



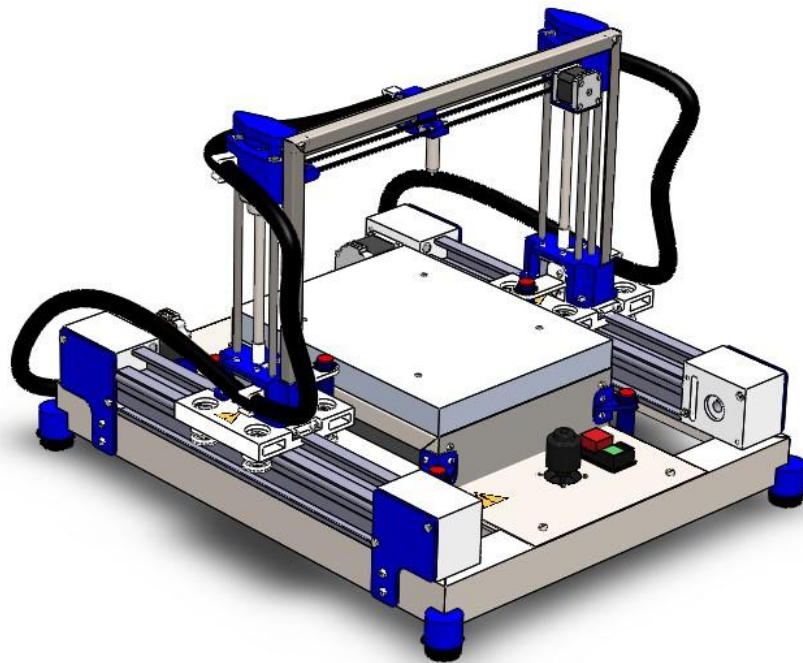
UNIVERSITAT
JAUME•I

UNIVERSITAT JAUME I



Máster Universitario en Diseño y Fabricación

***DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MEDICIÓN POR
COORDENADAS DE BAJO COSTE***



TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR/A

Daniel Gallardo Artal

TUTOR/A

Dr. Pedro Rosado Castellano

Castellón, Diciembre 2018

Índice

MEMORIA.....	7
1.- Introducción.....	8
1.1.- Antecedentes y justificación	9
1.2.- Objeto	10
1.3.- Alcance	10
1.4.- Justificación académica	11
2.- Análisis del producto	12
2.1.- Elementos básicos	12
2.2.- Arquitectura	12
2.3.- Sensores	13
2.4.- Funcionamiento.....	14
2.5.- Productos existentes y empresas fabricantes	15
2.6.- Patentes	15
3.- Resumen del diseño conceptual y preliminar	17
3.1.- Requisitos y especificaciones	17
3.2.- Componentes y estructura básica	17
3.3.- Funcionalidad	18
3.4.- Definición de alternativas	20
3.5.- Selección de alternativa	21
3.6.- Criterios de diseño preliminar	22
4.- Descripción detallada de la máquina	23
4.1.- Subconjuntos.....	24
4.1.1.- Subconjunto 1: Estructura base	24
4.1.2.- Subconjunto 2: Guías X	27
4.1.3.- Subconjunto 3: Mesa.....	29
4.1.4.- Subconjunto 4: Puente móvil	32
4.1.5.- Otros elementos.....	36
4.2.- Selección de materiales y procesos.....	39
4.3.- Relación completa de piezas de diseño propio y elementos comerciales	41
4.3.1.- Piezas de diseño propio.....	41
4.3.2.- Elementos comerciales.....	42
4.4.- Sistemas de transmisión y guiado	43
4.4.1.- Eje X	43
4.4.2.- Eje Y.....	43

4.4.3.- Eje Z	45
4.5.- Accionamientos eléctricos	45
4.5.1.- Encoders	47
4.6.- Automatización y control.....	49
4.6.1.- Sensorización.....	49
4.6.2.- Sistema de control.....	52
4.7.- Análisis de resistencia por método de elementos finitos (MEF)	65
4.7.1.- Materiales	65
4.7.2.- Requisitos técnicos y objetivos	66
4.7.3.- Estructura base.....	66
4.7.4.- Puente móvil.....	72
4.7.5.- Conclusiones del análisis	83
4.8.- Acotación dimensional y geométrica. Análisis cadena de cotas	84
4.8.1.- Tolerancias generales	84
4.8.2.- Acotación GPS.....	85
4.8.3.- Taladros	86
4.8.4.- Análisis dimensional mediante cadena de cotas	87
4.8.5.- Comprobación de ajuste por pernos.....	93
4.9.- Hoja de operaciones de pieza significativa.....	94
4.9.1.- Posiciones en la mordaza.....	95
4.9.2.- Herramientas empleadas.....	96
4.9.3.- Operaciones realizadas.....	96
5.- Seguridad y ergonomía de la máquina	99
5.1.- Seguridad. Evaluación de riesgos y soluciones	99
5.2.- Ergonomía	102
6.- Viabilidad económica	104
7.- Mantenimiento	107
7.1.- Ficha de fallos	107
7.2.- Programación del mantenimiento	108
8.- Normativa aplicable.....	110
9.- Conclusiones.....	112
10.- Bibliografía y referencias.....	114
11.- Anexo de cálculos	117
11.1.- Análisis cinemático del sistema.....	117
11.1.1.- Velocidades de giro y aceleración angular eje X	117
11.1.2.- Velocidades de giro y aceleración angular eje Y	118

11.1.3.- Velocidades de giro y aceleración angular eje Z.....	118
11.2.- Comprobación de la selección de motores	119
11.2.1.- Motor eje X	119
11.2.2.- Motor eje Y.....	122
11.2.3.- Motor eje Z	124
11.3.- Selección de elementos comerciales.....	125
11.3.1.- Guías motorizadas eje X	126
11.3.2.- Husillos trapezoidales.....	132
11.3.3.- Guías superiores (eje Z)	135
11.3.4.- Rodamientos	136
11.4.- Incertidumbre y resolución	141
11.4.1.- Motor eje X	141
11.4.2.- Motor eje Y.....	143
11.4.3.- Motor eje Z	144
11.4.4.- Sistemas de transmisión/guionado	146
11.4.5.- Resultados finales	148
ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO	149
1.- Estado de mediciones.....	151
2.- Presupuesto.....	152
2.1.- Piezas a fabricar. Materiales.....	152
2.2.- Elementos comerciales	153
2.3.- Mano de obra.....	154
2.4.- Presupuesto final.....	155
PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS	157
1.- Objeto.....	158
2.- Condiciones generales y legales.....	159
2.1.- Marcado CE.....	159
2.2.- Normativa aplicable	159
2.3.- Garantías	161
2.3.1.- Garantía global de la máquina	161
2.3.2.- Garantía específica de elementos comerciales.....	161
2.4.- Control de calidad.....	162
2.5.- Interpretación de documentos.....	162
2.6.- Uso de la máquina	163
3.- Pliego de condiciones.....	163
3.1.- Niveles de producción y capacidad.....	163

3.2.- Puesto de trabajo y seguridad	163
3.3.- Materiales	164
3.3.1.- Componentes fabricados	164
3.3.2.- Componentes comerciales	164
3.3.3.- Utillajes	164
3.4.- Montaje y puesta en marcha.....	165
3.5.- Mantenimiento	165
3.6.- Acabado e identificación de la pieza	166
PLANOS	167

MEMORIA

1.- Introducción

El proyecto desarrollado consiste en el diseño de una máquina de medición por coordenadas de bajo coste, basada en una impresora 3D, destinada a un entorno académico o laboral sencillo.

El proyecto se ha dividido en tres fases:

- Fase conceptual, en la que se realizaron los estudios previos y se elaboraron las primeras ideas y conceptos, seleccionando uno de ellos para su desarrollo. También se realizó una planificación detallada de cómo se iba a actuar en las siguientes fases.
- Fase preliminar, durante la que se profundizó en el desarrollo del concepto seleccionado, así como se definieron los componentes finales de la máquina y se ha elaborado un presupuesto inicial.
- Fase final, donde se desarrolla en detalle cada componente y se realizaron todos los análisis mecánicos necesarios y otros análisis pertinentes para asegurar la viabilidad técnica del proyecto. En esta fase también se cierra el presupuesto final del proyecto y se elabora toda la documentación técnica del mismo, incluyendo planos, presupuesto y pliego de condiciones técnicas.

El presente documento recopila principalmente las diferentes tareas realizadas en la fase final del proyecto, además de incluir un recordatorio de las fases previas.

1.1.- Antecedentes y justificación

El ámbito de la medición por coordenadas es de gran importancia en la industria en general de hoy en día, sobre todo para aquellos sectores cuyos componentes requieren una gran precisión para desempeñar correctamente su función (hablamos de la automoción, maquinaria industrial, aeronáutica, etc.).

Debido a esta necesidad de precisión, la tecnología de medición se encuentra muy desarrollada y estudiada. Las empresas, pese a tener en cuenta los gastos, invierten en adquirir máquinas que permitan comprobar que sus productos tengan las dimensiones deseadas, ya que esta inversión les garantiza una calidad máxima; también buscan equipos que permitan responder ante rediseños del producto. Sin embargo, esta tecnología no está disponible para todas las empresas o instituciones formativas debido a su alto coste. Por ello, este proyecto pretende llevar a cabo una adaptación de la medición por coordenadas plasmada en una máquina que pueda ser adquirida por un precio mucho menor sin una gran pérdida de prestaciones de precisión de medida, pero manteniendo las mismas funcionalidades de medición.

Para simular las condiciones de trabajo en las que se podría emplear esta máquina se ha tomado como entorno de referencia el seminario propio del Máster. Este espacio cuenta con otros dispositivos como varios ordenadores, impresoras 2D y 3D y una grabadora láser. Al ser un espacio de trabajo para los alumnos del Máster, la máquina diseñada podría ser un complemento excelente a la hora de realizar proyectos o incluso experimentar.

1.2.- Objeto

El principal objetivo del proyecto es, como el propio título del proyecto describe, diseñar una máquina de medición por coordenadas de bajo coste. Esta máquina está destinada a ser utilizada en un entorno académico o para la medición de piezas que no requieran una tolerancia demasiado estrecha en un taller (con precisiones del orden de décimas de milímetro).

Además de este objetivo principal, se busca realizar un diseño que, para velocidades bajas de medición (unas 25 piezas/día máximo) y sin necesidad de una velocidad de medición elevada, cumpla lo siguiente:

- Conseguir adaptar la tecnología existente a un producto de gama más baja, intentando reducir al máximo el coste sin perder demasiada precisión.
- Conseguir un diseño visualmente atractivo, que encaje con el resto de los elementos del entorno y que incluso pueda ser adaptado a diferentes entornos de trabajo con condiciones distintas.
- Crear un producto atractivo y sencillo que no requiera de conocimientos avanzados para su uso; de esta forma, un usuario básico debería poder experimentar y aprender con él. Se busca así facilitar la interacción usuario-producto.
- Maximizar la seguridad; es de vital importancia que los elementos que estén a la vista no sean peligrosos para los usuarios.

1.3.- Alcance

El alcance de este proyecto incluye el diseño y desarrollo completo de una máquina de medición por coordenadas que sea capaz de satisfacer todos los objetivos planteados. Las tareas que se han desempeñado son las siguientes:

- Aplicación de las correcciones realizadas por el tribunal evaluador durante la defensa oral de la fase preliminar.
- Definición completa de todos los elementos de la máquina y modelado 3D de la misma mediante programas CAD, que permita su correcto dimensionado. En esta fase final se ha realizado el diseño de detalle de

- todos los elementos, asegurando su ensamblabilidad mediante el uso de acotación GPS reflejada en los planos.
- Selección de los materiales empleados y los correspondientes procesos de fabricación de las piezas a producir.
 - Selección de los elementos comerciales en sus respectivos catálogos.
 - Análisis mecánicos necesarios para asegurar que la máquina cumpla sus funciones adecuadamente y sea viable técnicamente.
 - Diseño final de los circuitos eléctricos necesarios y de los accionamientos y controles.
 - Análisis de los aspectos de seguridad relativos a la máquina y diseño de los sistemas de seguridad necesarios.
 - Elaboración del presupuesto final incluyendo todos los costes de fabricación, costes de elementos comerciales, montaje, etc.

Todo esto viene documentado en esta memoria, en conjunto con los archivos CAD y otros archivos que completan la documentación técnica de esta fase.

Las tareas de diseño de detalle no se incluyen en este documento ya que corresponden a la fase final.

1.4.- Justificación académica

Este proyecto se ha realizado como proyecto final del Máster Universitario en Diseño y fabricación, para complementar los conocimientos adquiridos al cursar las diferentes asignaturas y como culminación de la fase conceptual y preliminar del mismo. Además, mediante la realización del proyecto se demuestran las habilidades del alumno y la capacidad de acometer un proyecto de ingeniería de este tipo durante su futura labor profesional.

2.- Análisis del producto

En este apartado se incluyen todos los estudios previos realizados en fases previas, referentes a la definición de elementos y características básicas, estudio de mercado y estado del arte.

Como definición inicial, una máquina de medición por coordenadas es un instrumento de medición directa que utiliza un puntero o “palpador” físico en conjunto con encoders y sensores de posición, para tomar datos y extraer puntos con los que posteriormente realizar un postprocesado para realizar mediciones con respecto al archivo CAD de la pieza.

2.1.- Elementos básicos

Las máquinas de medición por coordenadas se componen de cuatro partes básicamente:

- **Estructura mecánica de alta precisión:** Elementos físicos que dan soporte a la máquina y permiten el movimiento del puntero o palpador hasta su zona de actuación.
- **Manejo de datos y sistema de control:** Sistema informático que programa los movimientos de la máquina.
- **Software MMC:** Es el sistema operativo de la máquina. Permite la comunicación entre la misma, el ordenador (ya que generalmente la MMC se emplea como periférico) y el usuario.
- **Sensores:** Encargados de registrar la posición de los puntos medidos.

2.2.- Arquitectura

Pese a la existencia de una gran variedad de formas de MMC, las 3 arquitecturas más comunes son las siguientes:

- **Voladizo con mesa fija:** Sistema inicialmente aplicado a máquinas manuales. El brazo superior se desliza de forma horizontal sobre un lateral fijo y, a su vez, el palpador se mueve verticalmente sobre el brazo superior (Figura 2).
- **Puente móvil:** Estructura más utilizada por su gran rigidez y versatilidad. El puente formado por dos vigas verticales y una superior horizontal se desplaza longitudinalmente a lo largo de la mesa por unas guías, mientras que el palpador se mueve sobre la viga horizontal y en vertical (Figura 1 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).
- **Gantry:** Empleado en mediciones a gran escala (del orden de varios metros). Los pórticos laterales se mantienen fijos, desplazándose sobre

ellos la viga superior y con el palpador realizando el mismo movimiento que en las de tipo puente móvil (Figura 3).



Figura 2 Voladizo



Figura 1 Puente móvil



Figura 3 Gantry

2.3.- Sensores

Uno de los elementos más importantes de una MMC son los sensores, los cuales permiten registrar coordenadas y realizar mediciones de los puntos tomados de la pieza para realizar, en base a ellos, las mediciones.

Los sensores más empleados en una MMC son:

- **Encoders lineales:** Se encargan de la medición de las coordenadas. Permiten mediante cálculos obtener la posición del punto medido gracias a la distancia recorrida por el palpador en cada uno de los ejes (Figura 5).
- **Encoders rotatorios:** En estos dispositivos la lectura se realiza sobre un disco, en cuya cara se encuentra la codificación que permite discernir la posición angular (absoluta o relativa) con gran precisión (Figura 6).

- **Sensores por contacto:** Denominados palpadores, son los elementos críticos a la hora de registrar los puntos de medición. Los datos tomados por éstos son utilizados por los encoders para realizar las mediciones y posteriormente son enviados al sistema operativo que los procesa (Figura 7).
- **Sensores sin contacto directo:** En este apartado se hace referencia a los medidores láser CMOS (Figura 4). Pueden sustituir a los palpadores, desempeñando la misma función de toma de datos y registro de coordenadas sin necesidad de entrar en contacto con la pieza a medir. La tecnología empleada puede ser la triangulación (medición del ángulo de reflexión de la luz al chocar con el objeto) o la medición del tiempo (detección del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la luz tras colisionar con el objeto).

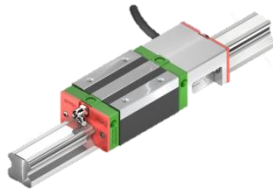


Figura 5 Encoder



Figura 4 Láser CMOS



Figura 7 Palpador



Figura 6 Encoder rotativo

2.4.- Funcionamiento

Las máquinas de medición por coordenadas se basan en un sistema de sensores y mecanismos, además de un software específico que procesa todos los datos.

El proceso empleado es el siguiente: tras una calibración previa, el palpador se desplaza sobre los tres ejes de coordenadas (X, Y y Z) frenando en el momento en el que se produce un contacto (la velocidad al acercarse al objeto debe ser lo suficientemente lenta para que el choque produzca la menor desviación posible en la medida). En ese momento, los sensores situados en cada uno de los ejes registran las coordenadas de posición del punto medido y estos datos se envían al ordenador, donde un programa los procesa y almacena. Se repite el proceso hasta alcanzar un número de puntos significativo, sobre los que se pueden hacer mediciones directas u otro tipo de operaciones.

2.5.- Productos existentes y empresas fabricantes

Se han registrado algunas de las empresas más importantes y varias de sus máquinas, con sus características correspondientes para poder compararlas entre ellas. El resultado se indica en la Tabla 1:

Producto	Empresa	Dimensiones máx. de medición (x,y,z, en mm)	Desviación (µm)	Software utilizado	Velocidad de medición
EasyScope 3D man	Werth	200x100x>200	<2,5	WinWerth	
ScopeCheck® FB DZ	Werth	1500x1000x500	<1,5	WinWerth	
ScopeCheck® S	Werth	400x200x200	<1,5	WinWerth	
Inspector® FQ	Werth	1000x1000x300	<2,5	WinWerth	
Global S	Hexagon	1200x3000x1000	1,3 + L/333	PC-DMIS/QUINDOS	
Global Classic	Hexagon	900x2000x800	1,9 + L/300	PC-DMIS	
Global Performance	Hexagon	1200x3000x1000	1,5 + L/333	PC-DMIS Adaptive Scanning	
Altera	Nikon	600x200x150	1.8 + L/400		762 mm/s
Altera +	Nikon	2500x1000x800	1.5 + L/375		833 mm/s
LK V-SL	Nikon	200x120x100	1.1 + L/400		850 mm/s
LK V-SL HA	Nikon	200x120x100	0.7 + L/600		333 mm/s
Contura	Zeiss	1200x2400x1000	>1,5	Calypso/Gear Pro	
Accura	Zeiss	2000x4200x1500	>1,2	Calypso/Gear Pro/PiWeb	>800 mm/s
Micura	Zeiss	500x500x500	>0,7	Calypso/Gear Pro	200 puntos/s

Tabla 1 MMC existentes

2.6.- Patentes

Al igual que en el resto de los sectores de la industria, los diseñadores y empresas han buscado proteger sus invenciones de posibles plagios mediante patentes y modelos de utilidad. Estos son algunos de los ejemplos:

- **CMM Certification System (H. James Vander Wall. EE. UU., 5 de Julio de 1995):** Máquina de medición por coordenadas basada en una arquitectura del tipo voladizo. Presenta un palpador mecánico que se acciona de forma manual mediante una manivela situada en la parte posterior (Figura 9).
- **Coordinate Measuring Machine (Russell S. Shelton; Compañía: Shelton Metrology. EE. UU., 5 de octubre de 1974):** Sistema de medición muy antiguo; sin embargo, con una arquitectura tipo puente móvil. Se trata de una estructura muy robusta y rígida, pero sin mucho espacio de trabajo. Aunque no se menciona, parece ser de accionamiento manual (Figura 8).
- **Coordinate Measuring Method and Device (Pascal Jordil, Bo Petterson; Compañía: Hexagon Metrology. EE. UU, 6 de noviembre de 2008):** Sistema de medición bastante actual (menos de 10 años de antigüedad) con una arquitectura tipo puente móvil. Fue realizada por una de las empresas con mayor prestigio en el sector, como es Hexagon. Muy similar a las usadas actualmente en el mercado (Figura 10).

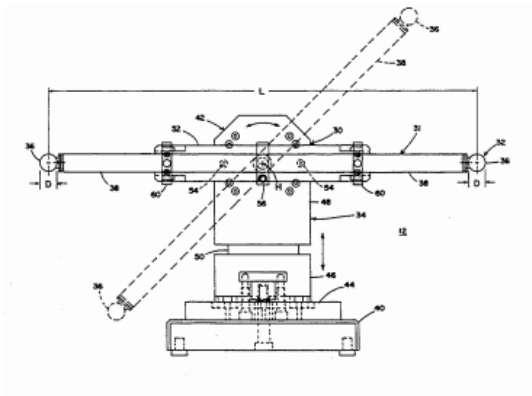


Figura 9 CMM Certification System

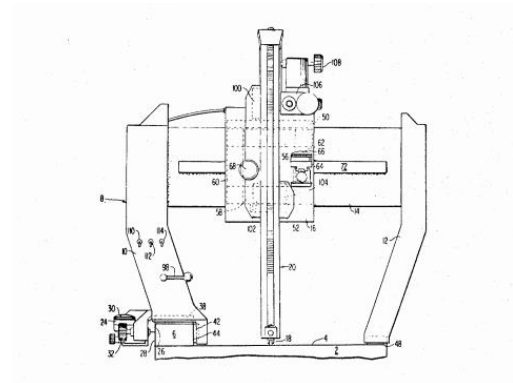


Figura 8 Coordinate Measuring Machine

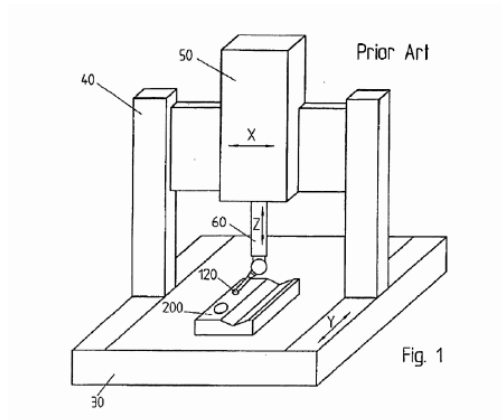


Figura 10 CMM Method and Device

3.- Resumen del diseño conceptual y preliminar

3.1.- Requisitos y especificaciones

Se han planteado una serie de requisitos destinados al cumplimiento de los objetivos anteriormente propuestos. Se han actualizado con respecto a las fases previas debido a los cambios propuestos:

- **Precisión de medición:** Se ha planteado como incertidumbre general que la desviación en cada uno de los 3 ejes no debería superar un valor de +/- 0,1 mm. Durante el diseño de la máquina se evaluará la incertidumbre obtenida y, en caso de ser mayor, se valorará su viabilidad técnica.
- **Velocidad del palpador:** Pese a no ser un requisito indispensable, se busca una velocidad aceptable en vacío (cuando esté tan solo desplazándose y no tomando una medida) de unos 100 mm/s.
- **Bajo coste:** Inicialmente se planteó un presupuesto total de entre 5000 y 15000 €, pero este valor se podría reducir en gran medida debido a las modificaciones propuestas en cuanto a aplicación de la máquina, buscando un coste de 3000-3500 € máximo.
- **Interacción usuario-producto:** La máquina debe ser sencilla de utilizar para el usuario básico; por tanto, es necesario que los controles sean lo más intuitivos posibles.
- **Seguridad:** Una MMC en general no es una máquina que conlleve riesgos importantes, pero cualquier mínimo peligro debe ser eliminado o reducido lo máximo posible; además, los riesgos que no puedan ser eliminados completamente se tienen que informar al usuario.

