencia de la señal o seno de consigna, así como la corriente máxima de entrada al actuador en el modo corriente:

- El vibrómetro láser utilizado para registrar desplazamientos tiene un valor mínimo del rango de medida de 59,3 mm y un límite superior de medida de 178,3 mm. En el mejor de los casos el transductor no será capaz de registrar desplazamientos completos que posean una amplitud de movimiento mayor de 60 mm.
- Para maximizar la amplitud máxima medible, el vibrómetro ha sido colocado aproximadamente a 12 mm de la Home Position, lo que provoca que dicho transductor se sitúe sobre el rango de acción de movimientos del estátor sobre el vástago (Figura 5.1). Se ha tenido especial cuidado con el valor de la corriente máxima de bobinado del motor en el modo corriente, debido a que el control de posición está desactivado y un desplazamiento imprevisible de gran amplitud y fuerza podía colisionar de forma enérgica con el transductor.

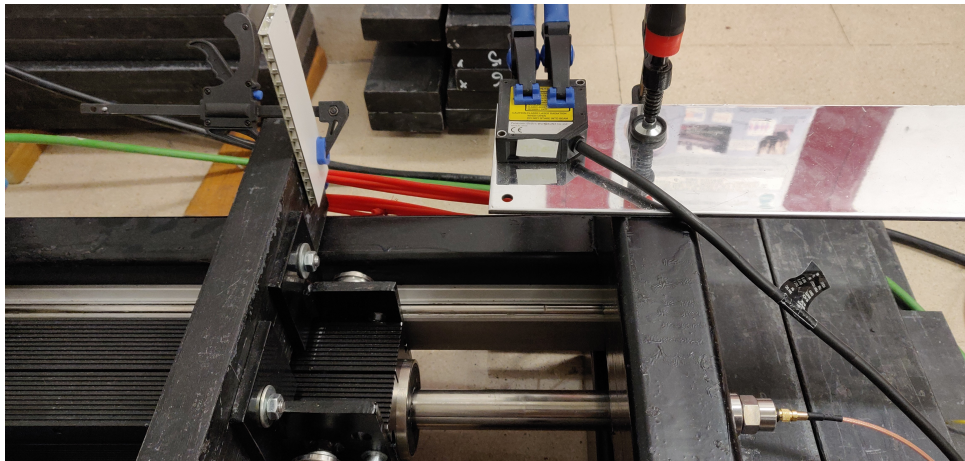


Figura 5.1: Posicionamiento del láser.

- La falta de implementación de un sistema eficaz de disposición de masas fija que inmovilizara de forma completa el bloque fijo del excitador (Figura 5.2) provoca que el bastidor experimente desplazamientos y vibraciones no deseadas en caso ejecutar de perfiles de movimiento con elevada cinética, lo que puede llegar a invalidar los datos captados por el acelerómetro acoplado al bloque móvil. Este fenómeno limita los valores máximos combinados de amplitud y frecuencia de la señal de consigna, así como la corriente máxima de entrada al motor en el modo especial.

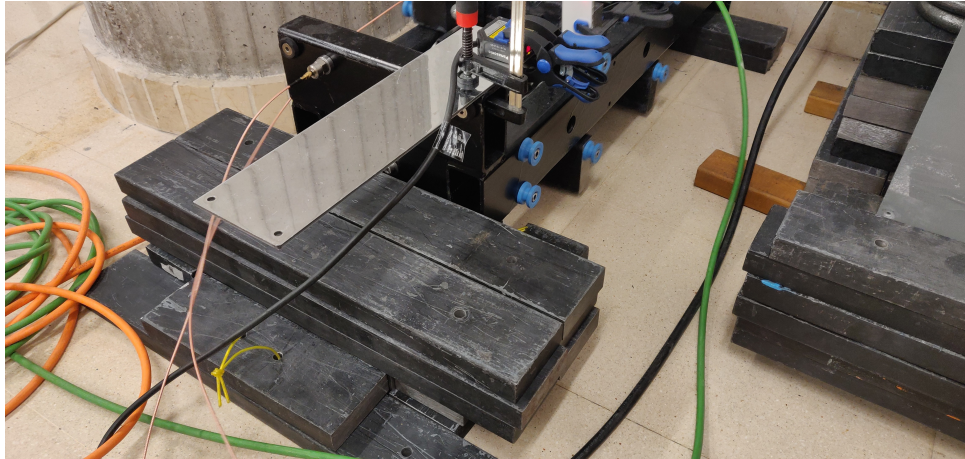


Figura 5.2: Sistema de fijación del bastidor.

Se recomienda aplicar amplitud nula a la señal senoidal de consigna al inicio y fin de las grabaciones de datos con el objetivo de evitar sacudidas fuertes por parte del motor lineal, especialmente al trabajar en modo corriente.

5.1. Modo analógico

Se han realizado una serie de 3 ensayos distintos con el excitador inercial en modo analógico, aplicando las siguientes señales analógicas de consigna:

1. Señal senoidal de frecuencia 1,5 Hz y amplitud 0,77 V, lo que equivale a un desplazamiento de amplitud 10 mm.
2. Señal senoidal de frecuencia 1,5 Hz y amplitud 3,84 V, equivalente a un desplazamiento de amplitud 50 mm.
3. Señal senoidal de frecuencia 4 Hz y amplitud 0,77 V, lo que equivale a un movimiento de amplitud 10 mm.

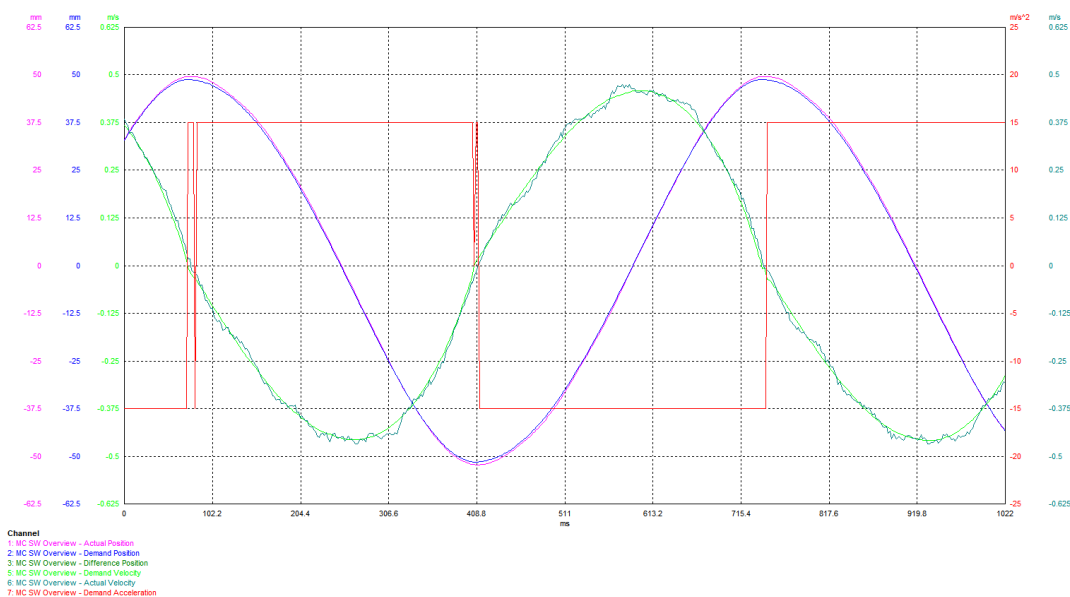


Figura 5.3: Visualización del modo analógico en el osciloscopio LinMot.

En la Figura 5.3 se muestra, a partir del osciloscopio incluido en el proyecto LinMot, la evolución de los parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración del motor lineal al encontrarse en modo analógico con una señal de consigna senoidal. Se puede observar que la curva de demanda de aceleración se encuentra limitada por las condiciones de contorno del interpolador VA en lo referente a los valores fijos de aceleración y desaceleración, con un valor de 15 m/s^2 en ambos casos.