3.2.- Componentes y estructura básica

La relación de elementos básicos de la MMC a diseñar son los siguientes:

- **Estructura de soporte y mesa de medición (1 y 2):** Elemento de apoyo, que hace las funciones de esqueleto de la máquina y le dará forma. La mesa es la superficie plana donde se apoya la pieza a medir.
- **Palpador (3):** Sensor que efectúa las mediciones. Se seleccionará el palpador comercial más adecuado para la máquina.
- **Sistema de accionamiento (4):** Compuesto por varios motores (uno por cada eje de desplazamiento) y los mecanismos motrices necesarios.
- **Circuito eléctrico y cableado (5):** Genera y aporta la energía eléctrica necesaria para la puesta en funcionamiento del sistema.
- **Interfaz (6):** Incluye todos los accionadores, botones e interruptores.
- **Carcasa (7):** Protege los elementos internos como mecanismos y cableado además de embellecer la estructura.

Además de estos componentes, la MMC requerirá de un ordenador que contenga un software específico para el procesado de los datos, que queda fuera del alcance de este trabajo. Se pueden observar estos elementos en la (Figura 11).

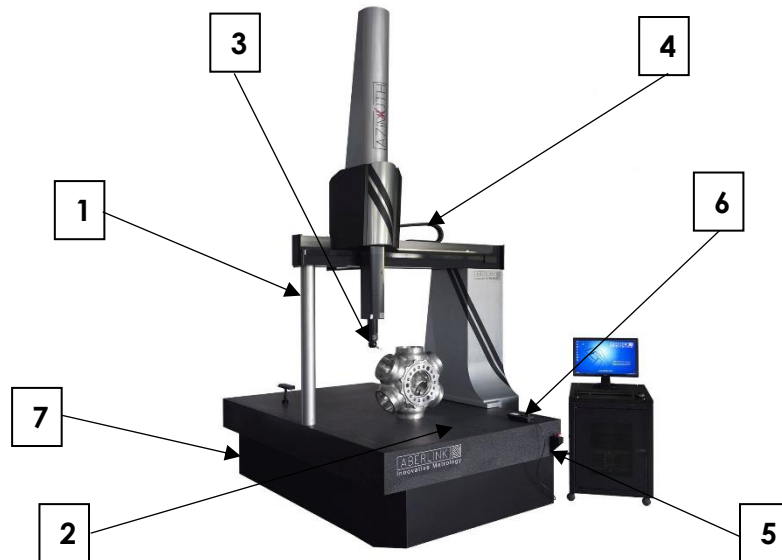


Figura 11 Elementos de una MMC

3.3.- Funcionalidad

Listado de subfunciones de la MMC:

- 1) Suministro de electricidad a la máquina.
- 2) Encendido/apagado de la máquina.
- 3) Información del estado (encendido/apagado) al usuario.
- 4) Calibración del instrumento de medida.
- 5) Captación e interpretación de instrucciones que provengan del control.
- 6) Accionamiento de los motores de cada eje.
- 7) Movimiento del palpador a lo largo de los ejes.
- 8) Detección del punto a medir y sus coordenadas (con o sin contacto).
- 9) Toma de datos.
- 10) Procesado de datos.
- 11) Transmisión de los datos a la unidad de control.

El siguiente diagrama de caja negra (Figura 12) muestra de forma gráfica la relación de funciones, requisitos y resultados. Mediante el diagrama de caja transparente (Figura 13) se ha conformado la secuencia que siguen las diferentes tareas y funciones a la hora de su puesta en marcha. En dicha caja

transparente se puede ver la distribución de las subfunciones (representadas por su número en la lista anterior).

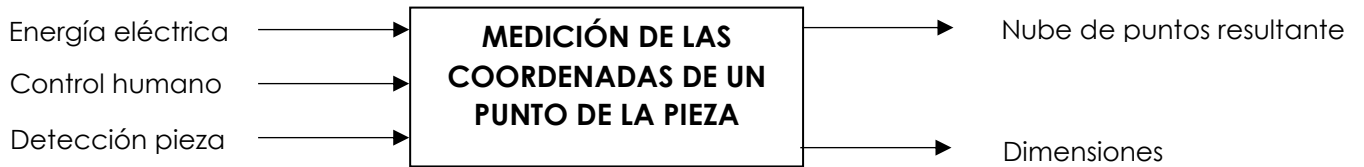


Figura 12 Caja negra

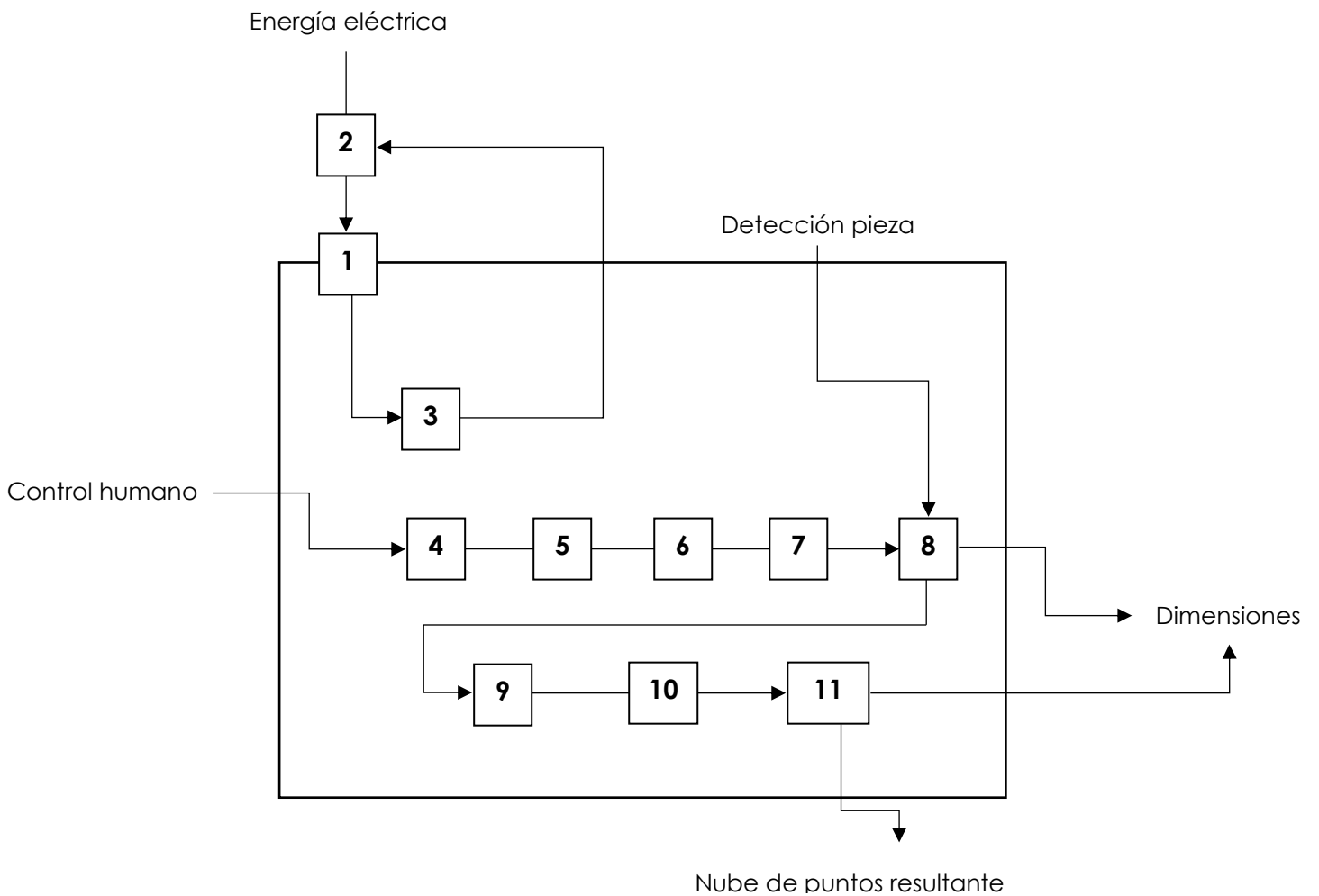


Figura 13 Caja transparente

3.4.- Definición de alternativas

Se han definido 3 conceptos distintos en base a los estudios realizados y a los requisitos y especificaciones anteriormente señalados:

- **Alternativa 1A.- Puente móvil con palpador de contacto** La primera alternativa planteada presenta una estructura similar a las MMC tipo puente móvil existentes, incluyendo un palpador de contacto. La medición se realiza por contacto directo del palpador con la pieza; la máquina desplaza el palpador a lo largo de los 3 ejes hasta que contacta con alguna de las superficies de la pieza (Figura 15).
 - o Ventajas: Gran rigidez (por tanto, mayor precisión) y velocidad de desplazamiento rápida; fácil posicionado de la pieza en la máquina. Además, es un sistema de viabilidad técnica probada.
 - o Inconvenientes: Mayor complejidad de mecanismos
- **Alternativa 1B.- Puente móvil con medidor láser**: Variación de la primera alternativa, sustituyendo el palpador electrónico por un medidor láser CMOS. La estructura se mantiene casi intacta, pero se elimina un movimiento: el vertical, ya que el láser es capaz de medir la profundidad.
 - o Ventajas: Mecanismo más sencillo y preciso, facilidad de posicionamiento.
 - o Inconvenientes: El láser es mucho más costoso, lo que aumentaría el presupuesto.
- **Alternativa 2.- Brazo mecánico para medición manual**: Concepto totalmente diferente; la medición se realiza de forma manual por el usuario y no automáticamente. Además, las coordenadas tomadas son de tipo polar y no coordenadas cartesianas. La estructura básica es un brazo articulado con 3 segmentos y 2 ejes de rotación, con un palpador electrónico al final del último segmento; el primer segmento es el correspondiente a la base, que también rota respecto a la mesa de medición (Figura 14).
 - o Ventajas: Se elimina la necesidad de automatizar el proceso de toma de medidas y se reduce en gran medida la complejidad de la máquina.
 - o Inconvenientes: Medición mucho menos precisa al emplearse coordenadas polares. Además, se necesita una persona que maneje la máquina en todo momento. La pieza debe posicionarse no demasiado lejos del brazo para que éste pueda alcanzar todos los puntos.
- **Alternativa 3.- Voladizo**: Estructura tipo voladizo, en la que los soportes se situarán en uno de los laterales y se unirán al palpador mediante una viga sólo sostenida por uno de sus extremos. De esta forma se consigue maximizar el tamaño del entorno de trabajo y se libera de espacio la mesa de medición. El mecanismo empleado es muy similar a la de tipo puente, con motores en cada uno de los ejes para poder ser accionado de manera independiente (Figura 16).

- Ventajas: Menor tamaño de la estructura y mayor espacio de manipulación de la pieza.
- Inconvenientes: Sistema menos rígido y por tanto más propenso a sufrir desviaciones en las mediciones.

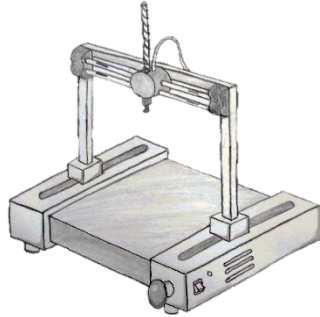


Figura 15 Alternativa 1

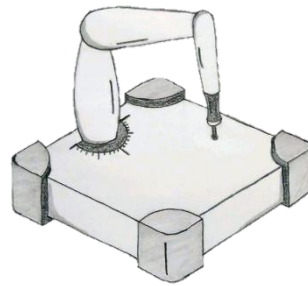


Figura 14 Alternativa 2

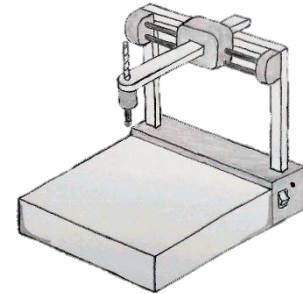


Figura 16 Alternativa 3

3.5.- Selección de alternativa

Para evaluar las diferentes alternativas planteadas se ha utilizado una tabla de valoración cualitativa en base a una serie de atributos ordenados por importancia, los cuales ponderan de la siguiente forma: coste(x5), precisión (x4), velocidad de medida (x3), espacio de trabajo (x2) y simplicidad (x1).

Los resultados se muestran en la siguiente (Tabla 2):

	Coste (x5)	Precisión (x4)	Velocidad de medida (x3)	Espacio de trabajo (x2)	Simplicidad (x1)	TOTAL
1) Puente móvil	4	5	4	2	2	58
2) Brazo manual	4	2	3	3	4	47
3) Voladizo	4	3	3	4	3	52

Tabla 2 Valoración cualitativa

Los resultados de la valoración han permitido seleccionar la alternativa nº 1: Puente móvil para su desarrollo. La valoración que tiene respecto de las otras alternativas es mucho mayor en aspectos con gran importancia como la precisión y la velocidad de medida, principalmente dada por la rigidez de la estructura.

3.6.- Criterios de diseño preliminar

Durante el diseño preliminar, para seleccionar cada uno de los componentes y diseñar las piezas a fabricar, con el objetivo de que se adapten a las exigencias de la máquina se han empleado los siguientes criterios:

- El principal objetivo es el diseño de una **máquina de bajo coste**, por lo que se ha simplificado lo máximo posible evitando elementos superfluos sin una función determinante.
- Como la **precisión** es uno de los criterios importantes, se han diseñado elementos estructurales con materiales rígidos (en este caso acero) y no se ha centrado tanto la búsqueda del menor coste en elementos fundamentales que requieran de prestaciones mecánicas (caso de las guías inferiores).

Debido a que el diseño final ha constituido una mejora del diseño realizado durante la fase preliminar y para no redundar en detalles, en el siguiente apartado se explica de forma completa todo el diseño de la máquina.

4.- Descripción detallada de la máquina

El criterio principal para el diseño de la máquina, así como para la selección de componentes comerciales y del material empleado en las piezas de diseño propio ha sido reducir los costes en la medida de lo posible buscando no perjudicar la precisión de la máquina. De esta forma se han tomado las siguientes consideraciones:

- Los elementos básicos de la máquina son las transmisiones, los motores y, en mayor medida, el palpador y todo su sistema de medición y transferencia de coordenadas; por ello, se han buscado componentes de calidad y sobre ellos se ha diseñado el resto del conjunto.
- Para los elementos estructurales se han usado perfiles de acero normalizado cuya resistencia y rigidez está comprobada. La parte inferior es mucho más robusta y no se ha considerado el peso como factor determinante ya que no es una máquina portátil (se puede desplazar dentro del espacio de trabajo o incluso de un lugar de trabajo a otro, pero no es el principal propósito).
- En las piezas de diseño propio se ha intentado seleccionar los materiales y procesos más económicos posibles; en este caso, la impresión 3D ha beneficiado reducir costes favoreciendo el diseño de geometrías complejas.

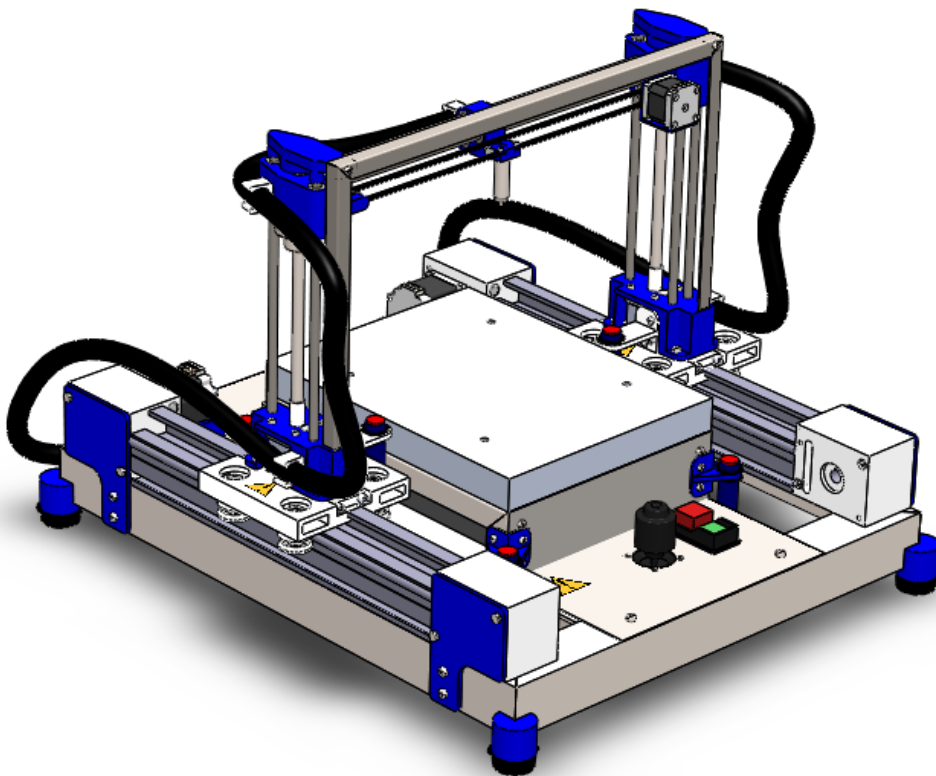


Figura 17 Modelo CAD de la MMC

Las dimensiones máximas de la máquina son de **637x570x450 mm** (Figura 18). Las dimensiones máximas de medición son de **315x250x160 mm**, correspondientes a las dimensiones de la mesa y la altura máxima del palpador.

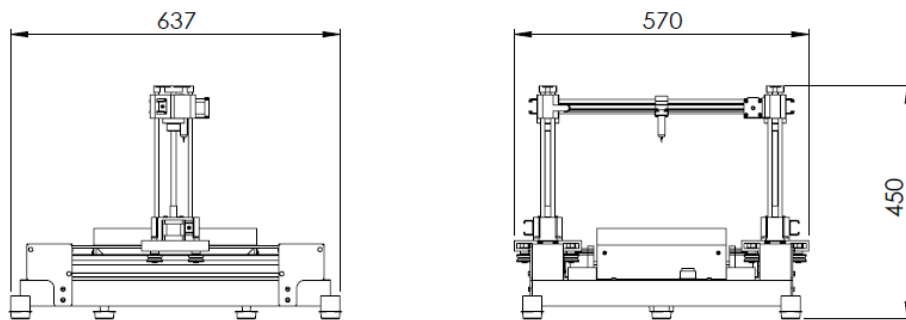


Figura 18 Dimensiones generales

4.1.- Subconjuntos

La MMC se ha dividido en 4 subensamblajes, cada uno dependiendo de la función que desempeña dentro de la máquina. La estructura base y la mesa dan soporte a todos los elementos y sus cargas mientras que las guías X y el puente móvil se encargan de los movimientos de la máquina en los tres ejes.

4.1.1.- Subconjunto 1: Estructura base

Estructura principal de la máquina que soporta de forma directa o indirecta todas las cargas del conjunto. Constituye la parte inferior de la máquina, y está formada principalmente por perfiles de acero soldados que aportan tanto rigidez como resistencia a la estructura. A ella se unen el resto de subensamblajes, así como otros elementos como carcasas, sujeciones, etc. Todas las uniones se realizan mediante tornillos, tuercas y agujeros roscados normalizados.

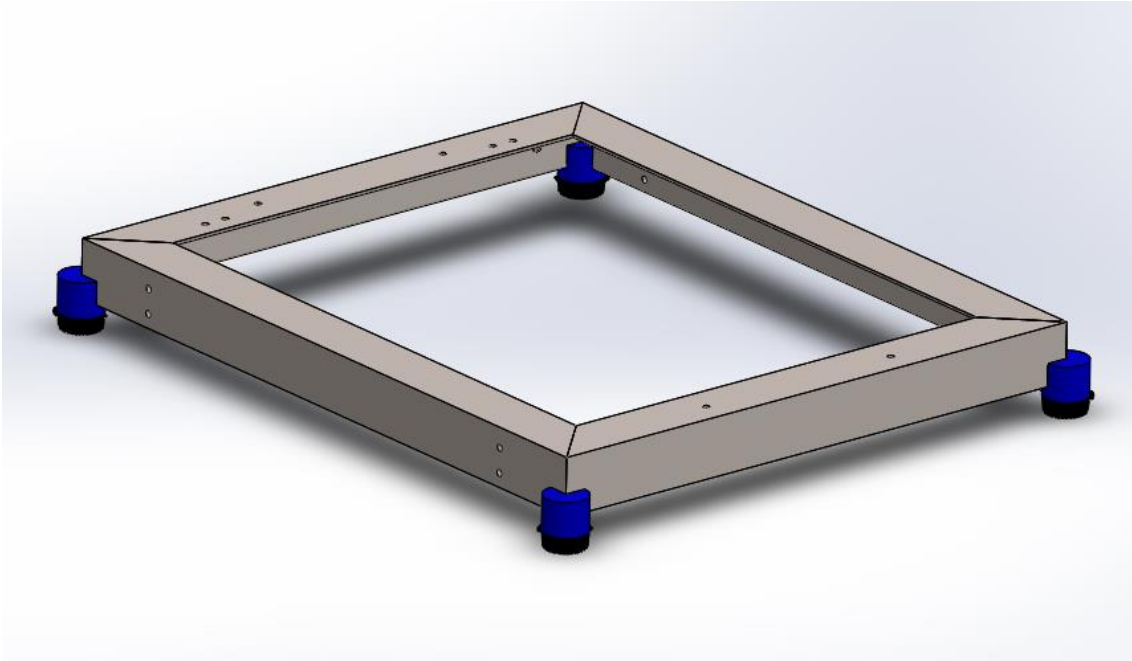


Figura 19 Estructura base

La relación de piezas que componen la estructura base es la siguiente:

Pieza	Cantidad	Plano	Material
Pata	4	1.01.01	-
Estructura soporte	1	1.01.02	Acero S235
Sujeción portacables	2	1.01.03	PLA
Tornillo avellanado DIN EN ISO 2009 - M3 x 12 - 12N	2	-	-
Tuerca hexagonal ISO 4032 - M3 - W - N	2	-	-

4.1.1.1.- Pata

Las patas están formadas por 3 componentes: un bloque macizo de PLA que encaja con la esquina de la estructura soporte, un apoyo inferior de plástico antideslizante y un espárrago roscado por ambos extremos que funciona como unión entre el bloque y el apoyo.

Es posible nivelar la estructura girando los apoyos, y de esta forma atornillando o desatornillándolos para hacer que la estructura se eleve o descienda; de esta forma, es posible corregir errores o desniveles producidos por el desgaste, la irregularidad de la superficie donde se apoya la mesa, etc.

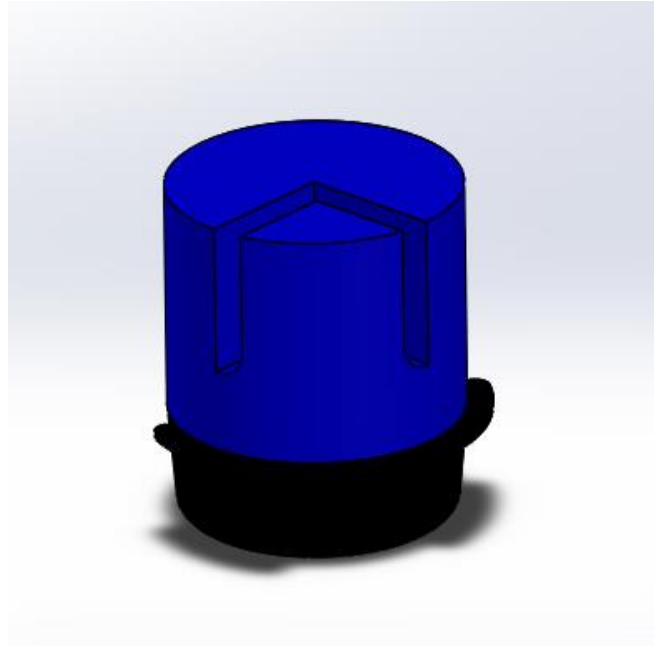


Figura 20 Pata

4.1.1.2.- Estructura soporte

Esta estructura es el cuerpo principal del subensamblaje, ya que sirve de soporte para la gran mayoría de piezas y aporta estabilidad y rigidez al conjunto, por ello es el elemento más pesado de la máquina. Está formada por 4 perfiles normalizados de acero en L (50x50x4 mm) soldados formando un rectángulo. Además de la soldadura se realizan una serie de taladros pasantes a lo largo de los perfiles para unir las guías laterales, el soporte de la mesa, las sujeciones de los portacables y las carcasas.

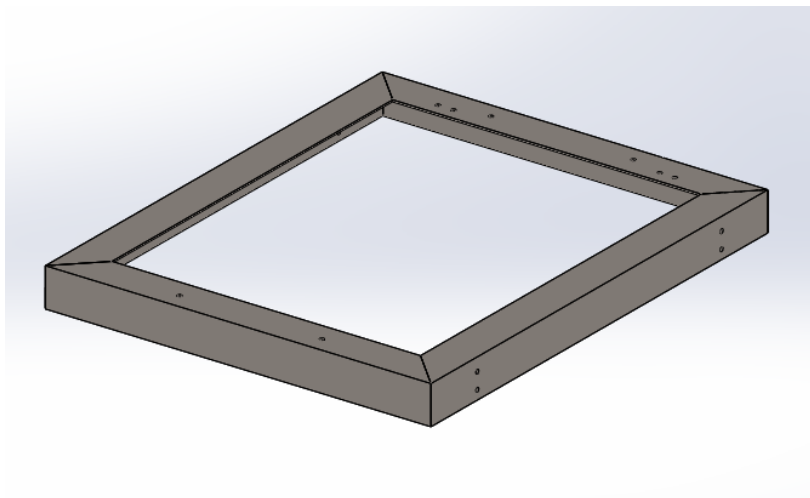


Figura 21 Estructura soporte

4.1.1.3.- Sujeción portacables

Se trata de un accesorio que ajusta el portacables en una posición donde no perjudique el movimiento del puente móvil. La pieza está fabricada en PLA es una horquilla con un interior circular por donde se coloca el portacables y un taladro con un avellanado para que el tornillo no sobresalga e interfiera con el propio portacables. Estas sujeciones están distribuidas por toda la máquina para irlo guiando desde el palpador hasta las conexiones con el controlador Arduino.

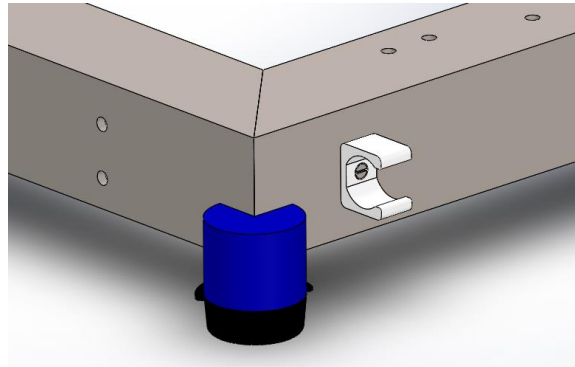


Figura 22 Sujeción portacables

4.1.2.- Subconjunto 2: Guías X

Subconjunto encargado del desplazamiento del puente móvil a lo largo de la máquina, de forma longitudinal. Está formado por componentes robustos que pueden soportar toda la carga del puente móvil durante el desplazamiento y las correspondientes sujeciones tanto al puente como a la estructura inferior. Se ha incluido en el subconjunto a los componentes simétricos tanto de la guía izquierda como de la derecha.

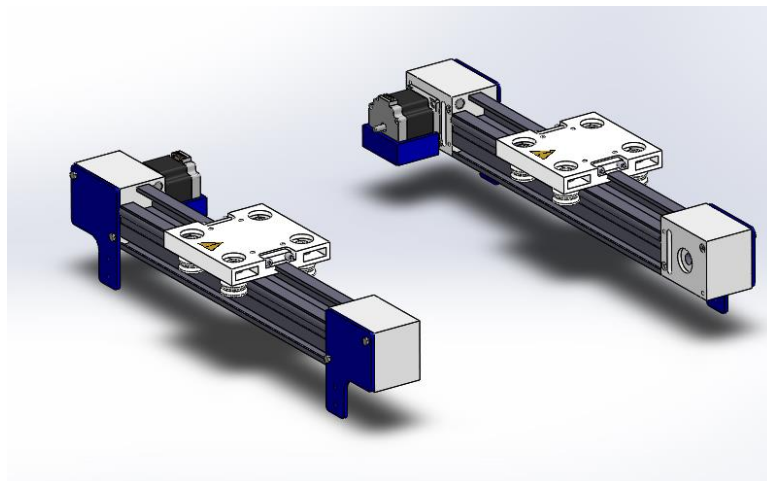


Figura 23 Guías X

La relación de piezas que integran las guías X son las siguientes:

Pieza	Cantidad	Plano	Material
Unión base-motor X	2	1.02.01	PLA
Acoplamiento motorX-guía	2	1.02.02	PLA
Sujeción guías X	4	1.02.03	PLA
Sensor de fuerza resistivo	4	-	-
Guía motorizada ak208r-12-400	2	-	-
Tornillo hexagonal DIN EN 24018 - M5 x 20-WN	12	-	-
Motor paso a paso Nema 23	2	-	-

4.1.2.1.- Guías motorizadas

Partes principales del ensamblaje y en base a las que se diseñan/seleccionan todo el resto de las piezas. Son dos guías lineales que incluyen un sistema de poleas y una correa dentada que permiten realizar tanto la transmisión del movimiento del puente móvil como su guiado. Es el sistema de mayor tamaño ya que debe soportar todo el peso del puente móvil y a la vez ser lo suficientemente preciso para no aumentar la incertidumbre de la medida.

En concordancia con su tamaño y el peso a desplazar, los dos motores colocados en las poleas traseras son del tipo Nema 23 (proceso de selección y dimensionamiento explicado en el apartado 11.2.- Comprobación de la selección de motores). En sus extremos se encuentran los sensores que actúan como final de carrera, para que los carros de las guías los activen automáticamente al contactar con ellos.

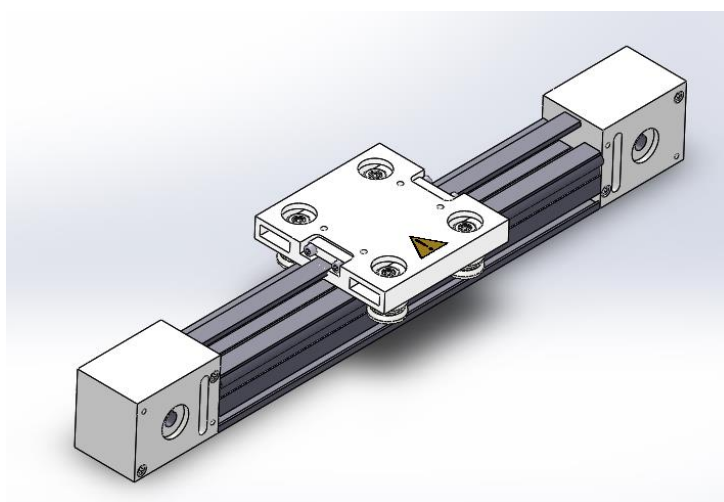


Figura 24 Guía motorizada

4.1.2.2.- Sujeciones

Para asegurar tanto las guías como los motores se han diseñado dos piezas que sirven como nexo entre estos elementos y la estructura base.

La pieza que sujeta las guías es una lámina delgada de forma rectangular (Figura 26) situada en cada uno de los extremos exteriores del sistema que se une mediante tornillos a los laterales de la estructura.

La sujeción del motor es una pieza de PLA maciza cuya forma es el negativo del motor (Figura 25) y, por tanto, sobre el que descansa cada uno de ellos. Se une también mediante tornillos a la parte superior de la estructura base.

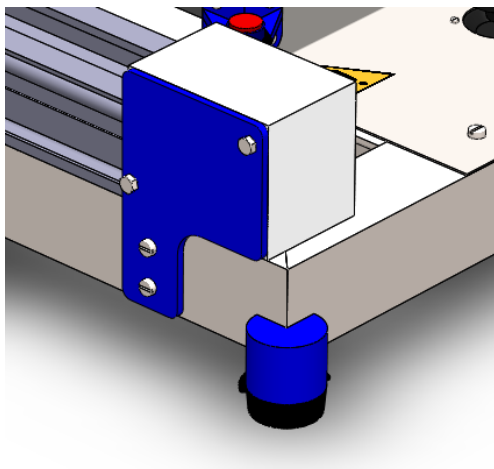


Figura 26 Sujeción guías-estructura base

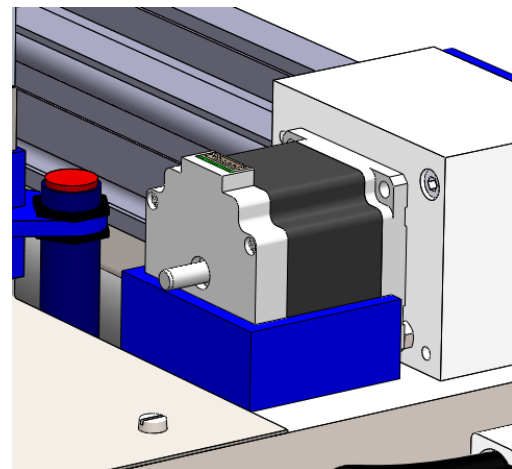


Figura 25 Soporte motor X

4.1.3.- Subconjunto 3: Mesa

Comprende todos los elementos sobre los que apoya la mesa de planitud, junto con la propia mesa. Es el ensamblaje clave en cuanto al correcto posicionamiento de la pieza a medir, ya que dependiendo de la orientación y la rectitud de la mesa las mediciones tomadas pueden ser más o menos exactas. De esta forma, la principal característica de sus elementos es la rigidez.

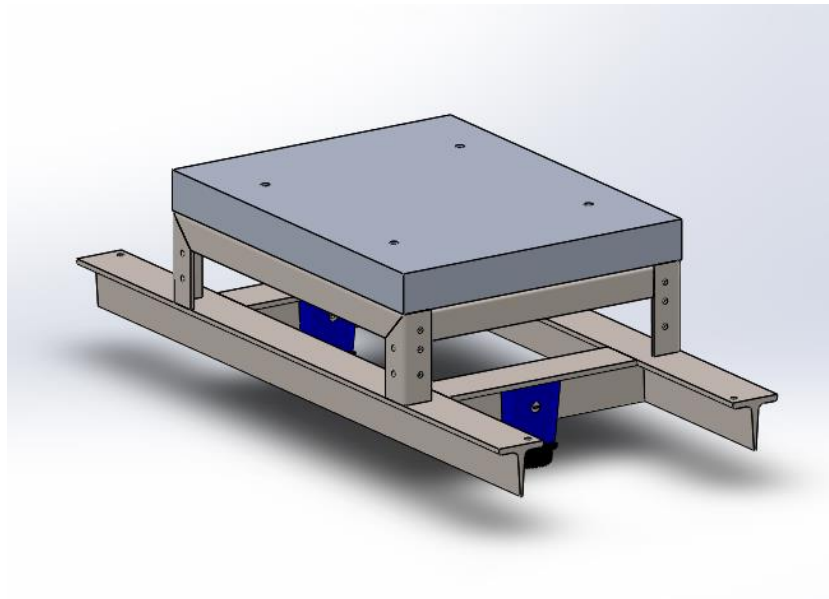


Figura 27 Subconjunto mesa

La relación de piezas contenidas en el subconjunto mesa es la siguiente:

Pieza	Cantidad	Plano	Material
Soporte mesa planitud	1	1.06.01	Acero S235
Apoyo soporte mesa planitud	2	1.06.02	PLA
Placa aluminio DIN876	1	-	-
Tornillo con cabeza ranurada DIN EN ISO 1207 - M5 x 20 - 20N	2	-	-
Tuerca hexagonal ISO 4034 - M5 - N	2	-	-
Pata	2	-	-
Espárrago roscado DIN 976-1 -- M4 x 16 A-- N	2	-	-

4.1.3.1.- Mesa de planitud

Para hacer las funciones de mesa de planitud se ha empleado una placa de aluminio rectificada DIN 876 de dimensiones 315x250x32 mm, en la que se realizarán 4 taladros para permitir la colocación de una placa taladrada donde instalar el utillaje pertinente. La placa y los utillajes no se han incluido en el diseño para permitir al usuario la posibilidad de seleccionar el más adecuado a sus necesidades.

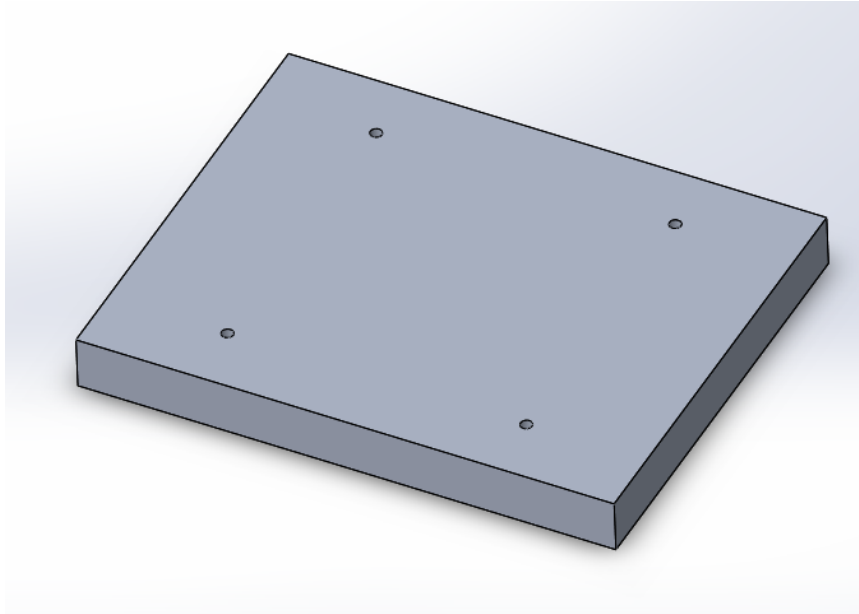


Figura 28 Mesa de planitud

4.1.3.2.- Soportes y apoyos

Una serie de elementos estructurales sustentan la mesa de planitud y aportan rigidez al subconjunto (Figura 29). El principal componente es una estructura formada por varios perfiles de acero soldados, divididos en dos conjuntos:

- Tres perfiles T de dimensiones 40x40x5 mm soldados en forma de cruz constituyen la parte inferior de la estructura, que se une directamente a la estructura base.
- Ocho perfiles L de dimensiones 25x25x3 mm forman un ortoedro colocado sobre el conjunto anterior. Se encargan de elevar la mesa hasta su posición, fijándose a ella mediante tornillos.

Para evitar que la estructura quede en voladizo, se ha diseñado una pieza de PLA que actúa como apoyo para las barras transversales del conjunto T. Para permitir la regulación de la altura de la misma forma que en las 4 patas de las esquinas, se ha colocado el mismo apoyo inferior sujeto con un espárrago.

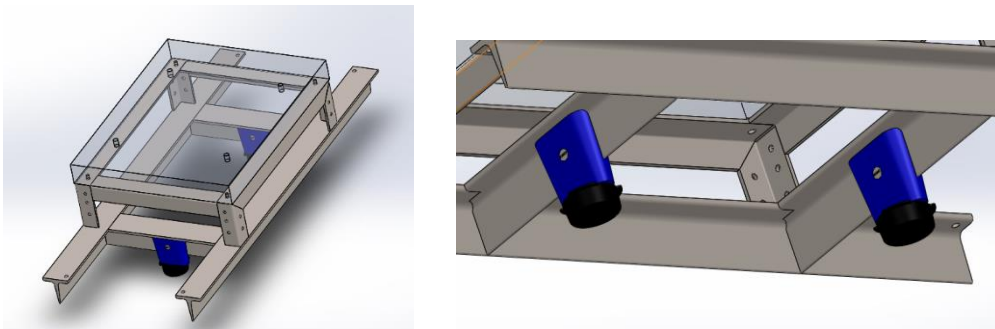


Figura 29 Perfiles y sujeción mesa

4.1.4.- Subconjunto 4: Puente móvil

Estructura en forma de puente que se desplaza sobre las guías longitudinales, sobre las cuales va montado, para tomar las coordenadas en el eje X. En él se incluyen los componentes de mayor precisión encargados de desplazar al palpador hasta su objetivo en la pieza a medir. Las piezas de fabricación propia presentes en el puente móvil tienen unas tolerancias muy ajustadas para garantizar el correcto ensamblaje y minimizar todo lo posible el aumento de la incertidumbre en las mediciones.

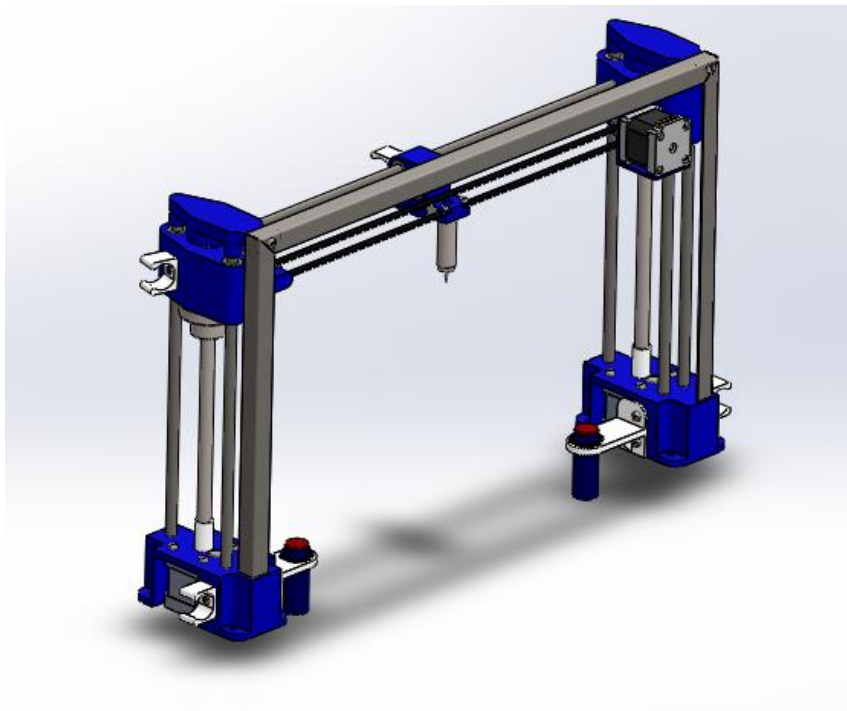


Figura 30 Subconjunto puente móvil

La relación de piezas y subensamblajes que componen el puente móvil es la siguiente:

Pieza	Cantidad	Nº de plano	Material
Subconjunto elevación	1	1.08.01	-
Varilla lisa 8mm acero 306 Createc	6	-	-
Sujeción motorY-guías-varilla	2	1.08.03	PLA
Tornillo con cabeza ranurada DIN EN ISO 1207 - M4 x 6 - 6N	16	-	-

Pieza	Cantidad	Nº de plano	Material
Rodamiento rígido de bolas DIN 628 - 7200B - 8,SI,NC,8_68	2	-	-
Subconjunto guía palpador	1	1.08.06	-
Soporte superior husillo y varilla	2	1.08.07	PLA
Sujeción portacables	2	-	PLA
Tornillo avellanado con cabeza ranurada DIN EN ISO 2009 - M3 x 8 - 8N	2	-	-
Sensor de fuerza resistivo	2	-	-
Estructura rígida	1	1.08.11	Acero S235
Sujeción sensor difuso puente	2	1.08.12	-
Sensor difuso PNP	2	-	-
Tuerca sensor difuso	4	-	-

4.1.4.1.- Elevación

El sistema de elevación del puente se compone de 2 husillos trapezoidales accionados mediante dos motores paso a paso Nema 17 que se mueven de forma simultánea. Para dar soporte a estos elementos se han situado 3 varillas formando un triángulo conteniendo en el centro al husillo que se apoyan en una pieza de PLA que hace las funciones de base y de sujeción con las guías. Además, en la parte superior se coloca un cierre con un rodamiento anclado al husillo (Figura 31).