En la Figura 5.4 se observa el desempeño del motor lineal para el ensayo 1. Se aprecia que a movimientos de baja amplitud y frecuencia, el motor lineal no es capaz de reproducir de forma totalmente fidedigna la trayectoria senoidal de la señal analógica de entrada. En cuanto a la evolución de la aceleración captada por el acelerómetro acoplado a la masa móvil, la curva está formada por la superposición de dos ondas. La primera onda corresponde a un movimiento ondulatorio de amplitud relativamente constante del orden de 2 m/s^2 y de alta frecuencia en comparación con la señal de consigna. La segunda onda se aproxima a una onda sinusoidal desfasada aproximadamente 180 grados con respecto a la curva de desplazamiento.

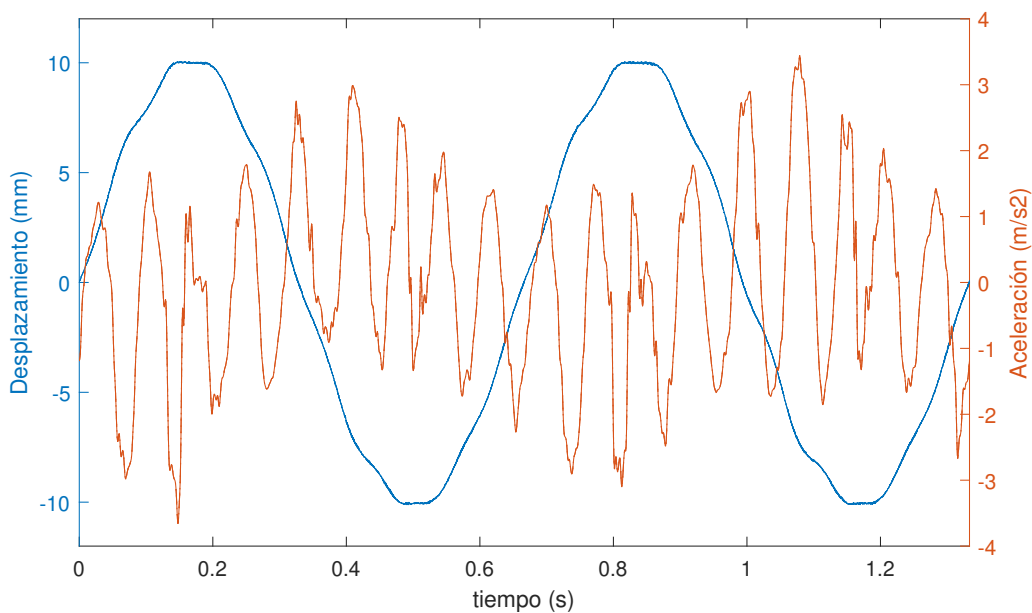


Figura 5.4: Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 1.5 Hz.

Aumentando la amplitud hasta los 50 mm, se aprecia una mejora significativa de la trayectoria senoidal del motor lineal. En cuanto a la aceleración de la masa móvil la onda inicialmente ondulatoria se ha transformada en una señal ruidosa que acompaña a la onda que se encuentra fase invertida con respecto a la curva de desplazamiento (Figura 5.5). Este ensayo muestra también que los valores de la aceleración aumentan con el incremento de la amplitud de la señal de entrada al servo controlador.

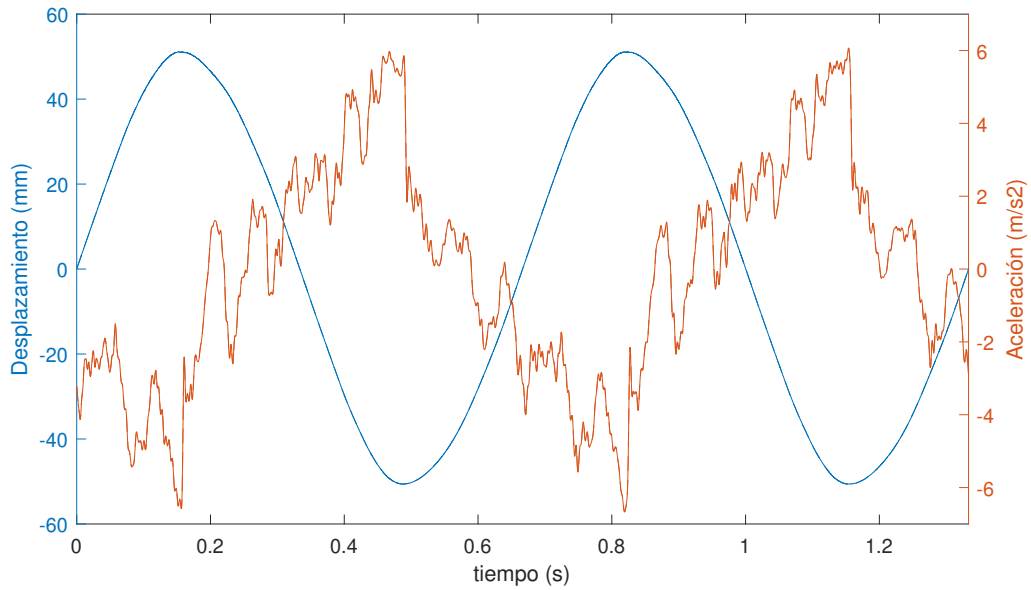


Figura 5.5: Modo analógico con amplitud 50 mm y frecuencia 1.5 Hz.

Si en lugar de aumentar la amplitud, se decide incrementar la frecuencia hasta los 4 Hz, se observa también una mejora en la reproducción de la curva de desplazamiento senoidal por parte del actuador. Con respecto a la evolución de la aceleración, es la curva que menor ruido presenta con respecto a los ensayos anteriores, pudiéndose aproximar a una senoide con un desfase de 180 grados con respecto al desplazamiento (Figura 5.6). Se observa que la amplitud de la señal de aceleración también aumenta con la frecuencia de la señal analógica de consigna.

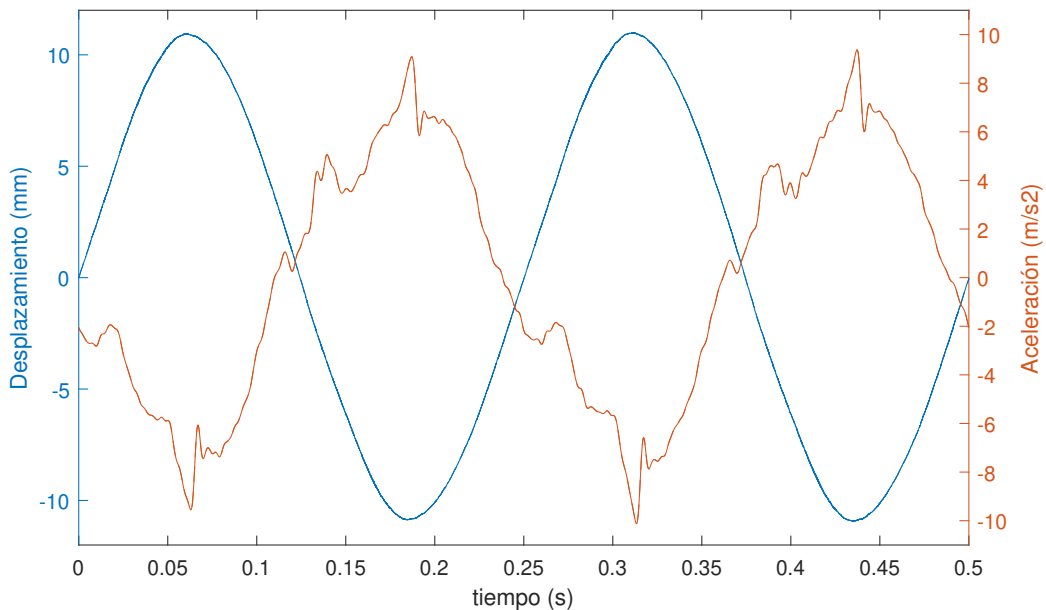


Figura 5.6: Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 4 Hz.