La relación de piezas que componen el subconjunto elevación es la siguiente:

Pieza	Cantidad	Nº Plano	Material
Motor paso a paso Nema 23	1	-	-
Husillo trapezoidal 10x2 Conti	1	-	-
Acoplamiento tornillo-motorY	1	1.08.01.03	PLA

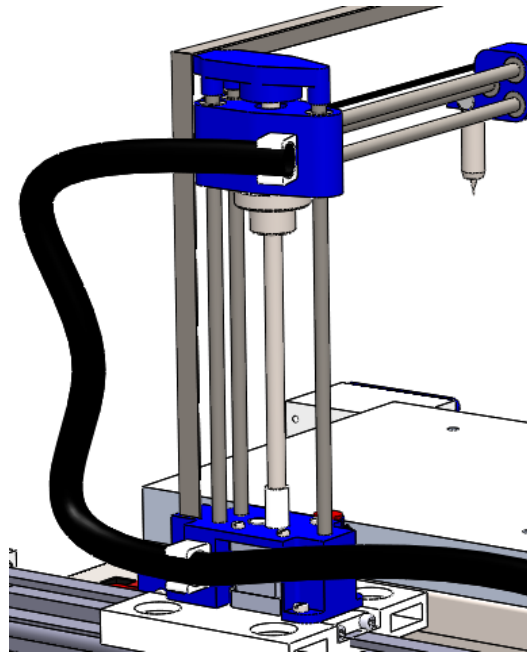


Figura 31 Elevación

4.1.4.2.- Guía horizontal

Sistema de desplazamiento del carro del palpador a lo largo del eje Z, que se mueve sobre 3 varillas gracias a unos rodamientos lineales en los que está montado. El mecanismo de transmisión de movimiento se compone de una correa de caucho y dos poleas dentadas, accionado por un motor paso a paso Nema 14.

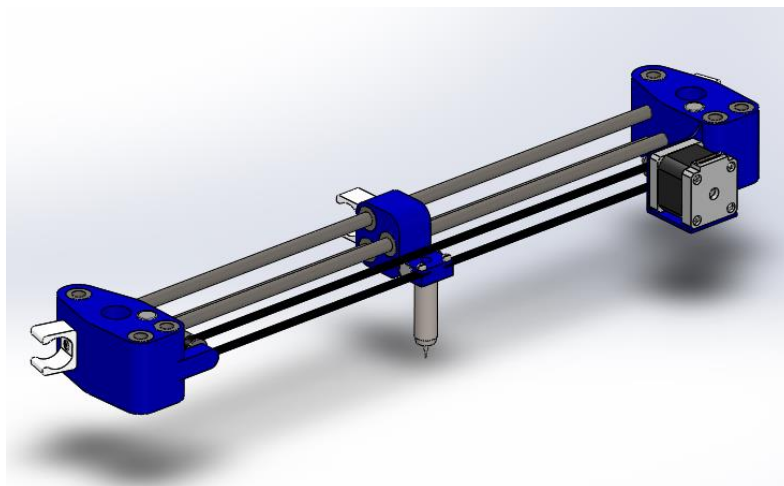


Figura 32 Guía horizontal

Como unión de la guía con los dos mecanismos de elevación se han diseñado dos piezas, cada una en un extremo de la viga, que se unen mediante tornillos

a las tuercas trapezoidales. La pieza del lado donde se coloca el motor incluye un saliente para sujetarlo (Figura 33).

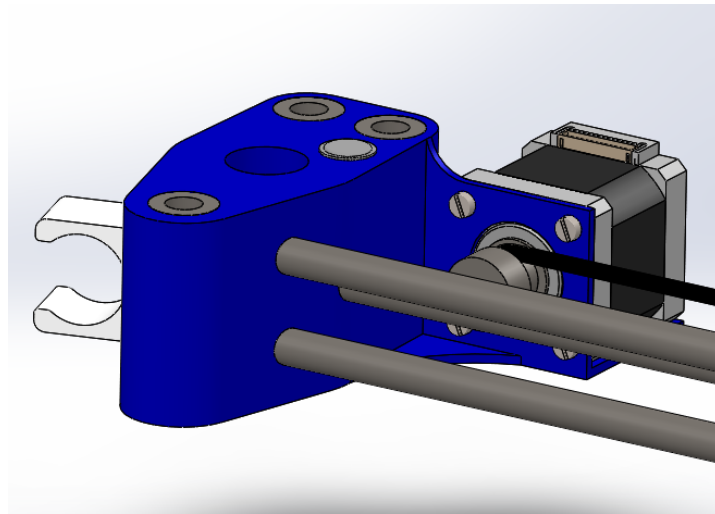


Figura 33 Soporte motor

La relación de piezas que compone el subconjunto guía horizontal es la siguiente:

Pieza	Cantidad	Nº Plano	Material
Tornillo con cabeza ranurada DIN EN ISO 1207 - M3 x 6 - 6N	6	-	-
Soporte palpador	1	1.08.06.02	PLA
Rodamiento lineal 8 mm	9	-	-
Polea GT2 20 dientes	2	-	-
Correa GT2 6 mm	1	-	-
Eje polea no motriz	1	1.08.06.05	Acero Inoxidable
Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY	2	1.08.06.06	PLA
Varillas 8 mm acero	3	-	-
Palpador completo	1	-	-
Sensor de fuerza resistivo	4	-	-
Sujeción portacables	3	1.08.06.10	PLA
Tornillo avellanado DIN	3	-	-

Pieza	Cantidad	Nº Plano	Material
EN ISO 2009 - M3 x 8 - 8N			
Motor paso a paso Nema 14	1	-	-
Rodamiento de agujas DIN 5405 - K5X8X8	1	-	-

4.1.4.3.- Estructura rígida

Estructura formada por 3 perfiles de acero en L (15x15x1.5 mm) soldados formando una U, encajados en la base del puente móvil y atornillados al cierre superior del husillo y las varillas.

Este elemento tiene como objetivo dar mayor resistencia y rigidez a la estructura, absorbiendo los esfuerzos provocados por el movimiento tanto del puente como del carro; se ha diseñado principalmente como corrección a la tensión excesiva surgida en el acoplamiento del husillo con sus motores. Gracias a la estructura, el puente móvil recibirá una carga menor y se deformará menos.

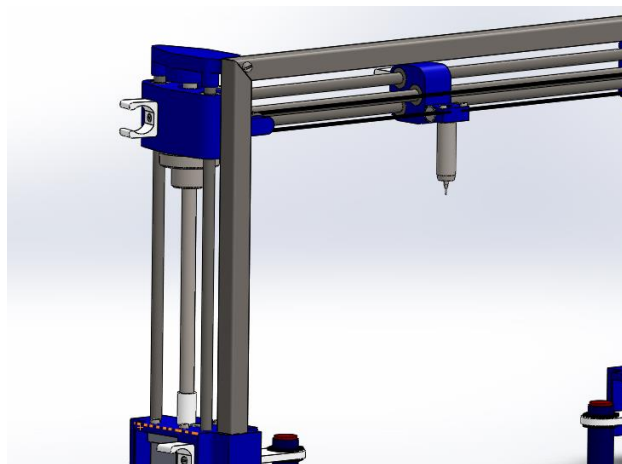


Figura 34 Estructura rígida

4.1.5.- Otros elementos

Además de los subensamblajes principales hay una serie de elementos que se colocan directamente en el ensamblaje principal; por lo general son componentes que no conforman ni la estructura de la máquina ni los sistemas de transmisión o guiado.

4.1.5.1.- Carcasas

Se trata de dos chapas de acero plegadas y atornilladas en la parte delantera y trasera de la máquina (Figura 35). Cada una lleva una serie de orificios donde se alojan distintos elementos tales como el joystick, botón marcha-paro, etc. Además de esta función de soporte también se emplean para ocultar la zona inferior de la máquina donde se encuentra parte del cableado y toda la estructura inferior.

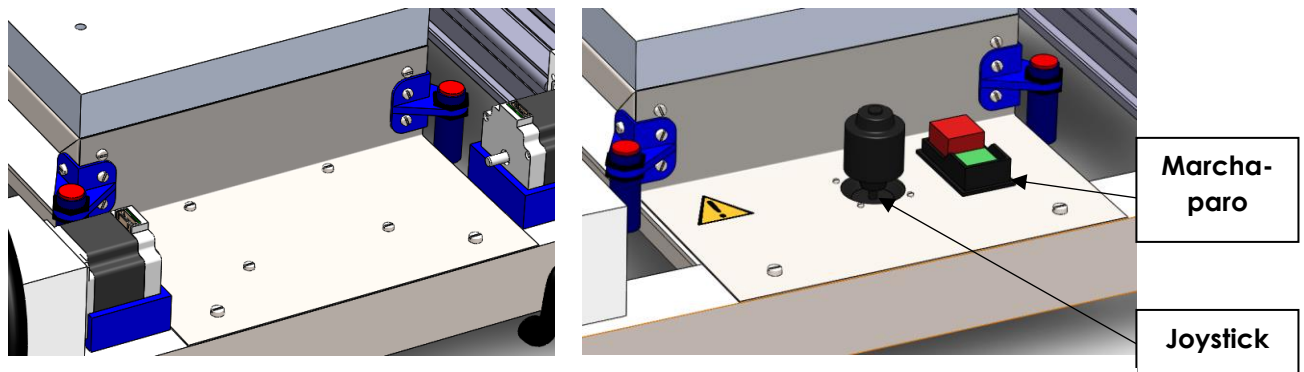


Figura 35 Carcasas delantera y trasera

4.1.5.2.- Accionamiento y control

En esta categoría se incluyen el joystick y el botón marcha-paro.

El joystick es el control manual de la máquina. Es un elemento que funciona en los 3 ejes (X, Y y Z) y que permite al usuario desplazar el palpador, posicionarlo para ejecutar algún comando automático o directamente realizar mediciones manuales.

El botón marcha-paro conecta y desconecta la máquina de la corriente eléctrica. Consiste en un par de pulsadores señalados con sus colores correspondientes (verde para marcha, rojo para paro); por seguridad, el botón de paro sobresale para que en caso de accidente sea más sencillo apagar el sistema.

4.1.5.3.- Sujetacables

Es una espiral helicoidal de plástico que cubre el cableado que se encuentra a la vista. De esta forma se agrupan todos los cables y se evita que éstos queden atascados en partes móviles de la máquina durante su funcionamiento, además de proteger al usuario de posibles calambres derivados de la manipulación de cables defectuosos (Figura 36).

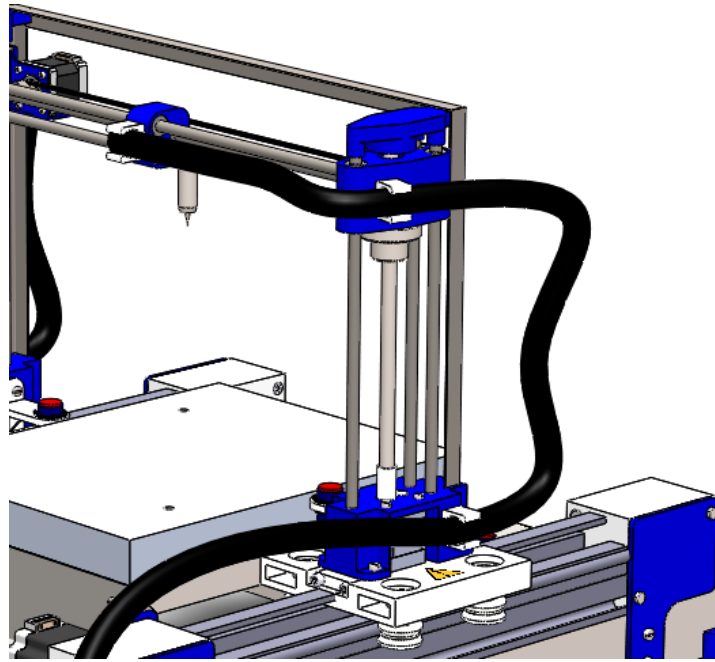


Figura 36 Sujetacables

4.1.5.4.- Componentes eléctricos

En este caso la referencia es al conjunto de componentes eléctricos que se incluyen en la máquina, tales como los drivers de los motores, la placa CNC y el controlador Arduino. Todos estos elementos se guardan en una caja destinada para este propósito y se coloca debajo de la carcasa trasera, atornillada.

Relación de piezas englobadas en la categoría "otros elementos":

Pieza	Cantidad	Nº Plano	Material
Interruptor marcha-paro KLD-28A	1	-	-
Carcasa delantera	2	1.07	Chapa de acero inoxidable
Sujetacables	2	-	-
Sujeción sensor difuso base	4	1.09	PLA
Joystick	1	-	-
Sensor difuso PNP	4	-	-
Tuerca sensor difuso	8	-	-
Componentes eléctricos	1	-	-

4.2.- Selección de materiales y procesos

En general, en el diseño se han incluido pocas piezas a fabricar, las cuales desempeñan funciones estructurales y de soporte a los elementos de transmisión, guiado y control de la máquina. Como se señala en los criterios de diseño, se han empleado materiales económicos que, posteriormente, se han comprobado mediante análisis estáticos y dinámicos para verificar su resistencia y rigidez. También se han empleado procesos de fabricación más baratos para reducir costes todo lo posible.

Se han usado 3 materiales diferentes dependiendo de la forma y función de las piezas a fabricar, cada uno con sus procesos de fabricación correspondientes:

- **Plástico PLA:** Elegido principalmente por su uso en **impresión 3D**, un proceso de fabricación económico y que permite producir piezas de geometrías complejas. Para aumentar la precisión de algunos de los elementos de cada pieza (como taladros, planos que funcionan como dátums), se han sometido a un **mecanizado** para refinar el acabado y las tolerancias. Las piezas fabricadas en PLA son piezas de soporte y sujeción con formas complejas, como el carro del palpador, los soportes de los motores y las sujeciones de la viga horizontal con los husillos, para los que. Las uniones con el resto de los elementos son mediante tornillos.
- **Acero estructural S235:** Utilizado en forma de perfiles comerciales para construir el esqueleto de la máquina. Es un material excelente para las vigas que van a soportar el peso de las guías, el puente móvil y el resto de los elementos, y con una gran rigidez que evita deformaciones y posibles errores en la calibración. Las vigas **se cortan en ángulo** para su posterior **soldadura**, y se unen a otras piezas mediante tornillos.
- **Chapa de acero inoxidable 301:** Empleado en piezas que requieren un grosor fino y cierta resistencia mecánica, como es el caso de las carcasas. Para darles forma, se someterán a procesos de **corte y plegado**. Como el resto de los elementos, se unen a otras piezas mediante tornillos y tuercas.

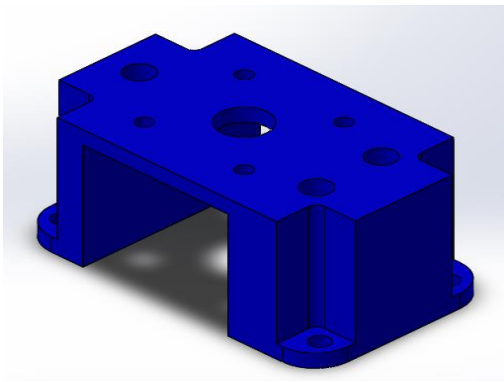


Figura 38 Pieza en PLA

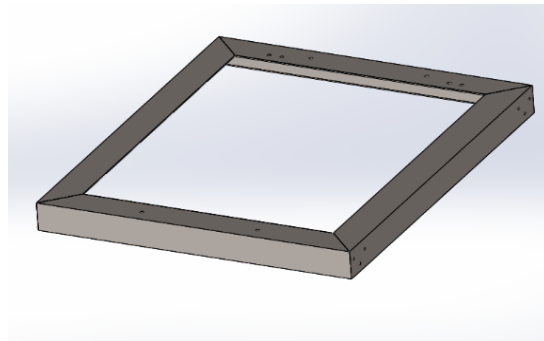


Figura 37 Perfil de acero soldado

Además de esto, se emplean otros procesos de fabricación comunes a todas las piezas como roscados y taladrados, con el fin de unirlos entre ellas.

Los datos técnicos más relevantes de los materiales empleados son los siguientes:

	Acero laminado S235	Acero inoxidable 301	Plástico PLA
Densidad (g/cm ³)	7.85	7.9	1.24
Módulo de elasticidad (GPa)	210	200	3.3
Límite elástico (MPa)	235	210	55 - 72

4.3.- Relación completa de piezas de diseño propio y elementos comerciales

4.3.1.- Piezas de diseño propio

Denominación	Material	Proceso de fabricación	Cantidad
Bloque plástico pata	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4
Estructura soporte	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Sujeción portacables	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	7
Unión base-motor X	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Acoplamiento motorX-guía	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción guías X	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4
Soporte mesa planitud	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Apoyo soporte mesa planitud	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Carcasa delantera	Chapa de acero inoxidable	Plegado + Taladrado	2
Acoplamiento tornillo-motorY	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción motorY-guías-varilla	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Acoplamiento simétrico	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Eje polea no motriz	Acero inoxidable	Mecanizado	1
Soporte palpador	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	1
Soporte superior husillo y varilla	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Estructura rígida	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Sujeción sensor difuso puente	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción sensor difuso base	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4

4.3.2.- Elementos comerciales

Tipo	Denominación	Cantidad
Guía lineal motorizada	AK208-R	2
Tornillo trapezoidal	tipo KKA – material C45 1.0503 (T10x2)	2
Placa aluminio rectificada	ISO 6753-1 - 315x250x32 mm	1
Varilla lisa acero	Createc 306	9
Polea dentada	GT2 20 dientes	2
Correa dentada	GT2 6mm	1
Pata plástico negra	H14 Ø35mm	5
Rodamiento lineal	LM8UU 24 mm	6
Rodamiento lineal	LM8UU 45 mm	3
Motor paso a paso	Nema MS23HA8P4150-E	1
Motor paso a paso	LMS172-T6503	1
Motor paso a paso	Nema MS14HA3P4032	1
Encoder incremental	ENC-7741 Inc Encoder, NEMA 17-23	2
Encoder incremental	E4T Differential OEM miniature, NEMA 14	1
Contador digital	Texas Instruments CD74HC192E	1
Sensor de detección difusa	FOT.PNP NO/NCM 18 XUB0APSNM12	4
Placa electrónica control	ARDUINO UNO Rev3	1
Módulo de control CNC	Shield V3	1
Sensor de fuerza resistivo	Sparfunk SPRK-SEN-09375	10
Tubo organizador de cables	STEREN, 1.5 m x 20 mm	1
Sonda de disparo por contacto	TP20 A-1371-0270	1
Palpador por contacto	Rubí M2 Ø0,7mm A-5000-7801	1
Tornillo cabeza hexagonal	DIN 24017 - 24018	6
Tuerca hexagonal	ISO 4032-4034	36
Tornillo cabeza ranurada	DIN EN ISO 1207	74
Tornillo avellanado cabeza ranurada	DIN EN ISO 2009	7
Rodamiento de agujas	DIN 5405 K5x8x8	1
Rodamiento de bolas	DIN 628 7200B	1
Cableado	1,5 mm sin halógenos	10
Interruptor marcha paro	KLD-28A 45x22 mm	1

4.4.- Sistemas de transmisión y guiado

4.4.1.- Eje X

Se ha considerado el **movimiento horizontal del puente móvil completo** (de atrás hacia adelante) como eje X. Para la transmisión del movimiento y el guiado del sistema se ha utilizado el mismo elemento: en este caso, las dos guías lineales motorizadas mencionadas previamente que incluyen un sistema de correa dentada que mueve el carro.

Las guías se localizan en la base del puente móvil, una bajo cada pata, que se desplazarán de forma sincronizada (Figura 39).