La ejecución del desplazamiento del motor lineal con respecto a la señal de consigna no es inmediata sino que se experimenta un retardo estimado entre 1 y 2 centésimas de segundo. Para el ensayo de mayor frecuencia, de 4 Hz, esto supone un desfase entre señales de 0.35 radianes aproximadamente (Figura 5.7).

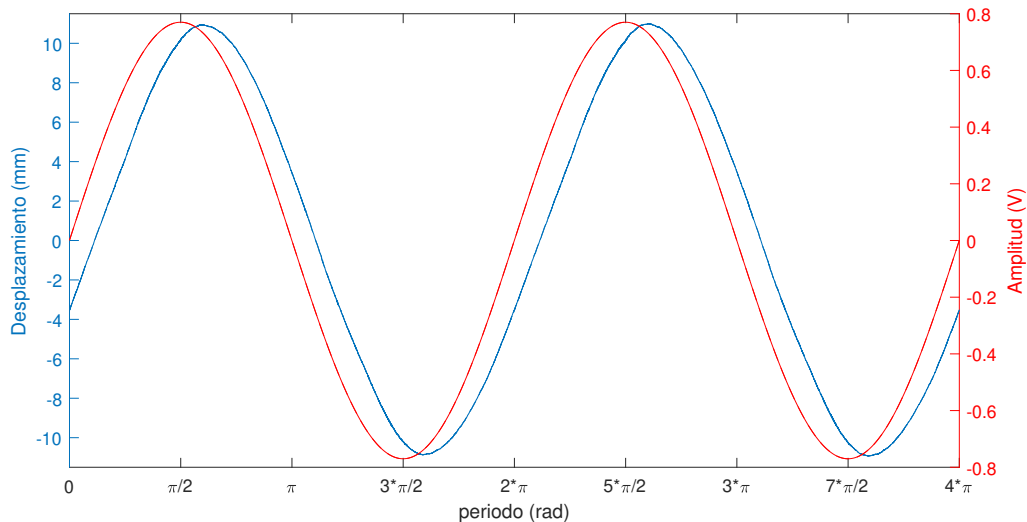


Figura 5.7: Desfase entre la señal de consigna y de salida del actuador.

5.2. Modo curva sinusoidal

De forma similar al modo analógico se han realizado una total de 3 ensayos con el motor lineal en modo curva, con el objetivo de replicar las siguientes curvas:

1. Desplazamiento sinusoidal de amplitud 10 mm y frecuencia 1.5 Hz.
2. Desplazamiento sinusoidal de amplitud 50 mm y frecuencia 1.5 Hz.
3. Desplazamiento sinusoidal de amplitud 10 mm y frecuencia 4 Hz.

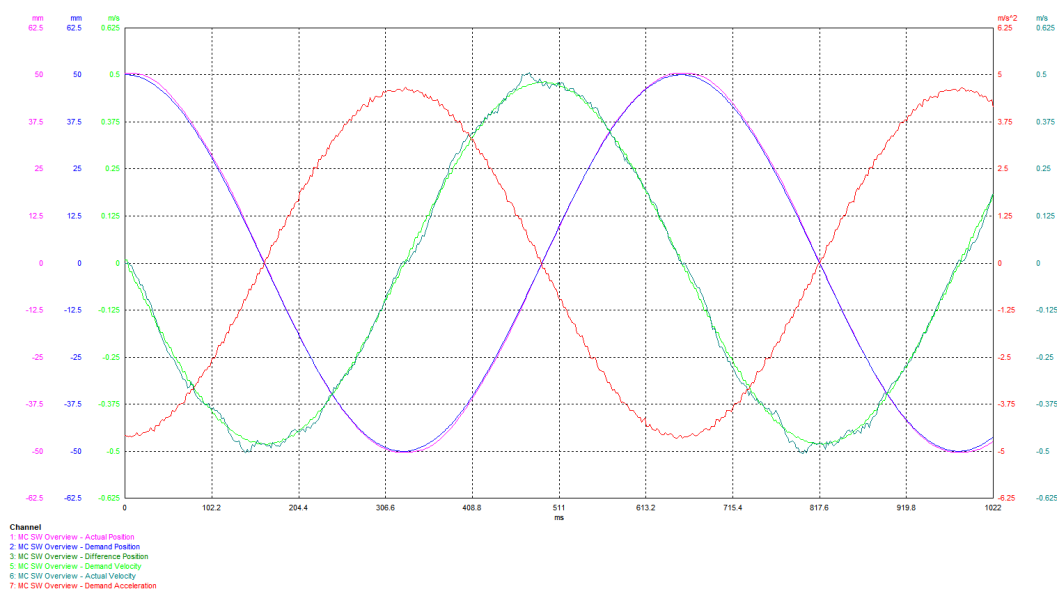


Figura 5.8: Visualización del modo curva en el osciloscopio LinMot.

Observando los parámetros de movimiento a través del osciloscopio del software Lin-Mot (Figura 5.8) se puede comprobar que en el modo curva sinusoidal la curva de demanda de aceleración no posee las restricciones que se presentan en el modo analógico. La aceleración presenta una curva senoidal en oposición de fase con la onda de desplazamiento, equivalente a la derivada segunda de la función de movimiento.

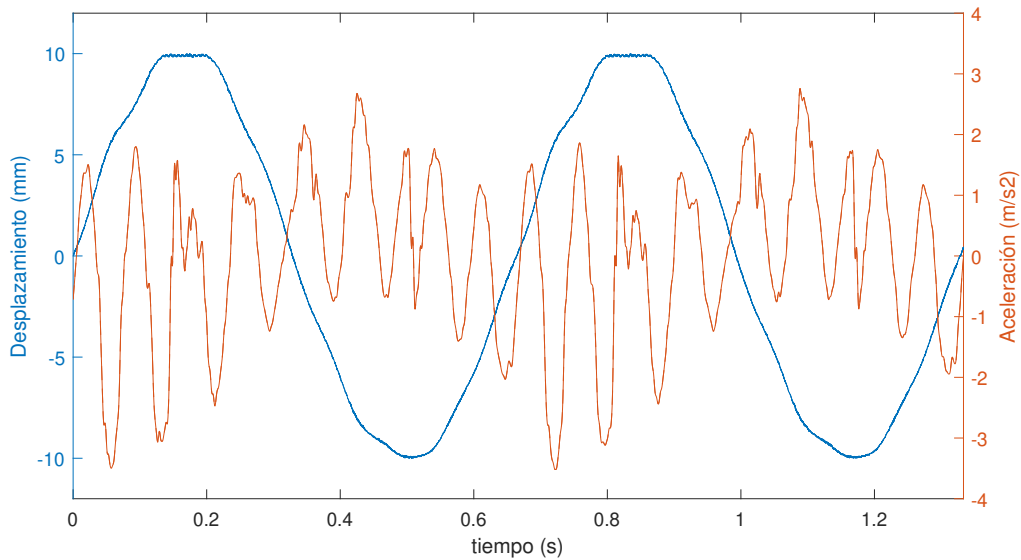


Figura 5.9: Modo curva con amplitud 10 mm y frecuencia 1.5 Hz.

La Figura 5.9 se muestra los datos registrados en el ensayo 1 del modo curva. Tanto el error en la trayectoria con respecto a la curva de desplazamiento almacenada en el módulo de control, como la evolución de la curva de aceleración, es muy similar a los resultados obtenidos en el ensayo equivalente en el modo analógico.