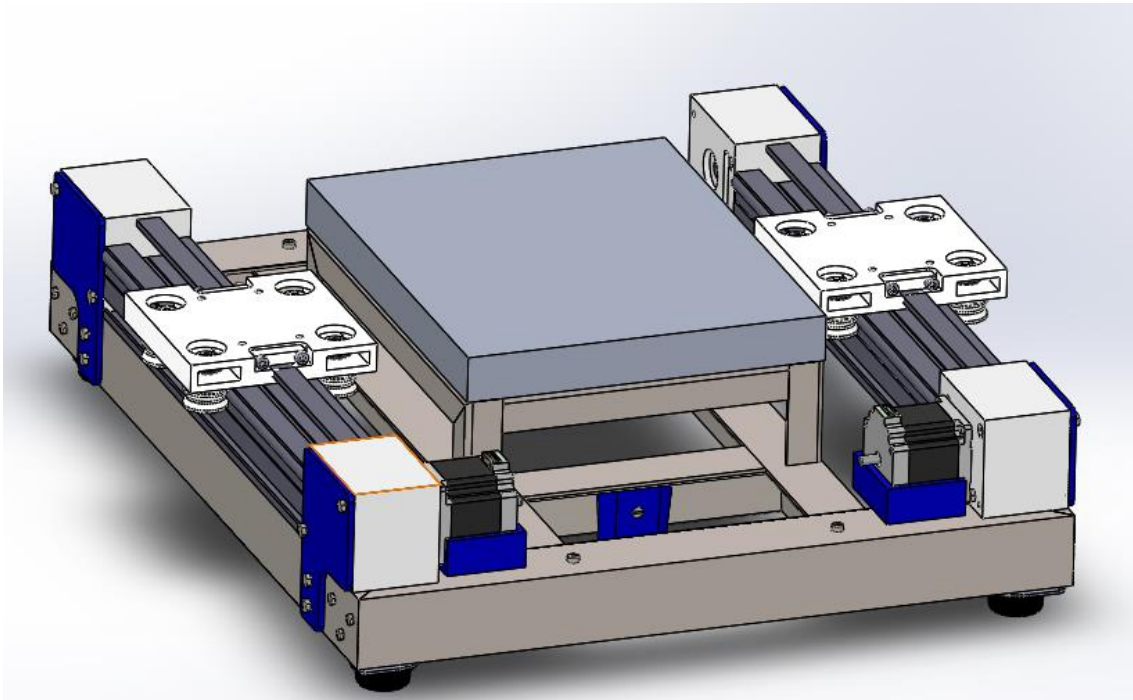


Figura 39 Guías motorizables instaladas con sus sujeciones y motores

4.4.2.- Eje Y

Se ha considerado la **elevación de la viga horizontal** del puente móvil como eje Y, por tanto, el movimiento vertical del palpador. Para este movimiento se han utilizado dos elementos diferentes para la transmisión y para el guiado, a diferencia del eje X en el que se emplea un solo sistema que cumple ambas funciones:

- Para la **transmisión del movimiento** se han empleado por un par de **husillos trapezoidales Conti 10x2 mm** colocados en los extremos de la

viga horizontal. Estos husillos son accionados por sus correspondientes motores colocados en la base y anclados a los carros de las guías motorizadas; por su parte, las tuercas se fijan a cada uno de los extremos de la viga horizontal, permitiendo de esta forma su ascenso y descenso simultáneo (Figura 40).

- El modelo de tornillo y tuerca se ha seleccionado por su tamaño reducido y por su precisión aceptable dentro de los límites establecidos (0,05 mm siendo el rango límite de 0,2 mm (+/-0,1 mm)).
- Para el **guiado** de la viga a lo largo del husillo se ha empleado un conjunto de **3 varillas** por cada husillo colocadas formando un triángulo, para dar mayor rigidez a la estructura y que sea capaz de soportar los esfuerzos dinámicos a los que se va a someter. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En la pieza de unión entre los husillos y la viga horizontal se colocan unos rodamientos lineales que deslizarán sobre las varillas.

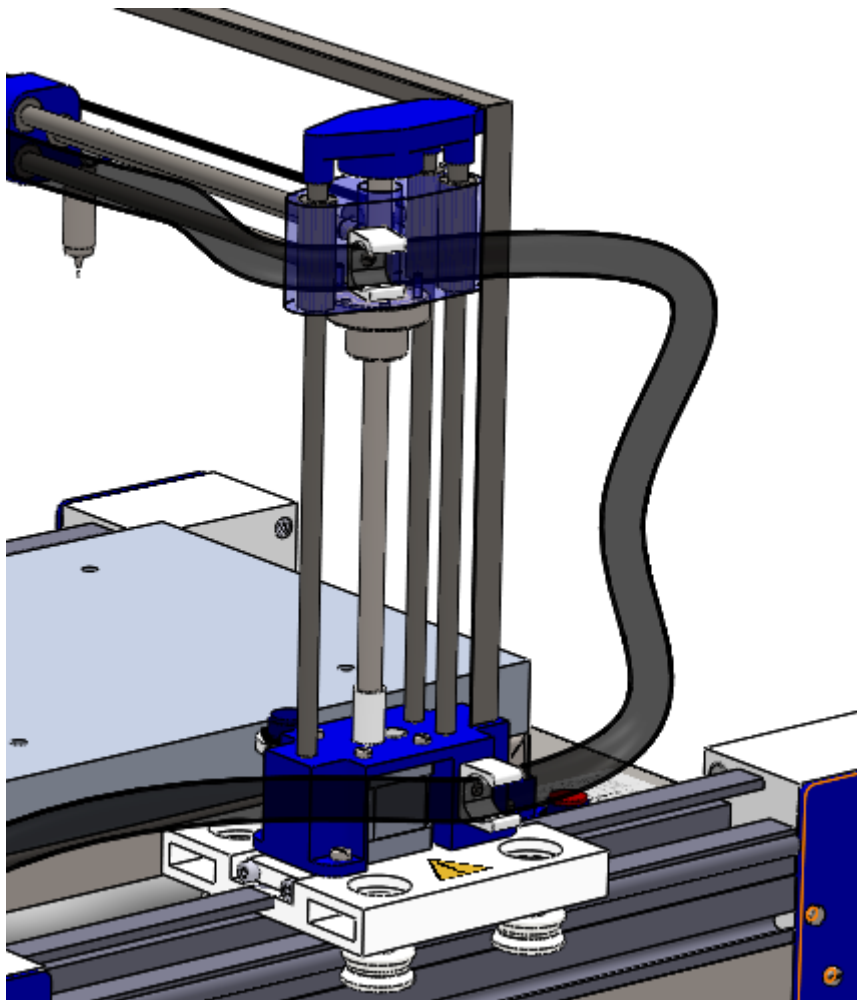


Figura 40 Montaje sistema elevación

4.4.3.- Eje Z

En la máquina, el eje Z se corresponde con el movimiento horizontal del carro sobre el que se monta el palpador. En este caso también se ha usado un sistema específico para las funciones de transmisión y guiado, por separado (Figura 41; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

- La **transmisión del movimiento** del motor se ha realizado mediante un **sistema de correa dentada** especializado para impresoras 3D, con una polea de 6 mm y 20 dientes y su correspondiente correa de caucho. Este sistema es el más adecuado para la viga ya que es más ligero y preciso.
- El **guiado** del carro a través del eje Z se consigue de la misma forma que en el eje Y, utilizando **3 varillas de acero lisas** de 8 mm de diámetro y 3 rodamientos lineales situados en el soporte del palpador. Este sistema impide que el carro pueda sufrir desviaciones y con ello una pérdida de precisión.

El carro es el elemento principal de este eje ya que da soporte al palpador y a sus cables y partes electrónicas, a la vez que permite que se desplace longitudinalmente.

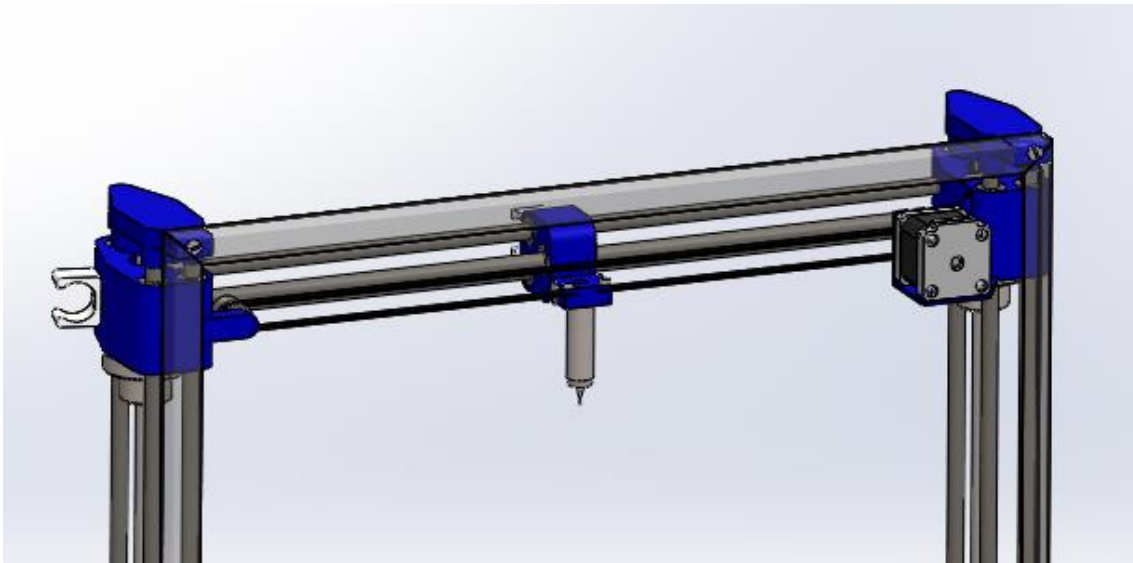


Figura 41 Viga horizontal Z

4.5.- Accionamientos eléctricos

La toma de datos se realiza en los 3 ejes (X, Y y Z) mediante el movimiento del palpador a lo largo de ellos. Para conseguir este movimiento se necesita un actuador por lo menos en cada uno de los ejes, excepto en el caso de la guía inferior en la que, por seguridad y para maximizar la precisión, se empleará un motor en cada uno de los lados de la base.

El movimiento debe ser controlado para poder tomar las coordenadas de forma correcta, por lo que el tipo de motor más adecuado es el **paso a paso**. Estos motores además incorporan un encoder lineal para mejorar la resolución.

Los modelos seleccionados son de la empresa Moons, y según el eje (y, por tanto, el peso a mover y el espacio disponible), se ha optado por los siguientes motores:

- Para el eje X el motor seleccionado es el **MS23HA8P4150**, un motor híbrido de alta precisión cuyas características técnicas se pueden ver en la Figura 42
- En el eje Y se ha utilizado un motor lineal **LMS172-T6503** en el que se sustituye el pivote del motor por un hueco donde insertar el husillo, cuyas características se pueden ver en la Figura 43.
- El eje Z se moverá mediante un motor híbrido similar al del eje X, pero de menor tamaño y potencia, de referencia **MS14HA3P4032** (Figura 44).

MS23HA - 4 Lead Bi-Polar

Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
	Single Shaft	P=Plug L=Leads	Amps (mounted)	Nm Typ.	oz-in TYP.	@20 °C	Typ.	mNm	oz-in	g cm ²	oz-in ²	kg	Lbs
39 mm (1.54 in.)	^ MS23HA0P4100	P	1	0.59	84	6.3	19.8	24	3.4	121.5	0.66	0.42	0.93
	^ MS23HA0P4160	P	1.6	0.60	85	2.6	8.1						
	^ MS23HA0P4220	P	2.2	0.60	85	1.39	4.3						
	^ MS23HA0L4350	L	3.5	0.59	84	0.56	1.62						
55 mm (2.17 in.) 1 Stack	^ MS23HA8P4100	P	1	1.50	210	7.6	50	45	6.4	221	1.2	0.6	1.3
	^ MS23HA8P4150	P	1.5	1.40	200	3.1	21						
	^ MS23HA8P4220	P	2.2	1.50	210	1.6	10.5						
	^ MS23HA8L4360	L	3.6	1.50	210	0.63	3.9						
	^ MS23HA8L4550	L	5.5	1.50	210	0.28	1.56						
77 mm (3.03 in.) 2 Stack	^ MS23HAAP4100	P	1	2.30	330	8.8	61	70	9.9	391	2.1	1	2.2
	^ MS23HAAP4150	P	1.5	2.40	340	4.3	29						
	^ MS23HAAP4200	P	2	2.30	330	2.3	15.2						
	^ MS23HAAP4300	P	3	2.40	340	1.1	6.9						
	^ MS23HAAL4500	L	5	2.30	330	0.39	2.4						

^ Preferred model

Figura 42 Datos técnicos motor eje X

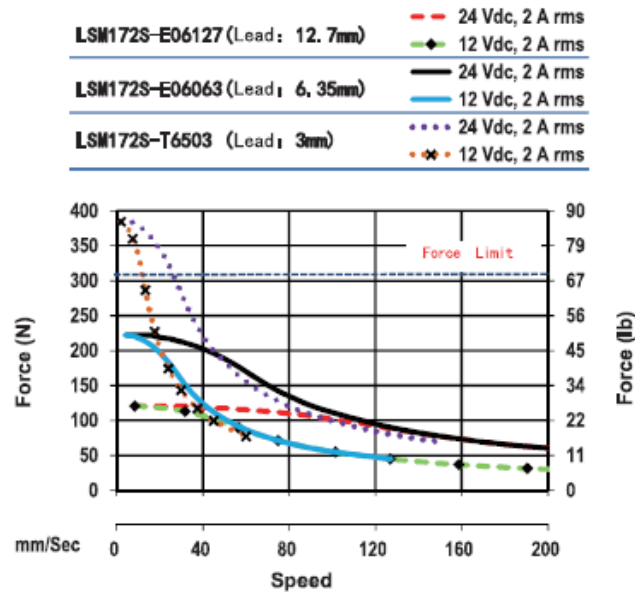


Figura 43 Curva de par motor eje Y

MS14HA - 4 Lead Bi-Polar

Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
	Single Shaft	P=Plug L=Leads	Amps (mounted)	Nm Typ.	oz-in TYP.	@20 °C	Typ.	mNm	oz-in	g cm ²	oz-in ²	kg	Lbs
27.3 mm (1.07 in.)	MS14HA1P4026	P	0.26	0.10	15	49	56						
	^ MS14HA1P4070	P	0.7	0.11	15	6.6	8.2	4	0.57	12	0.066	0.15	0.33
	^ MS14HA1P4100	P	1	0.10	15	3.3	3.9						
	^ MS14HA1P4150	P	1.5	0.11	15	1.55	1.8						
36 mm (1.42 in.)	MS14HA3P4032	P	0.32	0.19	27	37	51						
	^ MS14HA3P4075	P	0.75	0.18	25	6	8.6	8	1.1	20	0.11	0.21	0.46
	^ MS14HA3P4100	P	1	0.18	25	3.3	4.9						
	^ MS14HA3P4150	P	1.5	0.18	25	1.61	2.2						
55.5 mm (2.19 in.)	MS14HA5P4040	P	0.4	0.32	45	30	49						
	^ MS14HA5P4100	P	1	0.32	45	5.1	8.2	10	1.4	35	0.19	0.24	0.53
	^ MS14HA5P4150	P	1.5	0.32	45	2.1	3.6						
	^ MS14HA5P4200	P	2	0.32	45	1.34	2.1						

^ Preferred model

Figura 44 Características técnicas motor eje Z

4.5.1.- Encoders

Para tomar la posición de cada uno de los motores se han empleado 3 encoders incrementales, uno por cada eje. Se han seleccionado según su tamaño, adaptándolos al tipo de motor:

- Para los ejes X e Y se ha utilizado un encoder **ENC-7741 Inc Encoder**, ideal para los motores NEMA 17 y 23 (Figura 45).
- El encoder anterior no es válido para el motor NEMA 14 del eje Z, por lo que para éste se ha usado un **E4T Differential OEM miniature** (Figura 46). Se ha seleccionado el modelo de **2000 pulsos/vuelta**.

Encoders

For NI NEMA 17, 23, 24, and 34 Size Stepper Motor Rear Shaft



- 2000 counts per revolution (CPR)
- A, B, and Z (index) channels
- Differential outputs
- 5 mm, 1/4 in., or 3/8 in. hub diameter

Figura 45 Encoder ejes X e Y

E4T

OPTICAL ENCODERS



Features and Benefits:

- Compact miniature size best for NEMA 8, 11, 14, and 17.
- 100 to 500 cycles per revolution (CPR)
- Single ended or differential output options
- High retention Snap-in polarized connector
- Tracks from 0 to 100,000 cycles/sec
- 400 to 2000 pulses per revolution (PPR)
- -20 to + 100°C operating temperature

Figura 46 Encoder eje Z

La resolución de los encoders hace que el controlador Arduino encargado de la recepción de los datos de coordenadas no sea capaz de leer dichos datos con la velocidad necesaria, ya que su frecuencia es mucho mayor que la capacidad del controlador. Para solucionar esto se emplea un **contador digital Texas CD74HC192E** conectado a la placa, con capacidad de lectura de 24 MHz, que permite realizar el conteo correctamente de los datos enviados por los encoders.



Top-Quality-Tools

Figura 47 Contador digital

4.6.- Automatización y control

4.6.1.- Sensorización

4.6.1.1.- Palpador y sonda

El palpador es el elemento más importante a la hora de tomar los datos referentes a las mediciones. Se produce un contacto directo entre la pieza y el palpador, el cual genera una señal eléctrica en la sonda de disparo por contacto que es transmitida al ordenador, con la correspondiente información de las coordenadas del punto marcado.

El palpador y la sonda seleccionados son los modelos de la serie **TP20**, que incluyen el **módulo de fuerza estándar** (ref: A-1371-0270, Figura 49) y el **palpador recto de bola de rubí de 0,7 mm** (ref: A-5000-7801, Figura 48).



Figura 49 Módulo de fuerza estándar



Figura 48 Palpador recto

4.6.1.2.- Sensor de final de carrera

Los sensores de final de carrera evitan que las guías, el puente móvil o el carro impacten con los topes de su recorrido, pudiendo provocar daños en los elementos de la máquina.

Se han seleccionado unos **sensores de fuerza resistivos** (Figura 50) que, debido a su pequeño tamaño, se pueden colocar directamente sobre los diferentes elementos sin necesidad de piezas específicas para ellos. Estos sensores se pueden programar como detectores de presión para desconectar el sistema en caso de ser activados.



Figura 50 Sensor de fuerza resistivo

4.6.1.3.- Sensor de alerta

Sistema de sensores que alertan al usuario de que el palpador ha sobrepasado los límites de medición. Es el paso previo a los finales de carrera: avisan de que el sistema de medida ha entrado en una zona de potencial riesgo. Se han empleado **sensores de detección difusa** para desempeñar esta tarea debido a su rango de detección (intermedio, con mayor rango que un detector inductivo o capacitivo) y que no requieren de un elemento receptor externo (como es el caso de otros sensores ópticos).

El modelo seleccionado es el **PHOTOELECTRIC SENSOR 18MM PNP XUB** (Figura 51) de la marca Schneider Electric (ref: XUB0APSNM12). Se requiere de un sensor que sea capaz de detectar el carro o el puente móvil a su distancia máxima pero que no detecte otros objetos más lejanos; Este modelo presenta una distancia de detección normal de 0,3 metros y una máxima de 0,4 m (Figura 52), un valor ligeramente superior a la distancia máxima a la que se puede encontrar el carro o el puente móvil, por ello es el idóneo.



Main

Range of product	OsiSense XU
Series name	General purpose multimode
Electronic sensor type	Photo-electric sensor
Sensor name	XUB
Sensor design	Cylindrical M18
Detection system	Multimode
Material	Plastic
Line of sight type	Axial
Type of output signal	Discrete
Supply circuit type	DC
Wiring technique	3-wire
Discrete output type	PNP
Discrete output function	1 NO or 1 NC programmable
Electrical connection	1 male connector M12, 4 pins
Product specific application	-
Emission	Infrared diffuse Infrared diffuse with background suppression Infrared thru beam Red polarised reflex
[Sn] nominal sensing distance	3 m polarised reflex need reflector XUZC50 20 m thru beam need a transmitter XUB0AKSNM12T 0.12 m diffuse with background suppression 0.3 m diffuse

Figura 51 Sensor difuso. Modelo y características principales

Complementary

Enclosure material	PBT
Lens material	PMMA
Maximum sensing distance	0.12 m diffuse with background suppression 0.4 m diffuse 30 m thru beam 4.5 m polarised reflex
Output type	Solid state
Add on output	Without
Status LED	1 LED (green) for supply 1 LED (red) for instability 1 LED (yellow) for output state

Figura 52 Características secundarias

4.6.2.- Sistema de control

4.6.2.1.- Hardware

Para realizar las tareas de control de los distintos sensores se ha empleado una placa electrónica **Arduino Uno REV3** (Figura 53), que cuenta con 6 entradas analógicas y 14 entradas/salidas digitales. Los datos técnicos se encuentran en la Figura 54:



Figura 53 Arduino Uno

Especificaciones **Arduino UNO (rev3)**:

- Microprocesador ATmega328
- Tensión operativa 5V
- Tensión de alimentación (recomendado) 7-12V
- Tensión de alimentación (limites) 6-20V
- 14 Entradas/Salidas Digitales (6 de estas se pueden utiliza para salidas PWM)
- 6 Entradas Analógicas
- Maxima corriente continua para las entradas: 40 mA
- Maxima corriente continua para los pins 3.3V: 50 mA
- Flash Memory 32 KB (el bootloader usa 0.5 KB).
- SRAM 2 KB
- EEPROM 1 KB
- Velocidad del Clock 16 MHz

Figura 54 Especificaciones técnicas

Esta placa Arduino se encarga de cargar el programa y dar instrucciones a los diferentes elementos. Para controlar estos componentes se ha empleado una placa **CNC Shield V3**, de 4 ejes, capaz de controlar tanto los motores como los finales de carrera del sistema (Figura 55). Los datos técnicos se encuentran en la Figura 56.