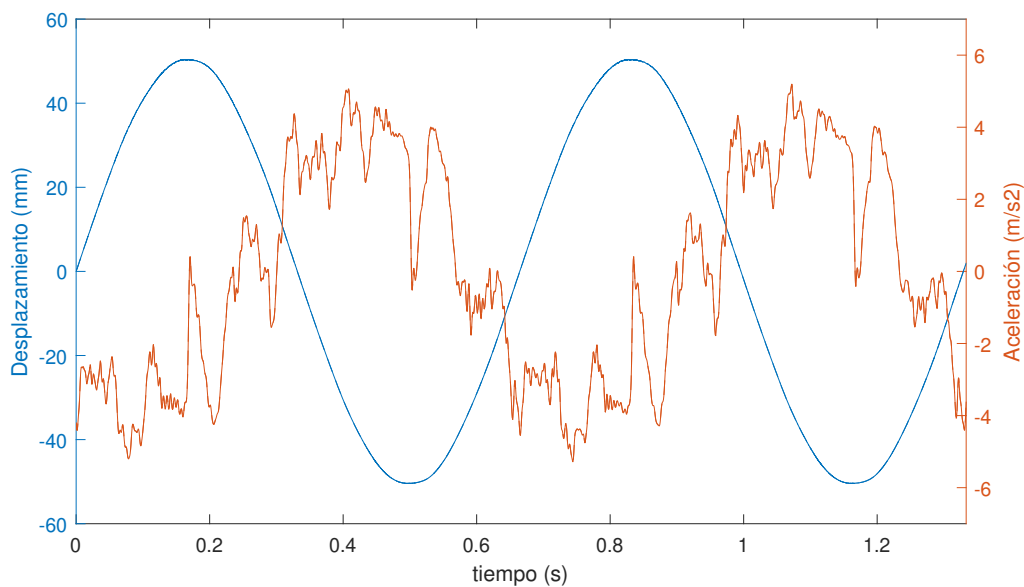


Figura 5.10: Modo curva con amplitud 50 mm y frecuencia 1.5 Hz.

Al aumentar la amplitud se reduce el error en la trayectoria de desplazamiento y una disminución de las ondulaciones presentes en la curva de aceleración, obteniendo una señal ruidosa con cierta similitud con una curva senoidal desfasada 180 grados (Figura 5.10). Se aprecia gran similitud en los resultados obtenidos entre los modos analógico y curva.

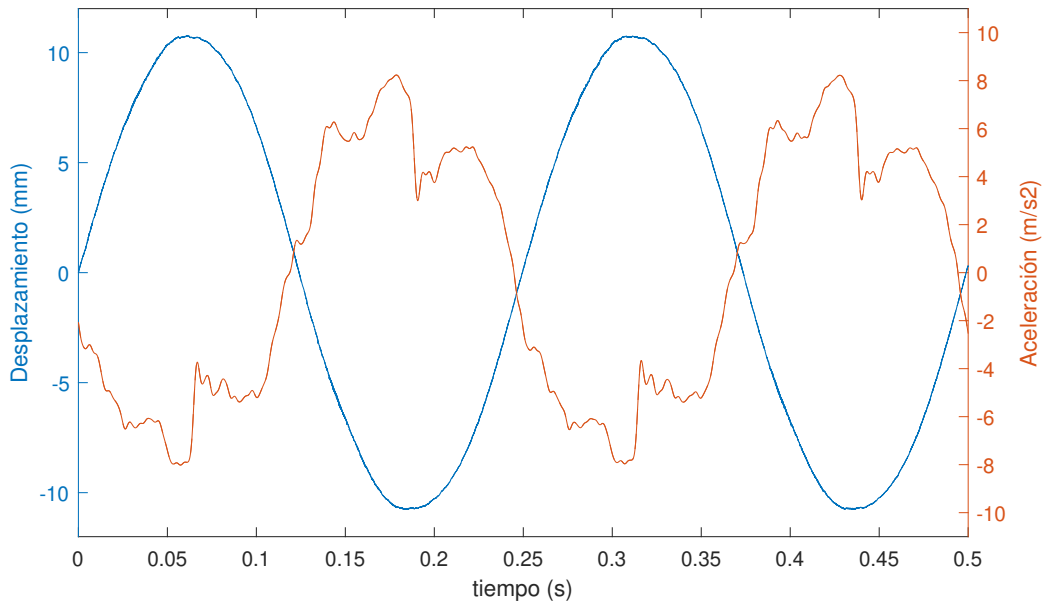


Figura 5.11: Modo analógico con amplitud 10 mm y frecuencia 4 Hz.

Si se decide incrementar la frecuencia con respecto al ensayo 1, se obtiene un desplazamiento con una trayectoria más ajustada a la curva senoidal a reproducir. También se elimina la ondulación y la presencia de ruido con respecto a la señal captada por la acelerómetro (Figura 5.11).

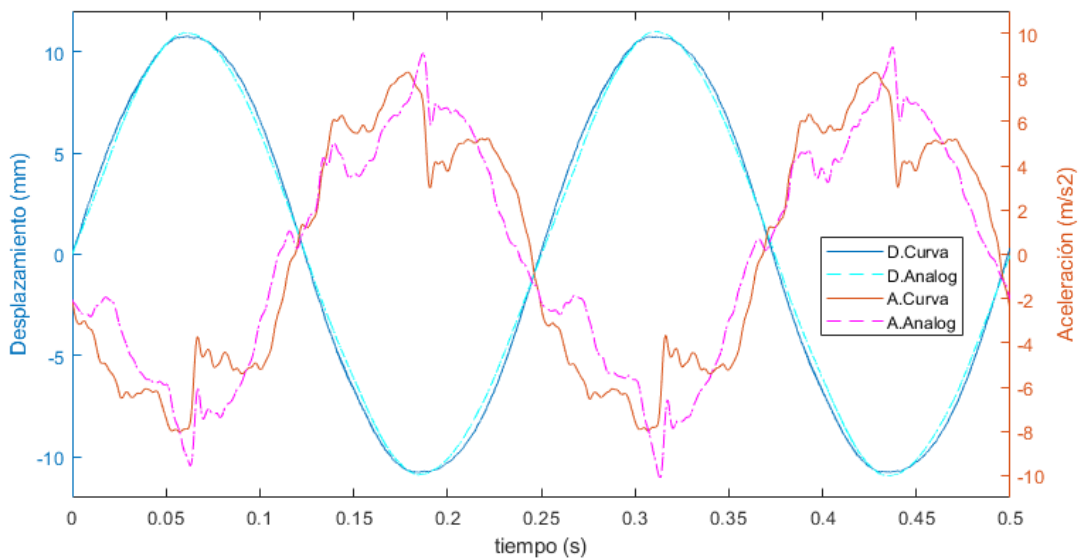


Figura 5.12: Comparación en el ensayo 3 de los modos analógico y curva.

En la Figura 5.12 se realiza una comparación entre los datos registrados en el ensayo 3 para cada modo de funcionamiento en control de posición utilizado. En lo que respecta a la evolución de la aceleración del motor lineal, no se aprecian diferencias muy significativas entre el modo analógico y curva.

El modo analógico presenta un mayor sobrepico cuando el desplazamiento alcanza la amplitud máxima, lo que supone un incremento de 2 m/s^2 con respecto valor máximo de aceleración al modo curva, que presenta un pico más atenuado seguido de una mayor bajada del valor de la aceleración tras invertir el sentido del movimiento.

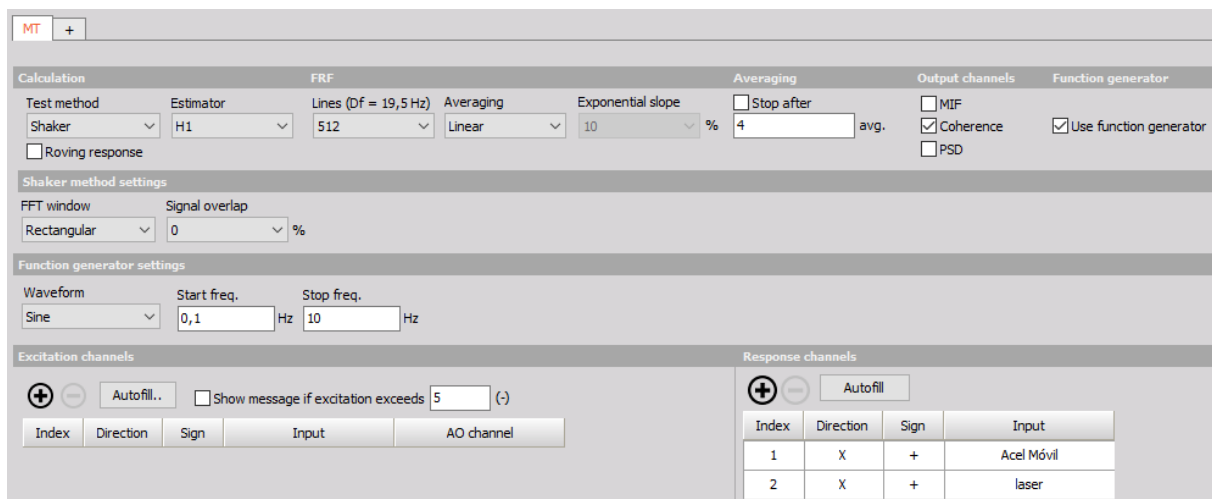


Figura 5.13: Configuración del análisis modal en Dewesoft X3.

Vistos los ensayos se concluye que las limitaciones del interpolador VA no suponen en la práctica grandes diferencias en el desempeño del motor lineal que justifique el uso del modo curva con respecto al modo analógico.

Hay que tener en cuenta que muchos equipos de adquisición de datos cuentan con módulos de análisis modal para determinar las frecuencias y modos propios de una estructura, los cuales utilizan señales de entrada analógicas periódicas para realizar barridos de frecuencia y así obtener la función de respuesta en frecuencia de la estructura (Figura 5.13).

Imponer el uso del modo curva supone un complejidad adicional para la realización del análisis modal experimental que no compensa la supuesta mejora a la hora de reproducir la curva senoidal periódica de consigna.

5.3. Modo corriente

Se han realizado una serie de 3 ensayos con distintas señales analógicas de consigna para comprobar como se comporta el excitador inercial durante el modo corriente:

1. Señal senoidal de frecuencia de amplitud 2 V y frecuencia 1.5 Hz.
2. Señal senoidal de frecuencia de amplitud 2 V y frecuencia 6 Hz.
3. Señal senoidal de frecuencia de amplitud 5 V y frecuencia 6 Hz.

Para la realización de dichas pruebas se ha limitado a 8 A la corriente máxima de entrada al actuador, lo que supone solo un uso del de 25 % con respecto a la corriente límite máxima que es capaz de utilizar el motor lineal para la generación de la fuerza electromagnética. A efectos prácticos aumentar el amperaje máximo de entrada al bobinado del estátor es equivalente a incrementar la amplitud de la corriente analógica de consigna.

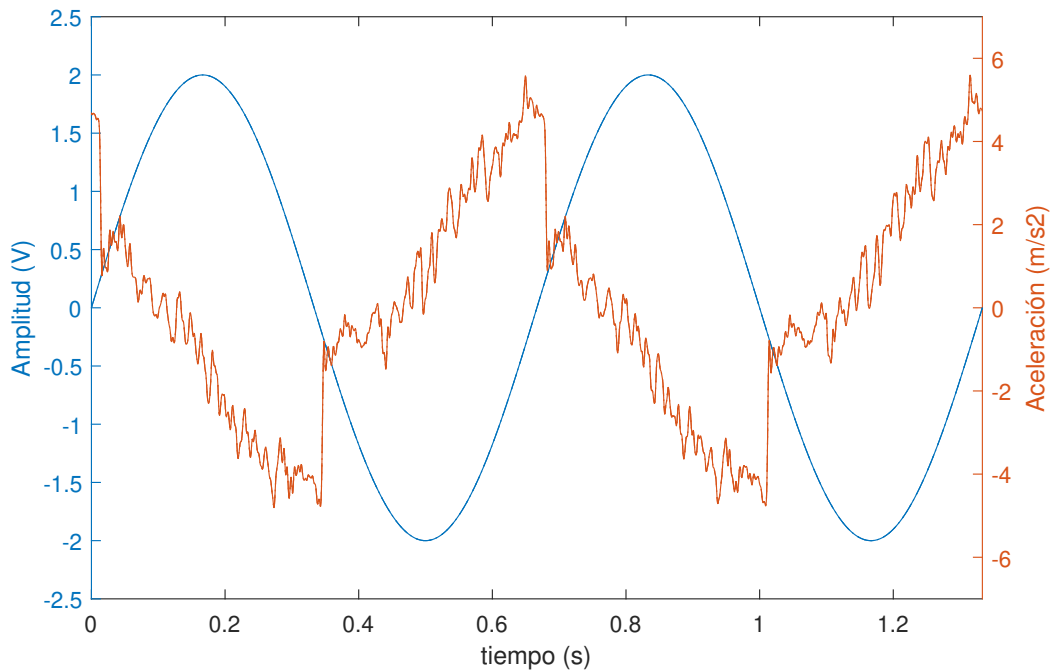


Figura 5.14: Aceleración modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 1.5 Hz.

En la Figura 5.14 se muestra la aceleración captada por el acelerómetro de la masa móvil en con respecto a la señal de entrada al servo controlador el ensayo 1. La curva de aceleración presenta un desfase de más de 180 grados con respecto al seno de consigna. Adicionalmente se puede comprobar que dicha curva de la aceleración no consigue reproducir la señal senoidal de forma fiel, experimentado un crecimiento de cierta linealidad y gran cantidad de ruido, seguido de un rápido descenso tras alcanzar el valor máximo, cercano a los 6 m/s^2

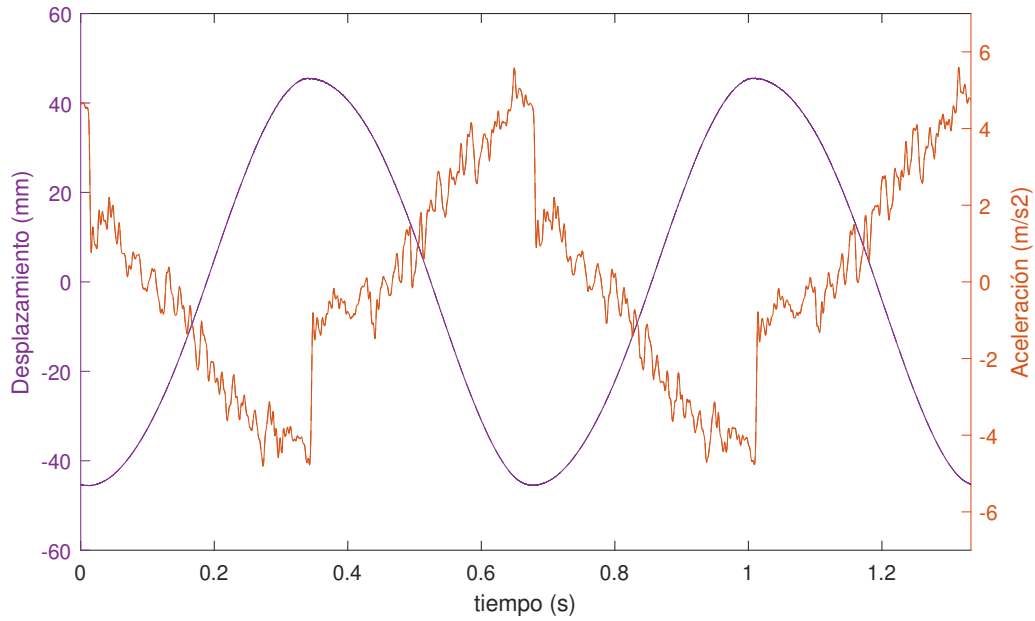


Figura 5.15: Desplazamiento modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 1.5 Hz..

En cuanto al desplazamiento obtenido, presenta movimiento semejante a una onda senoidal, invertida en fase con respecto a la curva de aceleraciones. Se aprecia que la disminución brusca de la aceleración coincide con el cambio de sentido del desplazamiento. A pesar de ser un ensayo con una amplitud de señal analógica y corriente trifásica máxima de bajo valor, se ha obtenido un desplazamiento con una amplitud cercano a los 50 mm.