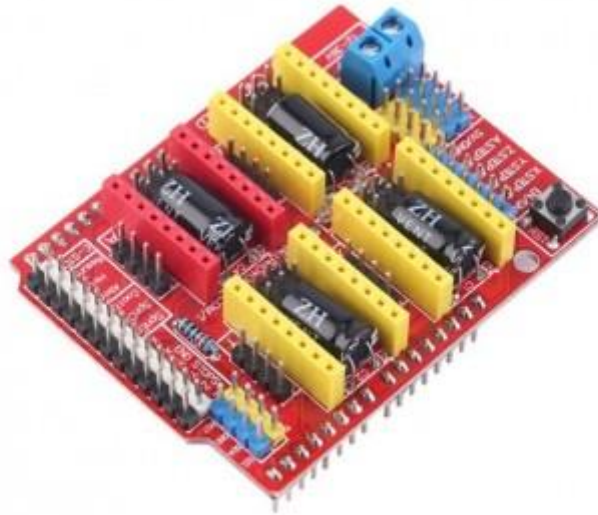


Figura 55 Placa CNC Shield V3

Características:

- Compatible con [GRBL 0.8c](#). (Firmware Open Source para Arduino que convierte G-code a instrucciones para motores PAP)
- Soporte para 4 ejes (X, Y, Z, A)
- 2 conexiones para finales de carrera para cada eje (6 en total)
- Salida "Spindle enable" y "direction"
- Salida "Coolant enable"
- Compatible con Pololu A4988 y DRV8825
- Jumpers para control de micro-stepping (Los controladores como el DRV8825 soportan hasta 1/32 para más precisión)
- Diseño compacto
- Los motores pueden ser conectados con bornes tipo Molex de 4 pines
- Alimentación: 12-36V DC. (Dependiendo de los controladores utilizados)

Figura 56 Datos técnicos placa CNC

4.6.2.2.- Diagrama eléctrico

Para ilustrar las distintas conexiones entre componentes se ha realizado un esquema eléctrico simplificado:

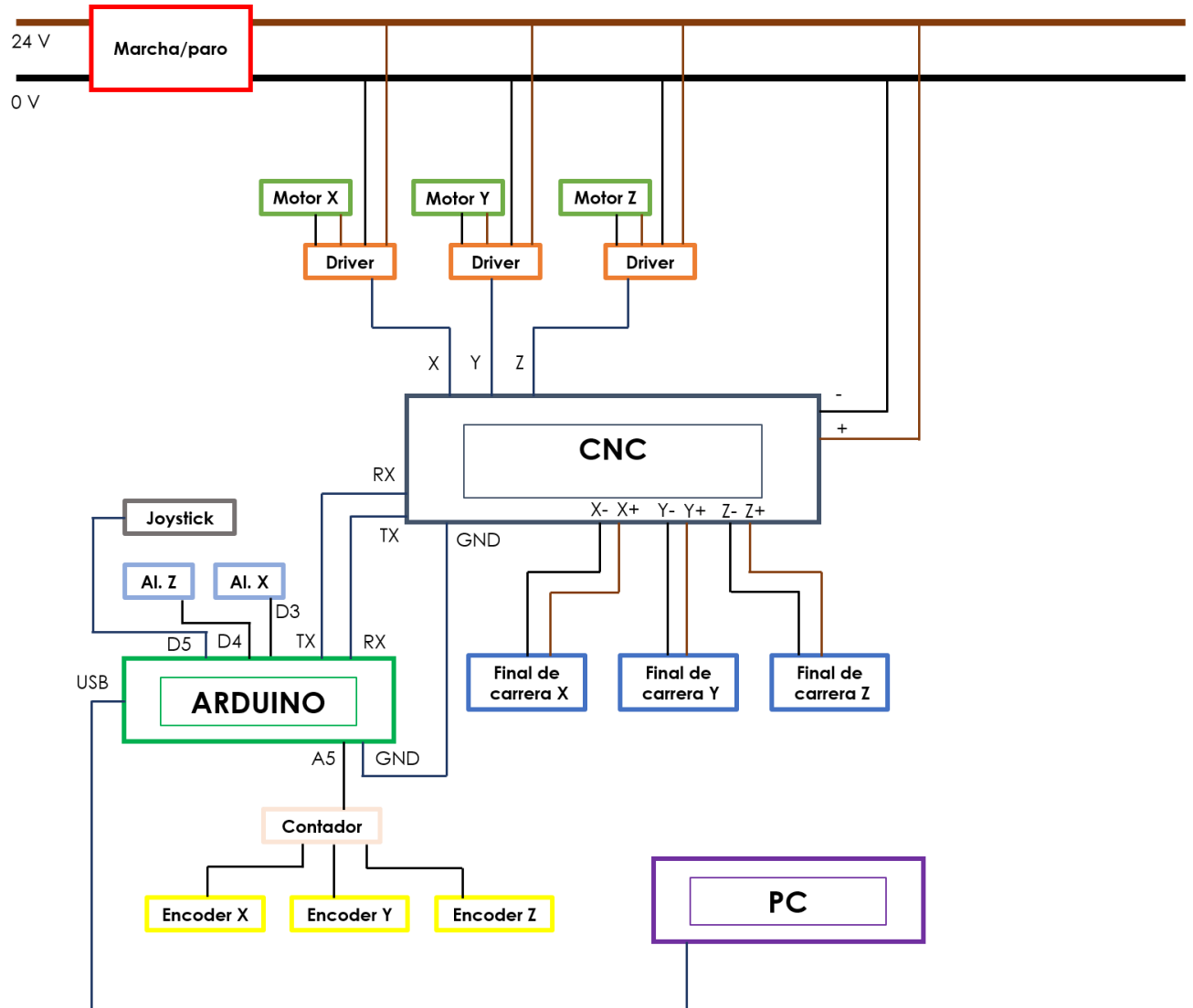


Figura 57 Esquema eléctrico

Se han conectado los accionadores eléctricos con sus respectivos drivers y los sensores de final de carrera directamente a la placa CNC, que se encarga de suministrar las órdenes procedentes del Arduino. La conexión Arduino-CNC es de tipo entrada/salida, por lo que ambos pueden enviar y recibir información: en este caso, Arduino proporciona las instrucciones necesarias mientras que la placa CNC se encarga de devolver la información tomada.

Tanto los encoders como los sensores difusos de alarma y el Joystick se conectan al Arduino, sin paso previo por la placa CNC; los encoders se instalan en las

entradas analógicas previo paso por el contador de reloj (que es capaz de leer los datos tomados y enviarlos al Arduino) mientras que el Joystick y los sensores difusos se conectan en las entradas digitales.

Por último, se conecta el Arduino al PC.

Un esquema más detallado de la conexión de los motores a los drivers es el siguiente, dado por el fabricante, en el que se puede observar también cómo se conectaría a una placa de control:

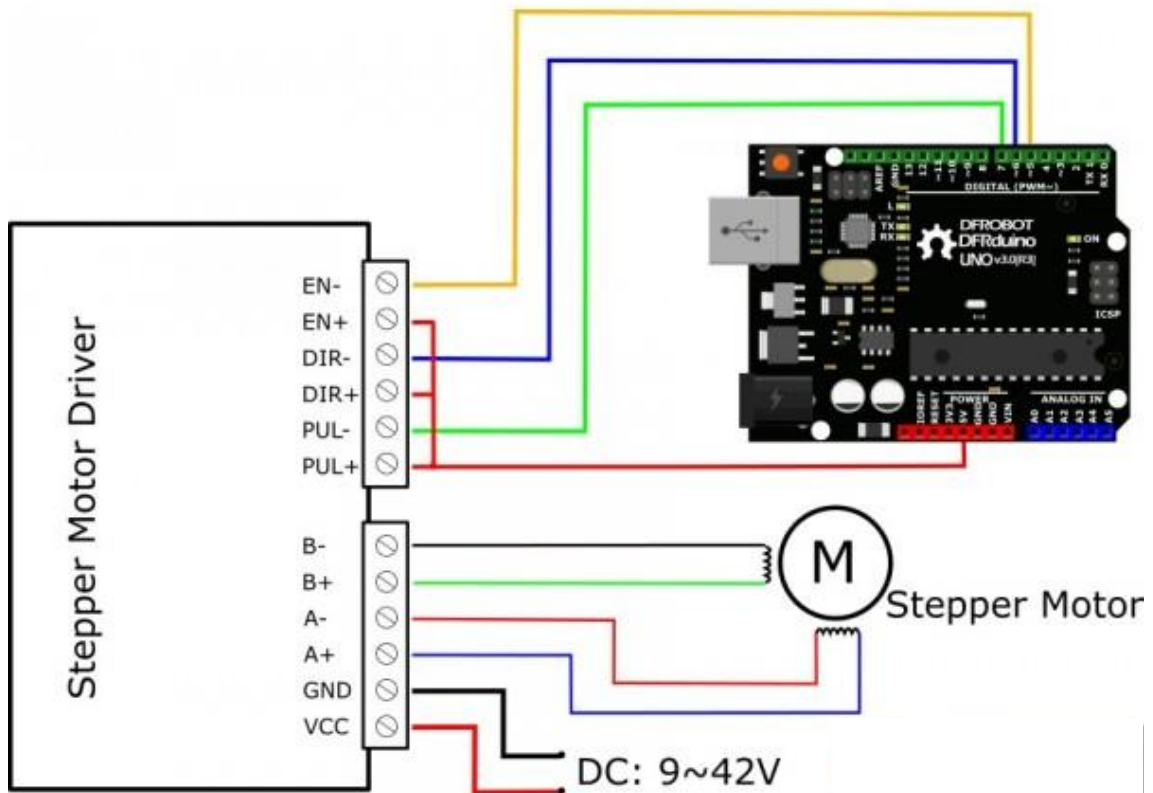


Figura 58 Conexiones driver-motor

4.6.2.3.- Software/grafcets

Una MMC funciona como un periférico conectado a un ordenador, por lo que, además del sistema de control interno formado por los elementos mencionados anteriormente, es necesario un software específico instalado en el ordenador que permita gestionar y ordenar todos los comandos y operaciones que la máquina debe realizar.

El software seleccionado es Metrolog X4 (Figura 59), un programa de medición 3D que permite extraer las coordenadas directamente de las piezas mediante

MMC y otros sistemas de medida como Laser Tracker, brazos de medición, escáneres 3D, etc. Mediante Metrolog X4 se pueden tomar medidas de las piezas a la vez que compararlas con su archivo CAD original, calcular tolerancias dimensionales y geométricas e incluso programar mediciones offline.

Metrolog X4, en todas sus versiones, admite archivos CAD de varios formatos (IGES, STEP) y nubes de puntos para su postprocesado convirtiéndolas en archivos mallados STL y posteriormente en archivos CAD. De todas estas operaciones es posible extraer informes personalizados con diferentes vistas y etiquetas para mostrar los datos más relevantes: desviaciones, cotas dentro y fuera de tolerancias, mapas de color, etc (Figura 60).



Figura 59 Software Metrolog X4

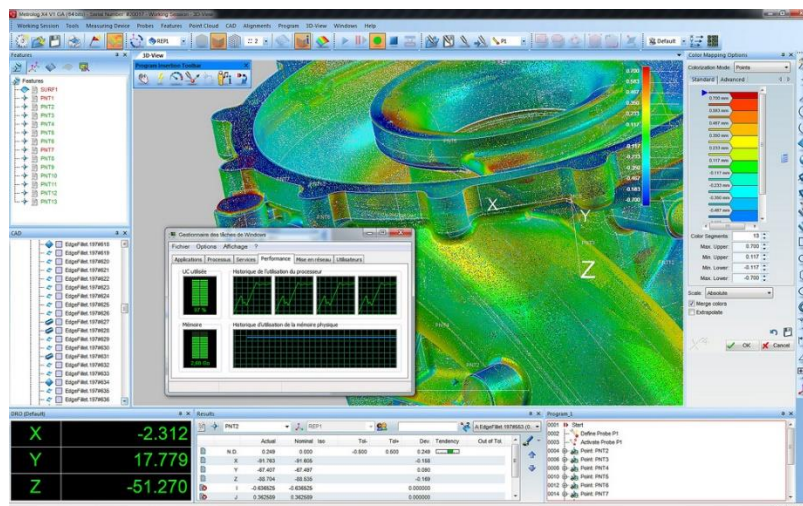


Figura 60 Interfaz

Para automatizar la medición de una MMC se requiere de un programa personalizado para cada pieza, ya que dependiendo de las geometrías a medir se debe seguir una trayectoria distinta, con varias orientaciones de palpador (cuando éste es móvil) e incluso distintos tamaños de bola, por lo que no es posible generar un graficet que pueda englobar la medición de cualquier pieza.

En su lugar, se ha realizado un **grafcet que simularía de forma teórica elementos básicos a medir mediante la MMC**, cómo se activarían los distintos modos y, por último, un sistema de seguridad empleando los distintos sensores y finales de carrera localizados en la máquina.

Entradas, salidas y variables

En primer lugar, se han establecido una serie de entradas, salidas y variables para implementar en el grafcet:

Entradas	Salidas	Variables
FCX: Final carrera X	MZ+: Motor Z positivo	MD: Modo (int)
FCY: Final carrera Y	MZ+: Motor Z negativo	VM: Velocidad motor (int)
FCZ: Final carrera Z	MY: Motor Y	CTD: Contador (int)
AX: Alarma límites X	MX: Motor X	
AY: Alarma límites Y	L: Alarma límite	
PL: Palpador	CRD: Transferir coordenada	
M: Marcha		
P: Paro		
J: Joystick		
CM: Cambio de modo		
ACT: Activar modo		

- **Entradas:** Se incluyen los tres finales de carrera, las alarmas de los límites de la zona de medición (en X y en Y), la señal del palpador, los botones marcha-paro, la señal transmitida por el Joystick, una entrada manual selectora de modo y un botón de activación del modo seleccionado. Estos dos últimos pueden ejecutarse mediante botones del ordenador.
- **Salidas:** Las salidas presentes en el grafcet son los motores de los 3 ejes (en el caso de que haya 2 motores en el eje se activan de forma simultánea), la alarma que alerta de que el palpador ha sobrepasado los límites de medición y una salida teórica que transferiría las coordenadas tomadas en el punto palpado. Se han incluido 2 variables diferentes para el motor Z ya que el sentido de giro del motor es relevante para la medición en algunos casos (por ejemplo, G3 palpado de un plano); en el caso de los motores X e Y no ha sido necesario realizar esta distinción.
- **Variables:** Se han creado 3 variables internas que el autómata emplearía para realizar diversas operaciones; el modo de uso (variable tipo entero, que permite seleccionar el modo de uso de la máquina), la velocidad de los 3 motores (velocidad rápida $vm=0$ para trayectorias en vacío y

velocidad lenta $v_m=1$ cuando se aproxima a la medición. La velocidad rápida $v_m=0$ es la velocidad por defecto de los motores.) y un contador auxiliar que se utiliza para contar el nº de puntos medidos.

Funcionamiento

El sistema de control se divide en 6 graficets interrelacionados, cada uno con una función diferente:

- El G0 es el graficet de seguridad; se encarga de avisar al usuario de posibles fallos y de desconectar la máquina en caso de accidente.
- El G1 se comporta como un menú inicial, ya que desde él se selecciona el modo de uso de la máquina.
- El resto de graficets (G2 a G5) desarrollan cada uno de los distintos modos de uso.

G0 – Marcha/paro

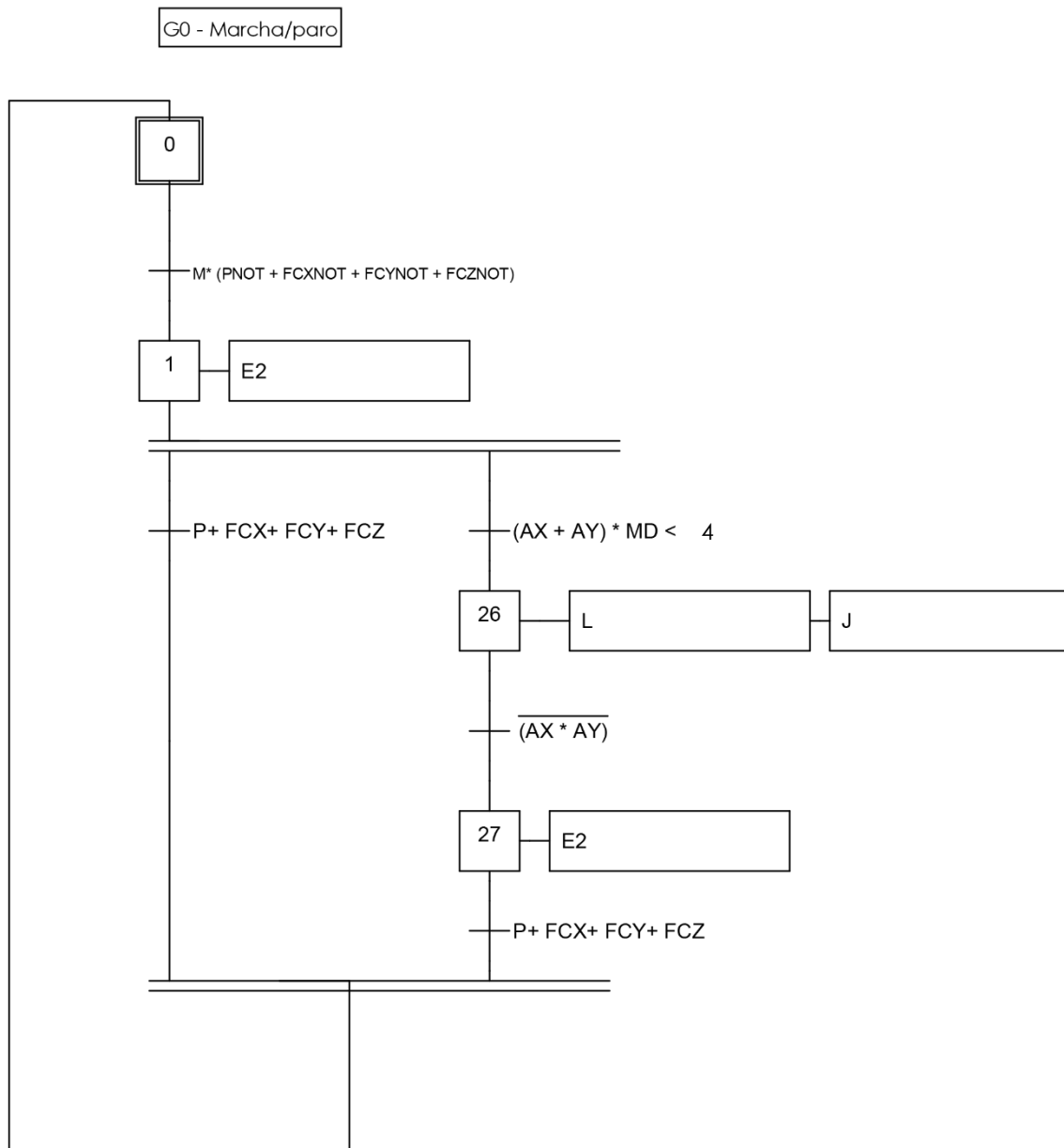


Figura 61 G0

Se trata de un grafcet con 4 etapas y 5 transiciones. Es el grafcet inicial, encargado de desconectar la máquina en caso de avería y de avisar al usuario si el palpador se sale de los límites de la zona medida.

Su primera etapa se activa al pulsar el botón de marcha siempre y cuando no estén activos los botones de paro y los finales de carrera; cuando éstos se activan, el sistema vuelve a su etapa inicial y deja de funcionar hasta que no se vuelve a pulsar el botón de marcha.

Paralelamente, si se activan alguno de los sensores difusos (siempre que no esté en uso el modo de corrección de errores, MD=4, el cual emplea estos sensores para otro propósito) se enciende la alarma de fuera de límites de medición y se activa el Joystick para corregir de forma manual este problema y devolver al palpador a su zona. Si durante esta función se activara algún final de carrera se desactivaría todo el sistema de igual modo.

G1 – Cambio de modo

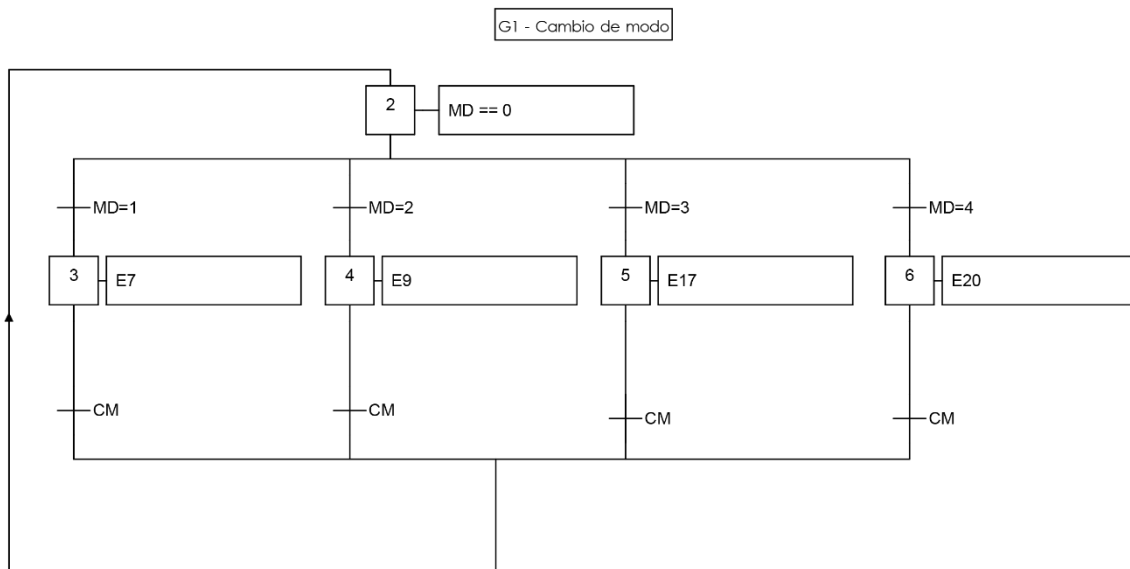


Figura 62 G1

Este graficet funciona como selector; se accede a él al pulsar el botón de marcha (redirigido desde G0) llegando a una etapa que se asegura que el modo inicial sea 0 (modo neutro). Cuando la variable MD cambia de valor (se cambia desde el ordenador directamente, siendo un nº entero cuyo valor depende del modo), se activa la etapa correspondiente que dirigirá directamente al graficet del modo seleccionado.

Cuando se presiona el botón de cambio de modo, el graficet vuelve a su etapa inicial requiriendo de una nueva selección de modo para continuar.

G2 – Modo manual

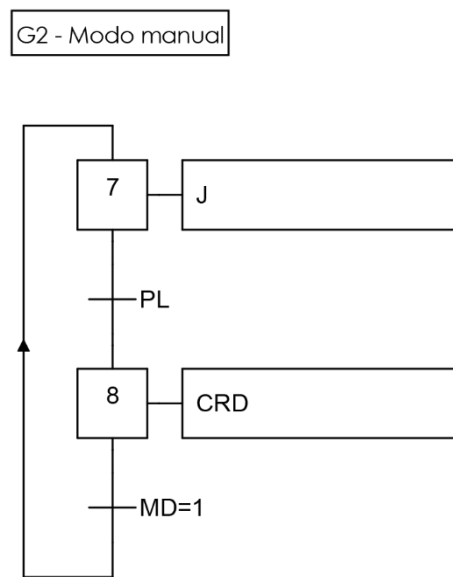


Figura 63 G2

Se activa desde G1 tras ser seleccionado desde el ordenador. La primera etapa es la etapa 7 donde se activa el Joystick; al ser manejado de forma manual, los motores se irán moviendo según los movimientos que vayan realizando. Cuando el palpador se activa, se transfiere la coordenada al ordenador y el modo continúa siempre que el valor de la variable no haya cambiado.