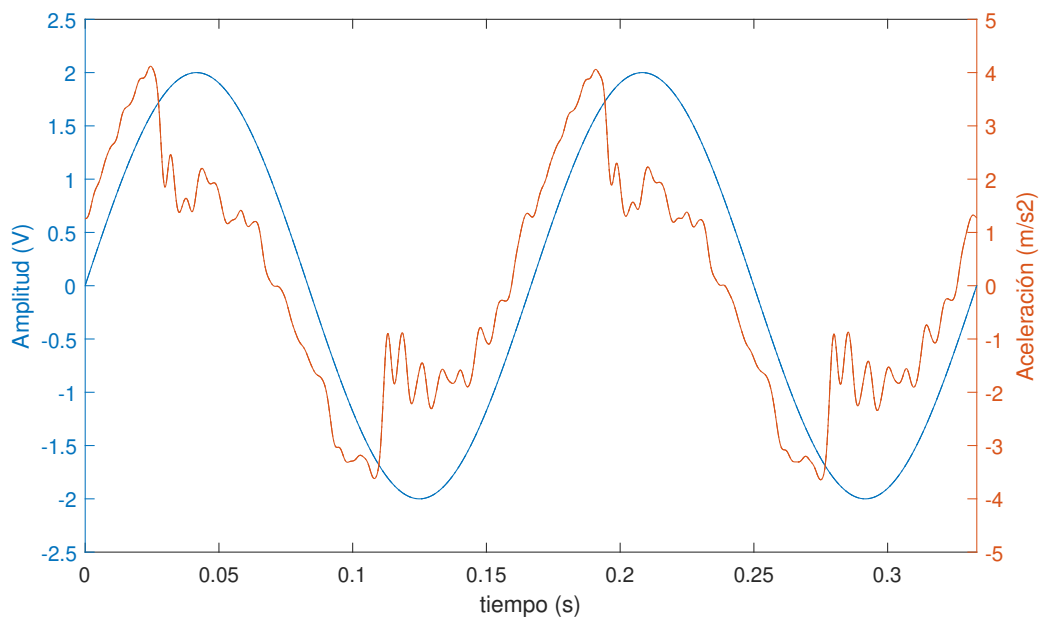


Figura 5.16: Aceleración modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 6 Hz.

Al incrementar la frecuencia con respecto al ensayo 1, se puede observar que en condiciones de estacionario hay una reducción del desfase relativo entre la curva de aceleraciones y la señal analógica de consiga. La aceleración obtenida presenta un forma más propia de onda senoidal, con un grado de similitud mucho mayor que los obtenidos en los ensayos con el controlador de posición en modo analógico y curva sinusoidal (Figura 5.16). Destacar que hay una disminución de aproximadamente un tercio del valor de aceleración máxima con respecto al ensayo anterior.

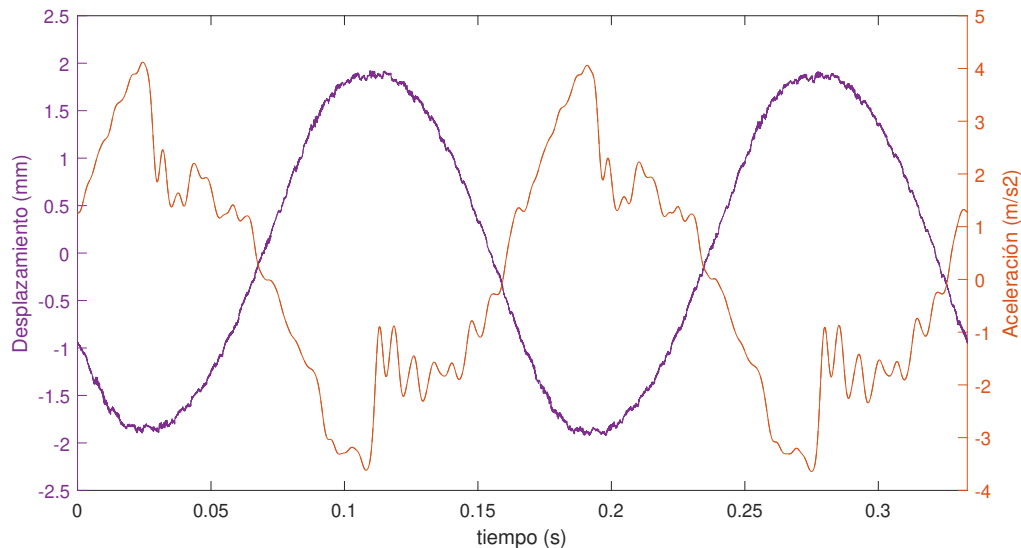


Figura 5.17: Desplazamiento modo corriente con amplitud 2 V y frecuencia 6 Hz.

En lo referente al propio movimiento del estátor, la curva de desplazamiento experimenta una fuerte disminución de su amplitud con el aumento de frecuencia, pasando de oscilar con un rango total de 100 mm hasta reducir su amplitud de movimiento hasta los 2 mm, el más reducido hasta ahora en los ensayos. Como se puede observar en la Figura 5.17, la inversión de fase entre el desplazamiento y la aceleración se mantiene.

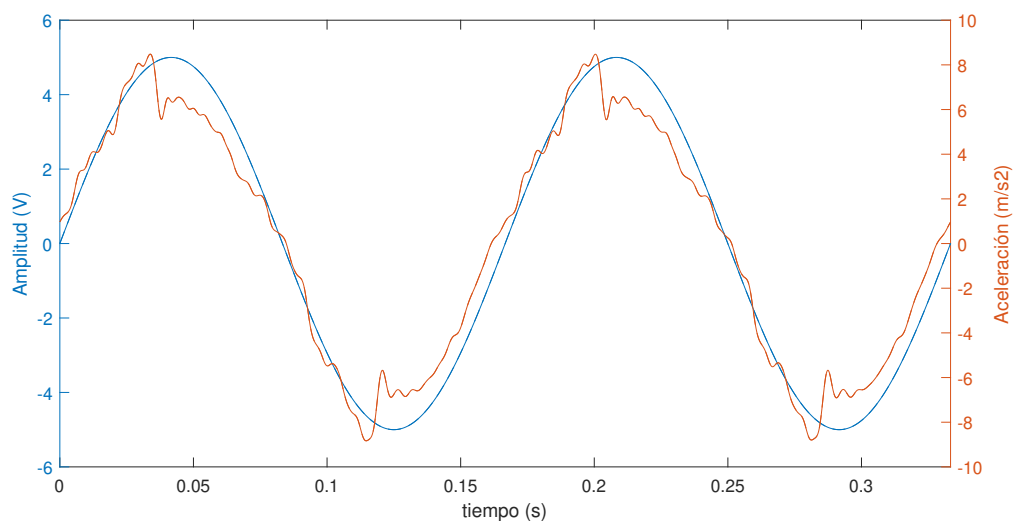


Figura 5.18: Aceleración modo corriente con amplitud 5 V y frecuencia 6 Hz.

Al incrementar de la amplitud de la señal analógica con respecto al ensayo anterior, se ha observado que en condiciones de estacionario la aceleración de la masa móvil logra una apreciable semejanza tanto en forma como en fase con respecto a la curva senoidal de entrada al drive, como se puede apreciar en la Figura 5.18. Como era de esperar, se experimenta un incremento en los valores máximos de aceleración, de forma casi proporcional al aumento de la amplitud de la señal analógica.

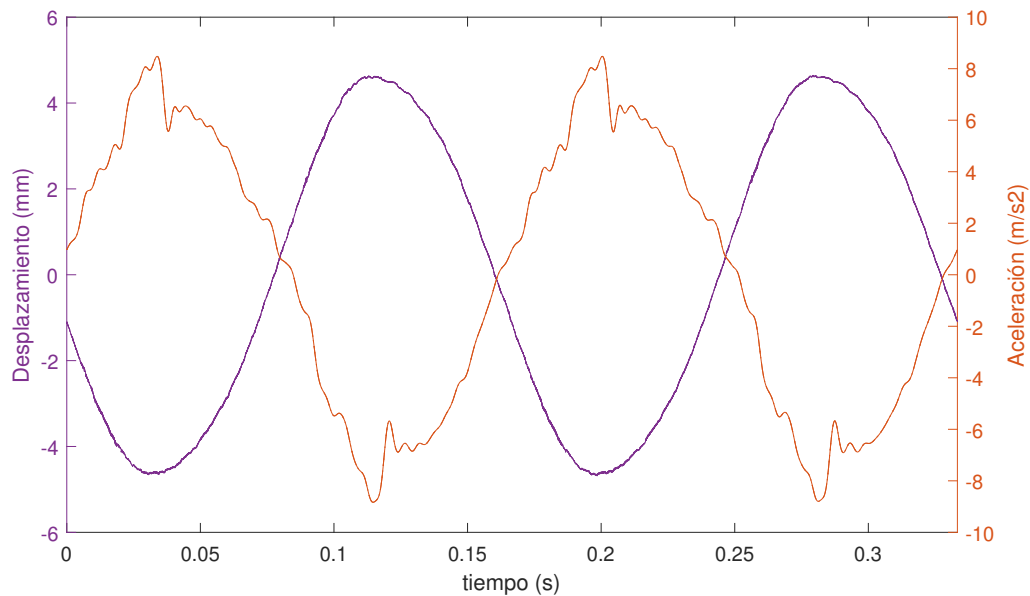


Figura 5.19: Desplazamiento modo corriente con amplitud 5 V y frecuencia 6 Hz.

La Figura 5.19 muestra que la curva desplazamiento obtenido se asemeja, al igual que los ensayos anterior en el modo corriente, a una curva sinusoidal en fase invertida con respecto a la aceleración. Al igual que la aceleración, el rango total de desplazamiento ha aumentado de forma proporcional a la amplitud de la señal de consigna con respecto al ensayo anterior.

Vistos los ensayos el modo corriente, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- El motor es capaz de reproducir un perfil de aceleraciones con relativa exactitud con respecto a una señal periódica de consigna bajo ciertas condiciones de amplitud y frecuencia, mejorando la respuesta obtenida a medida que se incrementan dichos parámetros además de la corriente máxima de entrada al actuador (Figura 5.20).
- A frecuencia constante los valores de aceleración y desplazamiento son proporcionales a la amplitud de la señal analógica de consigna, lo que facilita predecir el funcionamiento del motor bajo esta premisa.

- Aún con amplitud constante, tanto la aceleración del bloque móvil como el desplazamiento obtenido varían en amplitud de forma no lineal con respecto a la frecuencia de la señal de consigna. Dicho fenómeno presenta inconvenientes para su aplicación como mesa sísmica, donde se necesitan determinados valores de aceleración a frecuencia variable para la reproducción de acelerogramas.
- En la mayoría de casos la aceleración captada en el modo corriente se ajusta de forma más precisa a la función senoidal periódica con respecto a los modos de control de posición. Sin embargo hay que tener en cuenta que los niveles de ruido y aleatoriedad de la señal de aceleración de entrada utilizada para el análisis de la función de respuesta en frecuencia de una estructura no son relevantes siempre y cuando se haga un barrido de todo el rango de frecuencias de interés. En este sentido, el modo corriente no supone una ventaja con respecto a los modos analógico y curva senoidal.
- La eliminación del lazo cerrado proporciona una respuesta con menos retardo con respecto a los modos de funcionamiento con control de posición.
- La amplitud de movimiento que experimenta el motor lineal a bajas frecuencias es demasiado elevada para un uso seguro.

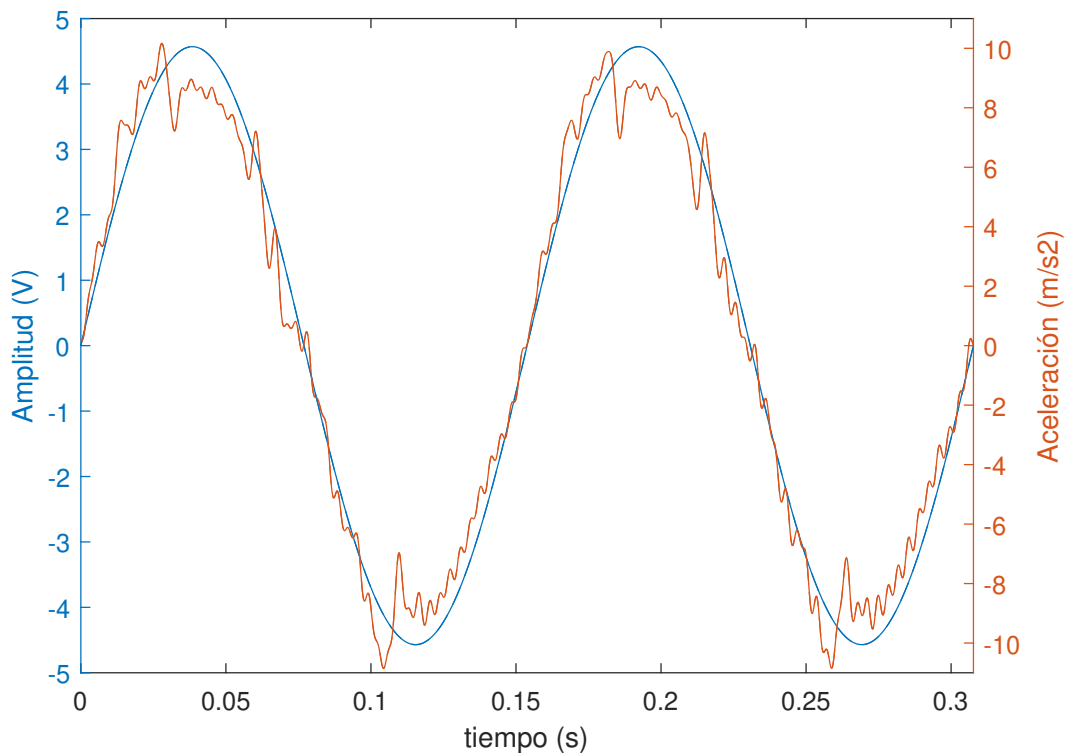


Figura 5.20: Modo especial con corriente max. 9 A y señal de 4.6 V y 6.5 Hz.

6. Conclusiones y líneas de futuro

En base a los resultados obtenidos en el Capítulo 5 y las incidencias comentadas en el Capítulo 4, se puede extraer una serie de conclusiones acerca del proyecto realizado.

En primer lugar hay que indicar que el excitador inercial es capaz de generar de forma satisfactoria una señal de excitación medible y relativamente controlable con la suficiente amplitud y rango de frecuencias que permita realizar ensayos EMA aplicadas a una estructura real, lo cual era una de las funcionalidades principales requeridas para el desarrollo del dispositivo.

En lo referente al diseño del excitador, se han cumplido todos los objetivos propuestos con respecto a los requisitos dimensionales y mecánicos del sistema, a excepción de la inclusión de un sistema de fijación efectivo del bloque fijo a la superficie de trabajo. Hay que destacar la ligereza y la limitación en dimensiones del bastidor exterior que permite transportar el excitador bifuncional sin necesidad de aplicar un logística compleja. El sistema de guiado de este prototipo ha resultado mucho más efectivo respecto a otras versiones anteriores [5] a la hora de proporcionar un desplazamiento suave sin la presencia de elevadas vibraciones ni momentos inducidos en la propia estructura del excitador.

En lo que respecta a la configuración del módulo de control, se concluye que el desempeño del motor en sus distintos modos de trabajo se ajusta correctamente con las modalidades de funcionamiento previstas en el alcance del proyecto, independientemente de las limitaciones dinámicas que más tarde pueda experimentar en la puesta en marcha y que no dependen de la configuración realizada. La inclusión de los modos analógico, curva y corriente ha sido concluida exitosamente, así como la adición de la botonera exterior con todas sus funcionalidades previstas.