No sólo se emplea para tomar mediciones de puntos discretos de forma manual, sino que también permite posicionar el palpador cerca de elementos geométricos a medir con los modos automáticos.

G3 – Palpado de plano

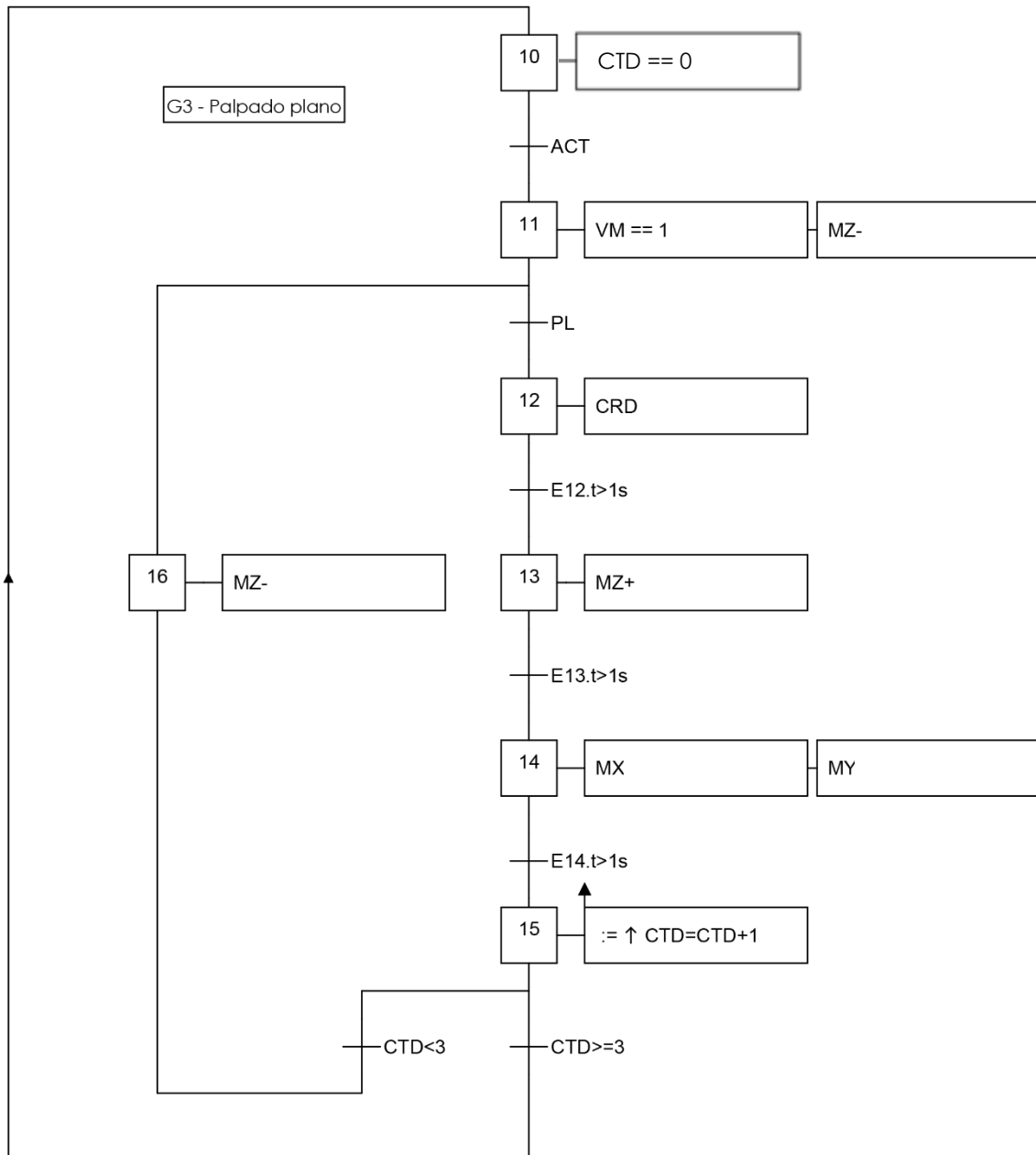


Figura 64 G3

Una de las dos opciones automáticas de medida, y también uno de los principales elementos geométricos que se pueden medir. Mediante el palpado de 3 puntos se puede construir un plano tanto horizontal como inclinado.

El selector de modo dirige a la etapa 10 en la que se reinicia el contador, esperando a que el usuario active la medición del plano. Con el palpador colocado en posición manualmente, se configura la velocidad lenta de los motores y el carro desciende al activarse el motor Z en sentido descendente. Cuando el palpador toca el objeto, se transfieren las coordenadas del punto medido y se eleva durante 1 segundo el carro; posteriormente, se mueve en horizontal mediante los motores X e Y y se activa un contador; si es el primer

punto palpado o el segundo, se repite el proceso. Si es el tercero, se vuelve al inicio.

G4 – Palpado cilindro

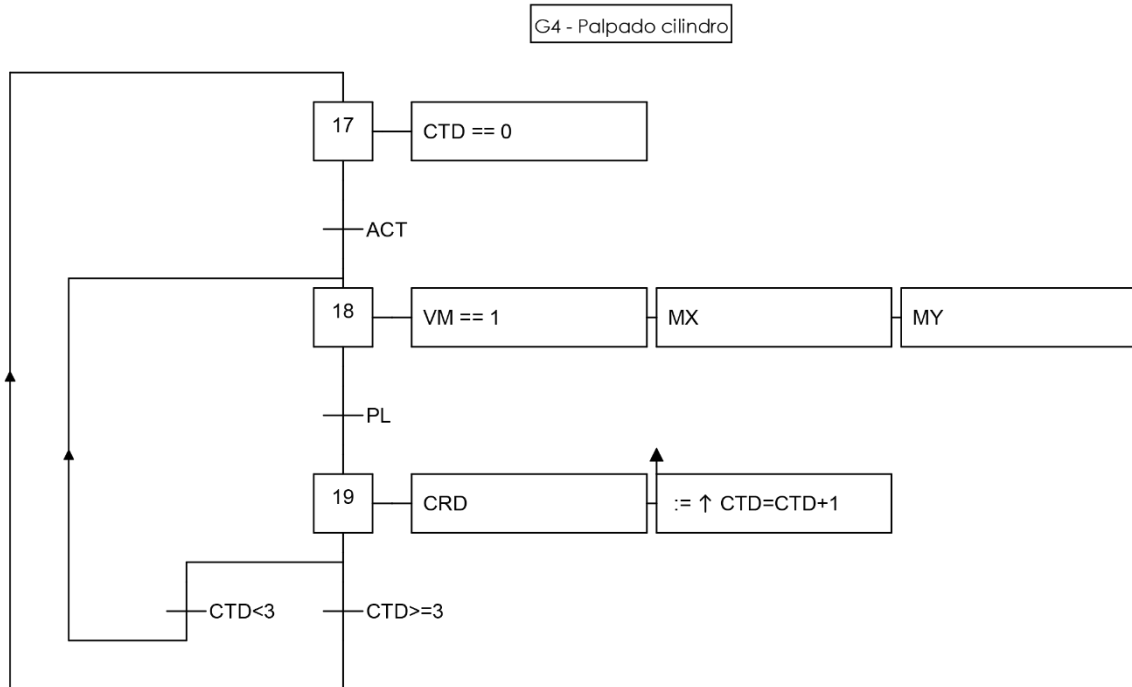


Figura 65 G4

El segundo modo automático de medición corresponde a la medida del diámetro de un cilindro. En este caso, se miden 3 puntos en el plano horizontal y se podría construir el cilindro mediante el círculo creado y el eje perpendicular al plano.

Al igual que en el modo de palpado del plano, se comienza reiniciando el contador a 0. Al iniciar la medición, se sitúa la velocidad del motor en modo lento y se accionan los motores X e Y para desplazarse en horizontal. Cuando el palpador contacta con el objeto, se transfieren las coordenadas y se suma 1 al contador. Cuando se han palpado los 3 puntos, se regresa al inicio.

G5 – Corrección de errores acumulados

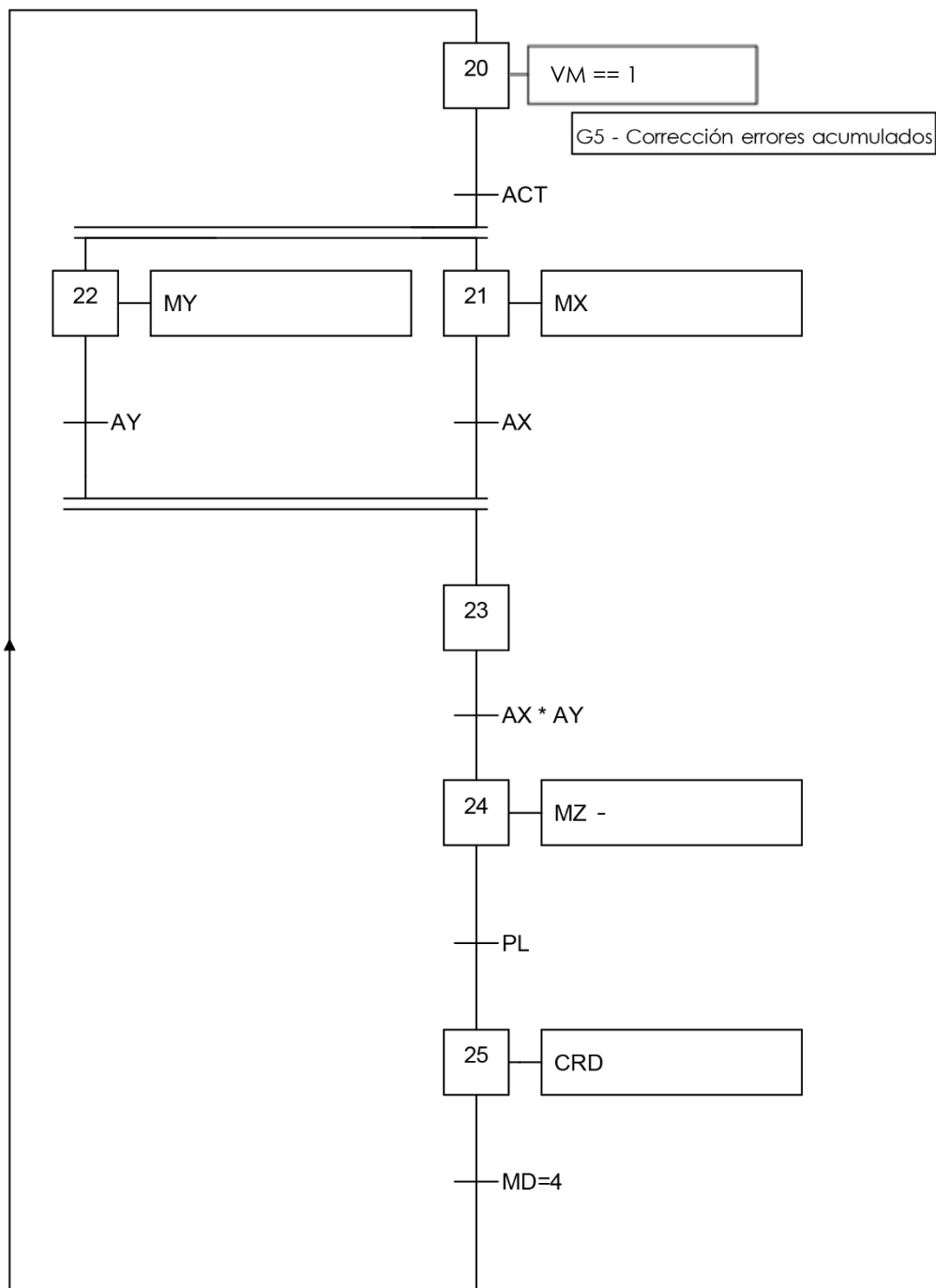


Figura 66 G5

A modo de calibración se ha incluido un modo en el que se envía al palpador a unas referencias en X, Y y Z que conformarían el punto cero máquina. Para esta función se han empleado los límites de la zona de medición (sensores difusos) y la mesa de medición.

Al iniciar se configura la velocidad lenta para no dañar el palpador, ya que va a contactar con una superficie muy dura como es la de la mesa. Simultáneamente se activan los motores X e Y para buscar los sensores. Cuando

se han encontrado ambos, el palpador desciende para contactar con la mesa. En ese momento, se transfieren las coordenadas del punto y, directamente en el ordenador, se resetean a 0. Después, vuelve al inicio.

4.7.- Análisis de resistencia por método de elementos finitos (MEF)

Para asegurar la correcta respuesta mecánica de la máquina ante los esfuerzos que va a soportar (tanto estáticos como dinámicos) se han realizado varias simulaciones mediante el método de elementos finitos (MEF). Para simplificar los análisis se han eliminado las piezas que no intervienen en la estructura de la máquina o que no van a soportar esfuerzos significativos, además de separar las dos estructuras principales para focalizar los esfuerzos.

Para la realización de este apartado se ha utilizado el software SolidWorks Simulation como herramienta.

4.7.1.- Materiales

En las estructuras analizadas se han empleado 3 materiales distintos dependiendo de la geometría y la función de las piezas; algunas de las piezas son fabricadas y otras son elementos comerciales (sólo se incluyen las piezas que soportan cargas y, por tanto, se incluyen en los análisis). La relación de materiales y piezas es la siguiente:

Acero laminado S235	Acero inoxidable 301	Plástico PLA
Soporte mesa planitud	Eje polea no motriz	Acoplamiento motorX-guía
Estructura soporte	Husillo trapezoidal 10x2 Conti	Acoplamiento tornillo-motorY
Estructura rígida	Polea GT2 20 dientes	Acoplamiento varillasZ-husillo y varillas Y
	Rodamiento lineal 8 mm	Apoyo soporte mesa planitud
	Varillas 8 mm acero	Bloque plástico pata
	Varilla lisa 8 mm acero Createc	Soporte palpador
		Sujeción motorY-guías-varilla

Como recordatorio, los datos técnicos de estos materiales son:

	Acero laminado S235	Acero inoxidable 301	Plástico PLA
Densidad (g/cm ³)	7.85	7.9	1.24
Módulo de elasticidad (GPa)	210	200	3.3
Límite elástico (MPa)	235	210	55 - 72

En este caso el acero inoxidable no se presenta en forma de chapa, como las piezas señaladas en el apartado 4.2.- Selección de materiales y procesos, sino que son geometrías con mayor espesor. Debido a que se trata de elementos comerciales y que el fabricante no ha proporcionado los datos técnicos exactos de los materiales, se han empleado los datos técnicos del acero inoxidable 301 como referencia.

4.7.2.- Requisitos técnicos y objetivos

Mediante estos análisis se busca asegurar el correcto funcionamiento de la máquina y sus sistemas, para que no sólo soporte los esfuerzos a los que va a estar sometida, sino que además garantice la fiabilidad de las mediciones que va a realizar. Los requisitos planteados para validar los resultados del análisis son los siguientes:

Análisis	Magnitud evaluada	Valor máximo aceptable
Análisis estático	Tensión Von Mises	50% límite elástico del material
	Desplazamiento resultante	0.1% longitud de la pieza
Análisis dinámico	Tensión Von Mises	50% límite elástico del material
	Desplazamiento resultante	0.1% longitud de la pieza

Dependiendo de la función de la pieza dentro del subensamblaje se puede considerar una mayor o menor restricción, la cual se indicará en dichos casos particulares.

4.7.3.- Estructura base

Se ha incluido en este análisis tanto la estructura base (que contiene las patas y los perfiles en L que forman el rectángulo inferior) como el soporte para la mesa

de planitud. Se han excluido del análisis todos los tornillos y tuercas, sustituyéndolos por las conexiones adecuadas.

4.7.3.1.- Mallado y condiciones del análisis

En primer lugar, se han definido las conexiones, sujeciones y fuerzas que intervienen en el análisis. Tanto para el estático como para el dinámico se han utilizado las mismas sujeciones; sin embargo, algunas fuerzas varían en función de su aplicación.

- **Sujeciones y conexiones:** Se han colocado restricciones de geometría fija en los 6 apoyos correspondientes a cada una de las patas (Figura 67) para simular la mesa de trabajo. Los componentes que están en contacto se han definido de forma estándar como conjunto de contactos, por lo que no se han modificado.

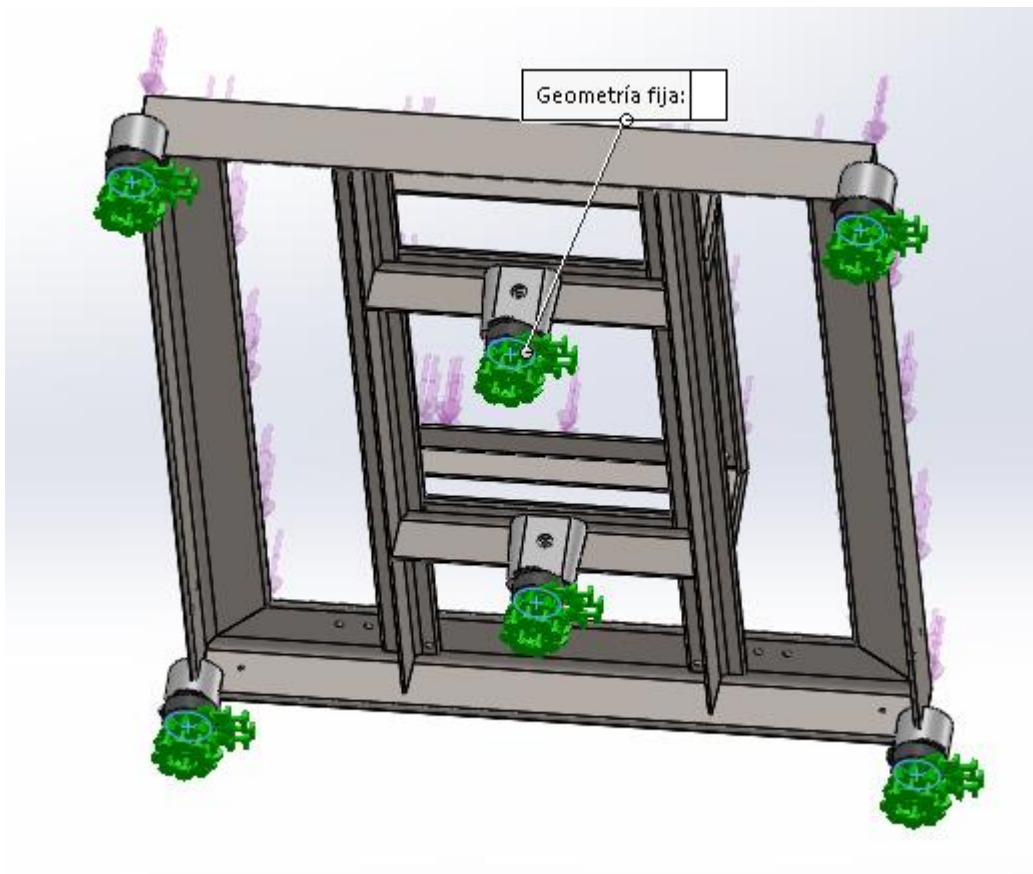


Figura 67 Geometría fija

- **Cargas aplicadas:** Se ha situado una carga diferente para cada uno de los elementos de la estructura, correspondiente al peso de los elementos que soporta **con un coeficiente de seguridad superior a 2** para incluir en el análisis un posible sobrepeso. En el rectángulo inferior se ha distribuido una carga de 250 N en los laterales donde se apoyan las guías y todo el

punto móvil (Figura 69) mientras que en el cuadrado superior del soporte de la mesa se ha colocado una carga de 150 N (Figura 68).