En cuanto al uso del excitador inercial como mesa sísmica, la limitaciones técnicas en cuanto a la frecuencia de procesamiento, número de núcleos y bits de resolución del controlador externo CompactRIO ha hecho imposible la implementación de un control de aceleraciones mediante la inversión del sistema drive+actuador. A falta de utilizar un controlador más potente, la complejidad inherente del módulo de control del motor lineal genera dudas acerca de si de la obtención de una función transferencia que permita implementar el control de aceleraciones en lazo abierto de forma óptima para realizar reproducciones de seísmos. También se ha determinado que el modo corriente no ofrece el suficiente control de las propiedades dinámicas del actuador como para suponer una alternativa realista para realizar ensayos ART de forma exitosa. En cualquier caso el montaje actual permite utilizar la funcionalidad de mesa vibratoria como fuente de excitación para realizar análisis modal experimental a estructuras de pequeño tamaño, y en definitiva cualquier ensayo que no exija un control preciso de la aceleración.

Durante el desarrollo del proyecto se han adquirido o trabajado competencias en diversos campos de la ingeniería:

- Diseño de piezas tridimensionales mediante software CAD con el criterio de facilitar su fabricación y montaje posterior.
- Trabajo y supervisión en taller para garantizar la construcción del excitador de acuerdo a las especificaciones deseadas.
- Manejo del software LinMot-Talk para ajustar la configuración de los distintos protocolos de uso del motor, monitorizando en tiempo real su funcionamiento y pudiendo resolver aquellos eventos imprevistos que puedan ocurrir, utilizando para ello los conocimientos adquiridos acerca del funcionamiento interno del servo controlador.
- Uso de equipo de adquisición de datos para el registro y análisis y post-procesado de los datos de interés del excitador inercial, empleando para ello transductores de diversa naturaleza.

De cara al desarrollo de líneas futuras, se contemplan de forma más inmediata una serie de campos de mejora que tendrían un impacto positivo sobre el funcionamiento del excitador inercial en sus dos funcionalidades principales:

- Instalación de un sistema más eficaz a la hora de restringir los movimientos de traslación y vibraciones del bloque fijo, inmovilizando el bastidor sobre el suelo de la estructura a analizar o sobre la superficie de trabajo en el laboratorio en caso de utilizar el excitador como mesa vibratoria.
- Realizar una caracterización completa del excitador inercial, registrando la evolución de las fuerzas inerciales en función de las propiedades de amplitud y frecuencia de la señal de consigna y la masa móvil adicionada en el bloque móvil del sistema. De esta manera se puede obtener los parámetros de rigidez, amortiguamiento y respuesta en frecuencia del propio excitador inercial que permitirían optimizar y acotar el rango de frecuencias de uso y de masa adicionada donde el comportamiento del dispositivo es más adecuado.
- Implementación del control de aceleraciones en lazo abierto mediante la inversión del sistema, utilizando en esta ocasión un controlador externo con más potencia de procesamiento que permita realizar una identificación adecuada del sistema y validar los resultados obtenidos en el Shock Test.
- La generación de un carcasa, mediante modelado por deposición fundida, que mejore en gran medida el acabado y calidad constructiva general de la botonera externa.

Referencias

- [1] L. Abdullah, Z. Jamaludin, T. H. Chiew, N. A. Rafan, and M. S.Syed Mohamed. System identification of XY table ballscrew drive using parametric and non parametric frequency domain estimation via deterministic approach. *Procedia Engineering*, 41(Iris):567–574, 2012.
- [2] Ivelina Balabanova, Stela Kostadinova, Boyan Karapenev, and Georgi Georgiev. Application of Discriminant Analysis for Signals Identification in Communication Systems. pages 1–8, 2020.
- [3] J Burke, J Finbarr Moynihan, and K Unterkofler. Extraction of high resolution position information from sinusoidal encoders. *Proceedings of the International Intelligent Motion Conference*, pages 217–222, 2000.
- [4] Mariano Cacho. *Metodologías para la estimación de los parámetros modales en pasarelas peatonales: Aplicación a la pasarela del museo de la ciencia de Valladolid*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.
- [5] Víctor Carmona. *Diseño y prototipado de excitador inercial para caracterizar estructuras esbeltas basado en un motor lineal*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2018.
- [6] Carlos Mariano Casado. *Control de vibraciones en estructuras flexibles mediante amortiguadores de masa pasivos , adaptativos semiactivos y activos*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.
- [7] Carlos Casado Sanchez, Jesús De Sebastián Sanz, Iván Muñoz Diaz, Alfonso Poncela Mendez, and Antolín Lorenzana Ibán. Control De Vibraciones En Pasarelas Peatonales. *Dyna Ingenieria E Industria*, 86(3):318–327, 2011.
- [8] Jesús De Sebastian Sanz. *Análisis Del Estado Límite De Servicio Y Control De Vibraciones En Pasarelas Peatonales*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 2012.
- [9] Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. Automatización y el Control. Conceptos.
- [10] Fasten Sistemas. Componentes Para Mobiliario Y Equipamientos Industriales. 2017.
- [11] Juan Manuel Gordo. *Gestión de un motor lineal LinMot mediante interfaz EtherCat*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Valladolid, 2018.
- [12] Y. Kleinman and I. Korn-Lubetzki. Understanding FFTs and Windowing. *Stroke*, 28(7):1467, 1997.
- [13] Larraioz Elektronika. Precisión y dinámica.
- [14] LinMot. Documentation of the DeviceNet Interface of the following User Manual.

- [15] LinMot. Documentation of the Motion Control SW.
- [16] LinMot. E110-vf / e210-vf / e1010-vf / e2010-vf User Manual 2.2.
- [17] LinMot. LINEAR MOTORS P10-70X400U. pages 609–634.
- [18] LinMot. Series E1400.
- [19] LinMot. Technology Function Force Control.
- [20] LinMot. E14x0 V2 Servo Drives Installation Guide. 2016.
- [21] LinMot. Application Note : Loop Tuning. 2017.
- [22] LinMot. LinMot-Talk 6 Configuration Software. 2018.
- [23] LinMot. MotionCtrlSW SG5 SG7 Manual. 2019.
- [24] LinMot. PLC Commissioning of LinMot Servo Drives. (March), 2020.
- [25] LinMot. Practical Applications Serie E1100 & B1100 Controller. 2020.
- [26] Álvaro Magdaleno. *Estudio de nuevos indicadores en el dominio de la frecuencia y del tiempo para la sintonización óptima de TMDs múltiples en estructuras esbeltas*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Valladolid, 2017.
- [27] Luis Pastor, Sánchez F Juan, Luis Díaz De León, Yáñez M Cornelio, and Roberto Herrera Charles. Cuantificación del Error en las Mediciones Debido a la Frecuencia de Muestreo The Error's Quantification in the Measurements Due to Sampling Frequency. *Computación y Sistemas*, 8:86–105, 2004.
- [28] Rodrigo Puertas. *Diseño y prototipado de una mesa sísmica de dos grados de libertad*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2019.
- [29] Vito Renda, Georges Mangonette, Guifo Verzeletti, Flavio Bono, J. Zapico, and F. Molina. Ensayo Sísmico de Estructuras. *Física de la tierra*, (11):285–305, 1999.
- [30] Diego Rodríguez. Análisis sismorresistente mediante el método modal espectral de un edificio habitacional ubicado en la comuna de tomé. *Universidad Católica de la Santísima Concepción*, page 105, 2016.
- [31] Roncancio and Cifuentes. Tutorial de LABVIEW. *Labview Tutorial*, 1:20, 2000.
- [32] Schaeffler Iberia. Guías lineales con rodillos-guía. 2018.
- [33] Pablo Urruticoechea, Alberto Fraile de Lerma, and Javier Fernández. *Análisis del comportamiento dinámico de una estructura ligera sometida a la acción de un peatón*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [34] VATIA. Encoder incremental - Principio de funcionamiento. pages 2–4.
- [35] Peter VERBOVEN. *Frequency-domain system identification for modal analysis*. PhD thesis, Vrije Universiteit Brusel, 2002.