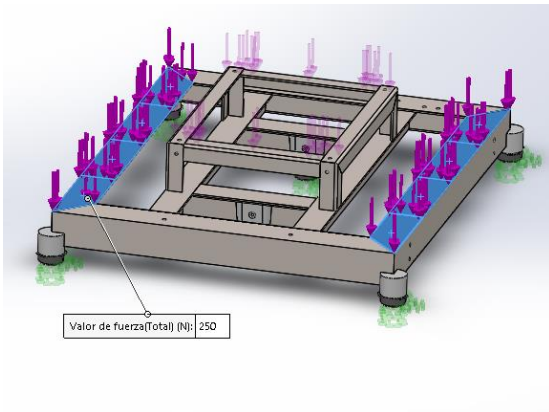


Figura 69 Fuerza 250 N

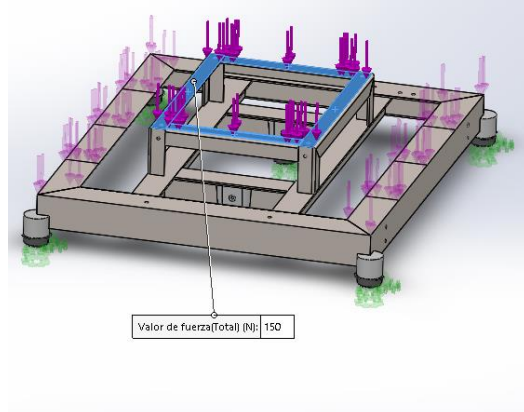


Figura 68 Fuerza 150 N

Se ha utilizado un tipo de mallado basado en curvatura con un tamaño de elementos de 5 mm, con las características indicadas en la Figura 70:

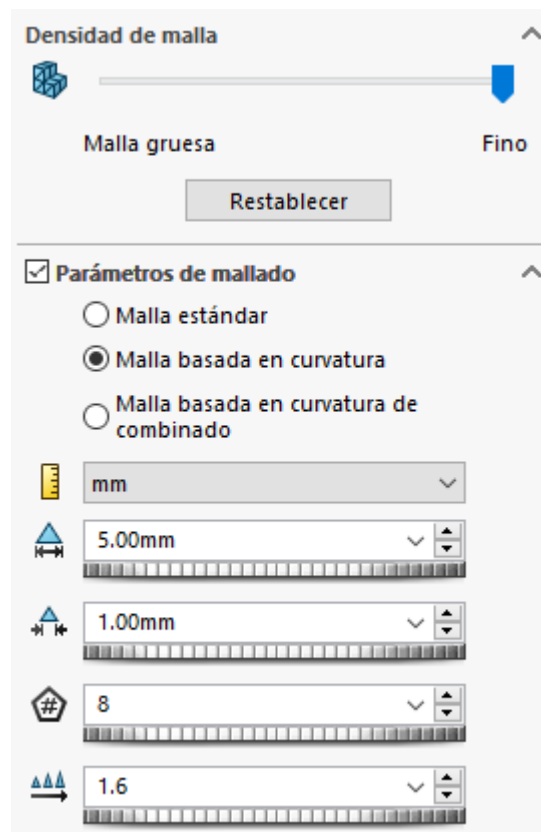


Figura 70 Detalles del mallado

4.7.3.2.- Análisis estático

Con las condiciones anteriormente descritas se ha procedido a ejecutar el análisis. Los resultados, en cuanto a tensiones y deformaciones, son los siguientes:

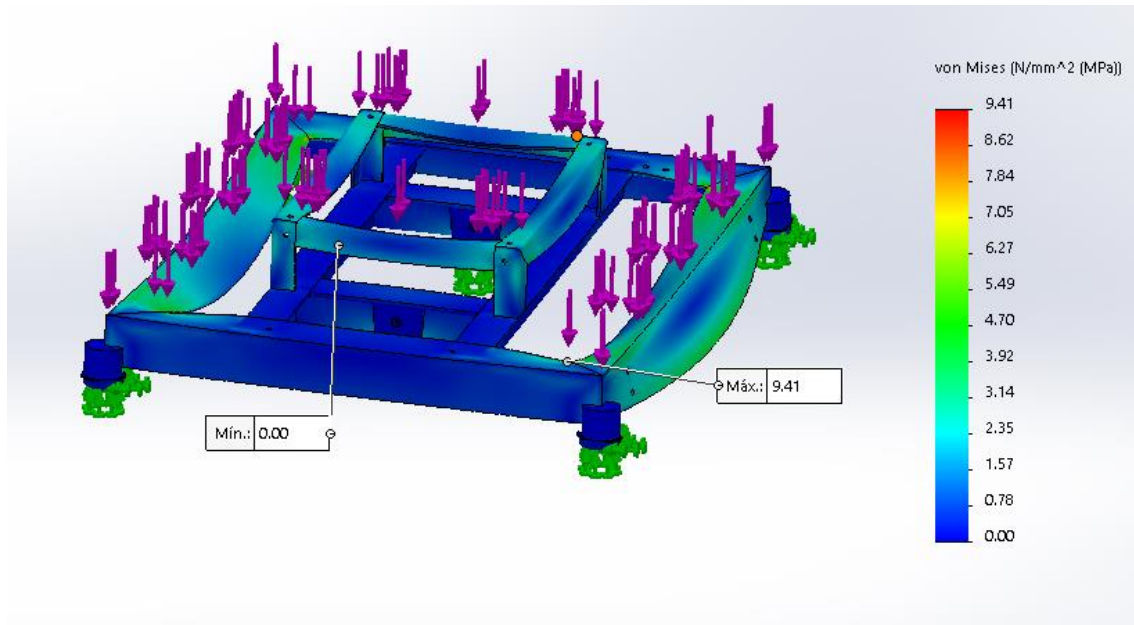


Figura 71 Tensiones resultantes

El valor máximo de la tensión resultante es de **9,41 MPa** y se da en la zona de soldadura entre los perfiles (al ser una esquina se produce una concentración de tensiones). Como el módulo elástico del material, en este caso acero aleado, es de **210 MPa**, el valor es muy inferior.

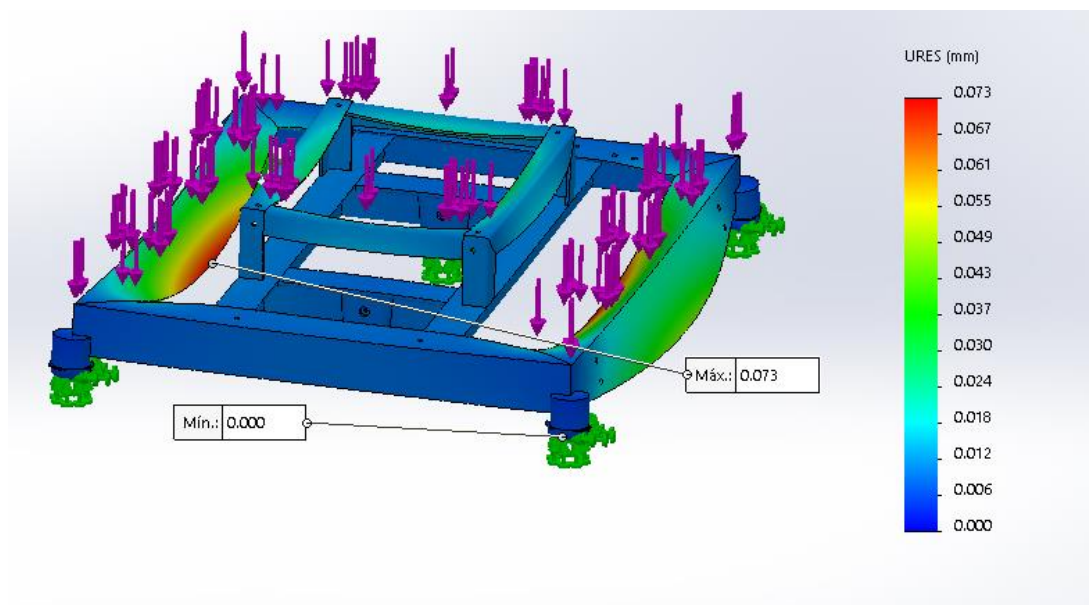


Figura 72 Desplazamientos resultantes

El desplazamiento máximo se produce en el centro de los perfiles laterales del rectángulo inferior, con un valor de 0,073 mm. Este valor es aceptable (del orden de décimas de milímetro) como se indica en la tabla de resultados final, e incluso es superior al que se daría en la realidad, ya que no se ha considerado en el análisis la rigidez de las guías que ayudarán a disminuir estas deformaciones.

4.7.3.3.- Análisis dinámico

En el análisis dinámico se ha estudiado cómo afectan las cargas producidas por el movimiento del puente móvil a lo largo de las guías.

Previamente se ha hecho un análisis de frecuencias para obtener las vibraciones naturales de la estructura y, a partir de él, seleccionar el conjunto de frecuencias con una participación importante (>80%) que se emplearán en el análisis dinámico.

Se han calculado las 12 primeras frecuencias naturales y el resultado es el siguiente:

Nº de modo	Frecuencia (Hertz)	Dirección X	Dirección Y	Dirección Z
1	146.84	0.99642	3.0647e-008	0.00038514
2	150.24	0.00039487	4.8313e-006	0.95097
3	213.75	1.4343e-008	9.338e-007	8.1948e-008
4	242.14	7.4899e-007	0.00302	0.03988
5	244.63	4.3756e-008	0.57872	0.00021351
6	265.62	3.5991e-007	1.6092e-006	0.002655
7	293.71	3.8518e-008	0.331	1.0962e-005
8	325.92	1.3123e-008	0.029415	3.614e-007
9	327.41	3.5461e-005	1.7247e-005	4.1097e-008
10	338.68	1.2602e-007	7.5014e-006	0.0043074
11	410.68	4.8144e-010	3.2823e-007	1.2405e-009
12	534.14	3.0384e-010	0.00020185	1.0372e-009
		Sum X = 0.99685	Sum Y = 0.94238	Sum Z = 0.99843

Figura 73 Listado de participación de masa en las frecuencias naturales

Se han empleado las **8 primeras frecuencias naturales**, descartando el resto ya que no tienen un peso significativo para el análisis dinámico.

Las condiciones de la simulación dinámica son prácticamente las mismas, incluyendo las sujeciones (Figura 67) y la carga localizada sobre el soporte de la

mesa (Figura 68) que recrea el propio peso de la mesa junto con la pieza colocada encima. El único cambio es la fuerza aplicada sobre los perfiles laterales; se ha sustituido la carga distribuida invariable en el tiempo por una función localizada en **4 secciones iguales de las barras** (Figura 74), simulando de esta forma el movimiento del puente móvil por las guías. A modo de ejemplo, en la Figura 75 se puede observar la variación de la carga en el segmento inicial durante un ciclo de movimiento (ida y vuelta, considerando que tarda **4,5 segundos en realizar un ciclo completo**).

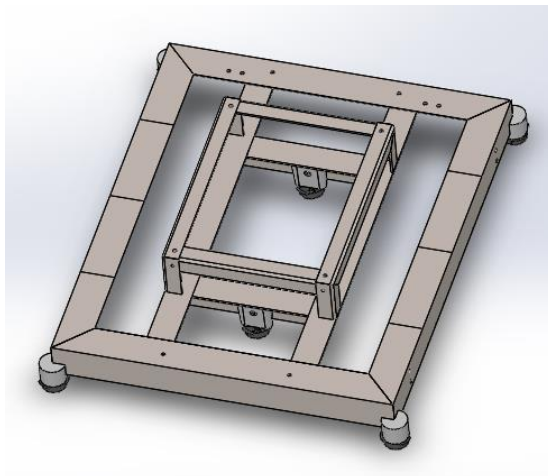


Figura 74 Particiones laterales

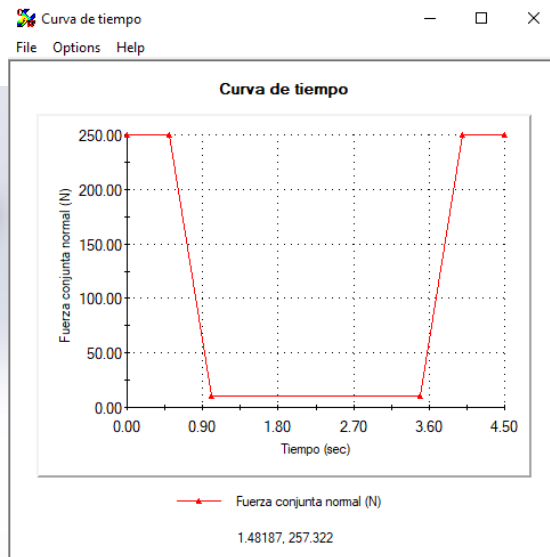


Figura 75 Curva de fuerza 1º segmento

Empleando el mismo mallado que en el análisis estático (Figura 70), se ejecuta el análisis obteniendo los siguientes resultados:

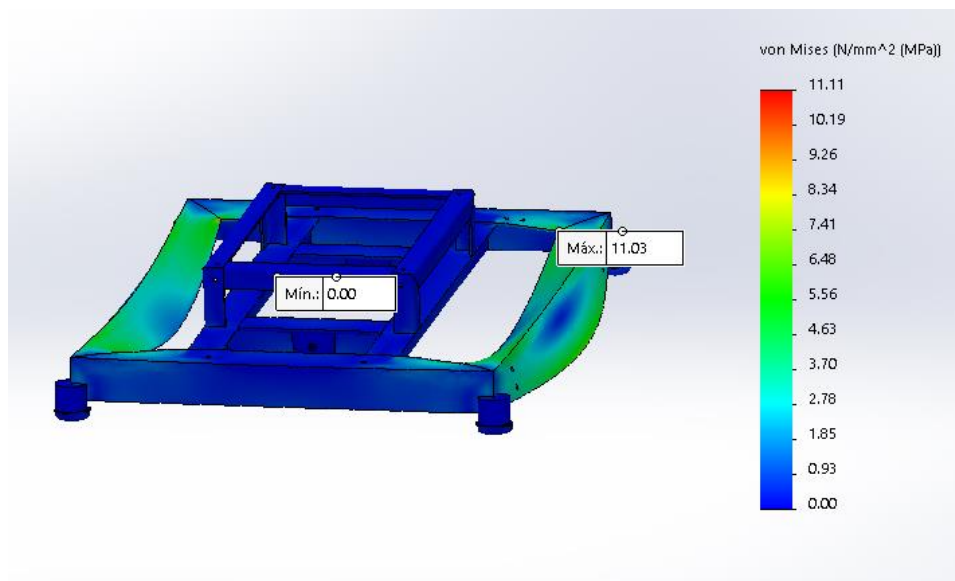


Figura 76 Tensiones resultantes

La tensión máxima se produce en los puntos de soldadura de las vigas que forman el rectángulo. El valor máximo es de **11,11 MPa**, un valor muy por debajo del límite elástico del acero (235 MPa).

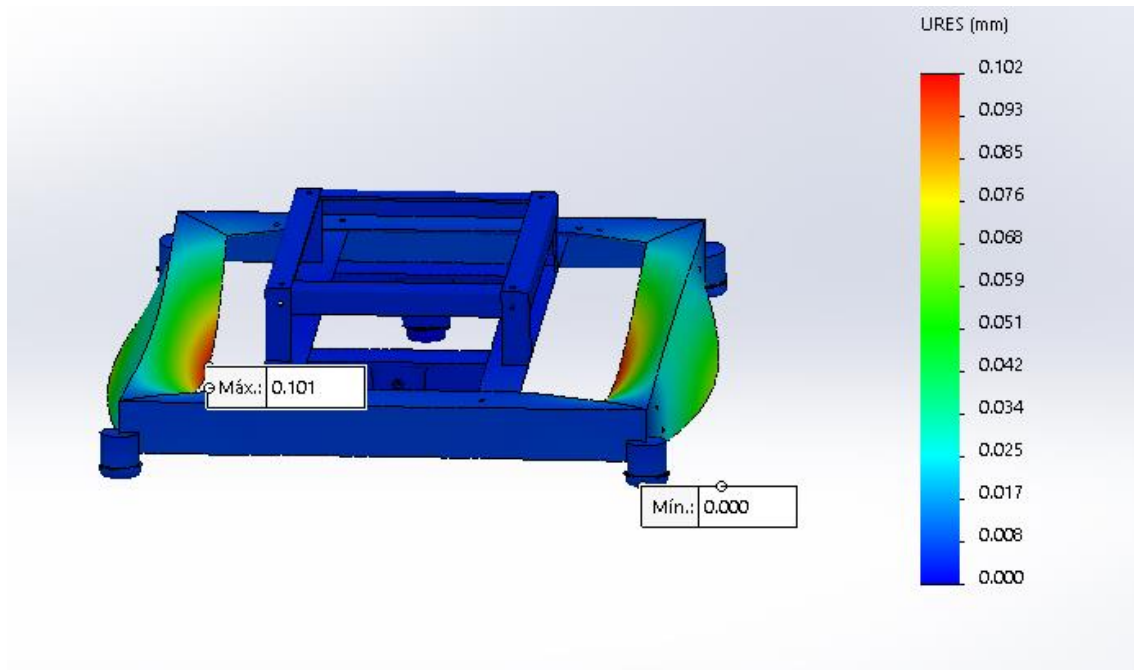


Figura 77 Desplazamientos

El desplazamiento máximo se produce en las vigas laterales cuando el puente móvil pasa justo por encima de ellos, siendo el valor de este de **0,102 mm**. Es una deformación aceptable ya que no se ha tenido en cuenta la rigidez que aportan las guías, por lo que este valor en la realidad será incluso menor.

4.7.4.- Puente móvil

La segunda estructura a analizar es el subconjunto puente móvil, que incluye los sistemas de elevación del puente con sus guías verticales (eje Y) y toda la viga horizontal con los elementos de traslación del carro (eje Z). También se incluye la estructura de soporte que aumenta la rigidez del conjunto; éste es el principal cambio con respecto al modelo de la fase preliminar, que permite además analizar la estructura completa y no cada pilar vertical por separado (en el caso del análisis dinámico).

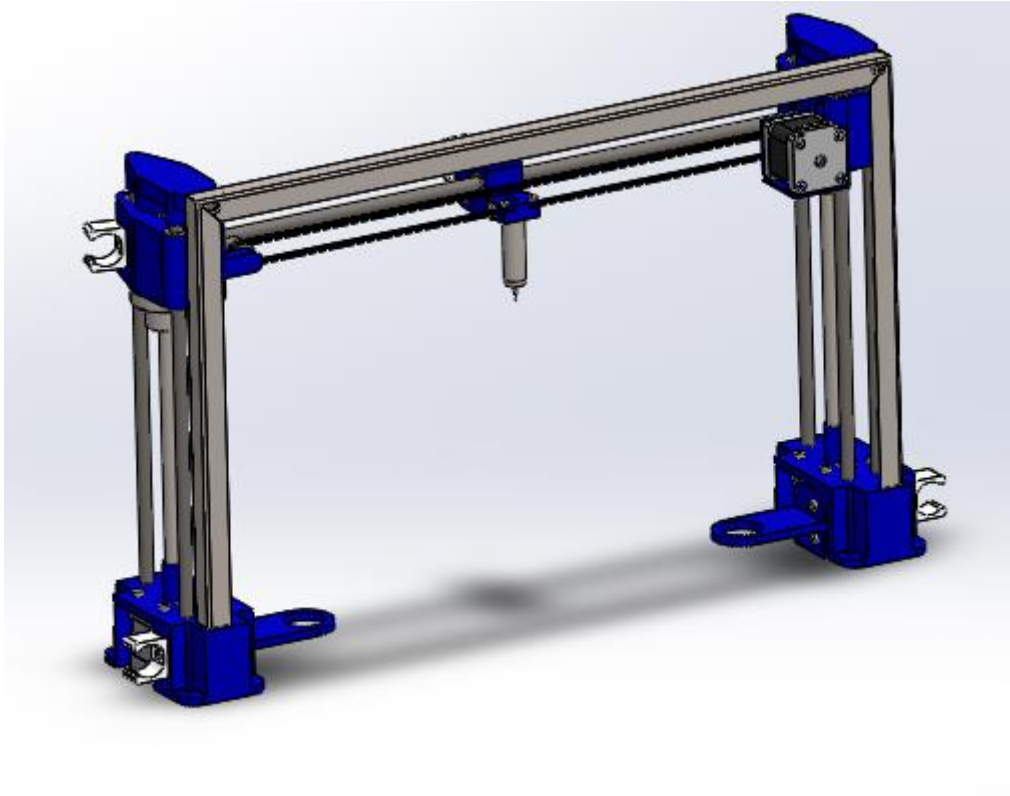


Figura 78 Puente móvil

4.7.4.1.- Condiciones del análisis

Sujeciones y conexiones

- **Geometría fija:** Se ha empleado en la base del puente móvil, simulando los contactos con las guías. Los elementos fijados son las varillas verticales y las bases de sujeción de los husillos; los motores Y no se han tenido en cuenta en el análisis.
- **Conexiones por perno:** Simulan los tornillos que unen a la estructura con los apoyos superiores. Estas uniones se han diseñado con las mismas dimensiones que los pernos originales.
- **Sobre caras cilíndricas:** Debido a que se han excluido del análisis los motores, la polea motriz de la correa de traslación del carro quedaba sin sujeción. De esta forma se permite solo la rotación de esta, simulando la conexión real. En el caso del eje de la polea conducida no ha sido necesario ya que éste se incluye en el análisis y, por tanto, se contempla dentro de los contactos entre componentes.
- **Contactos entre componentes:** Los elementos que contactan forman automáticamente una unión rígida en las caras correspondientes. Complementan al resto de las restricciones anteriormente indicadas.

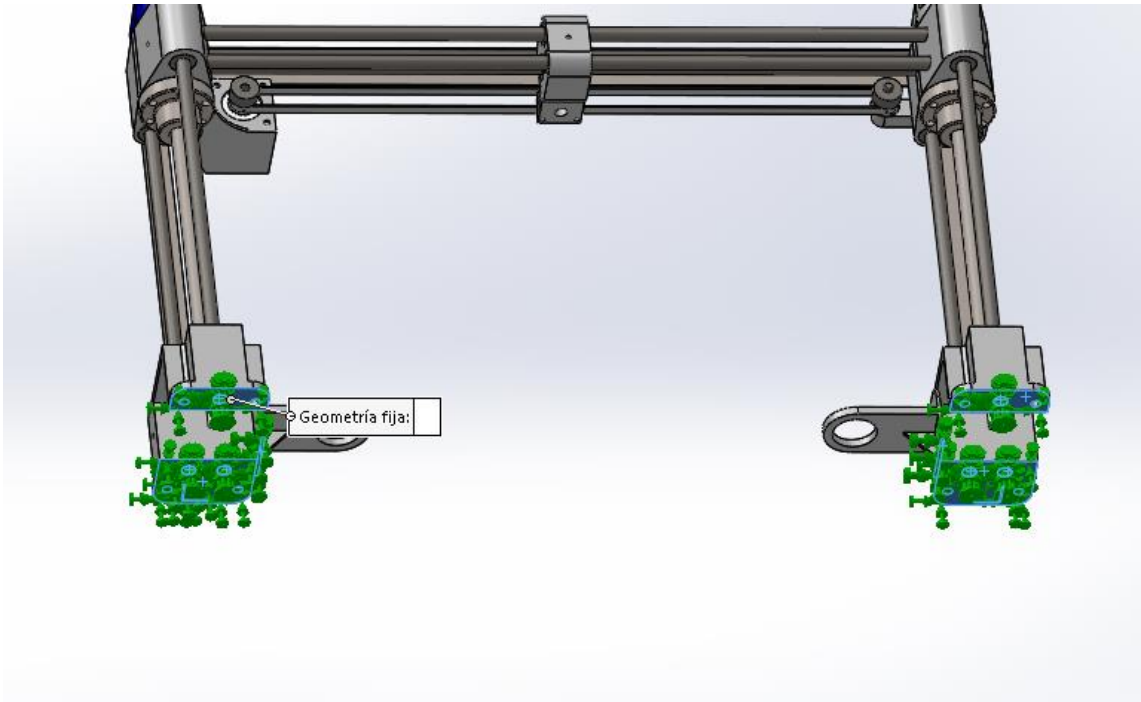


Figura 79 Geometría fija

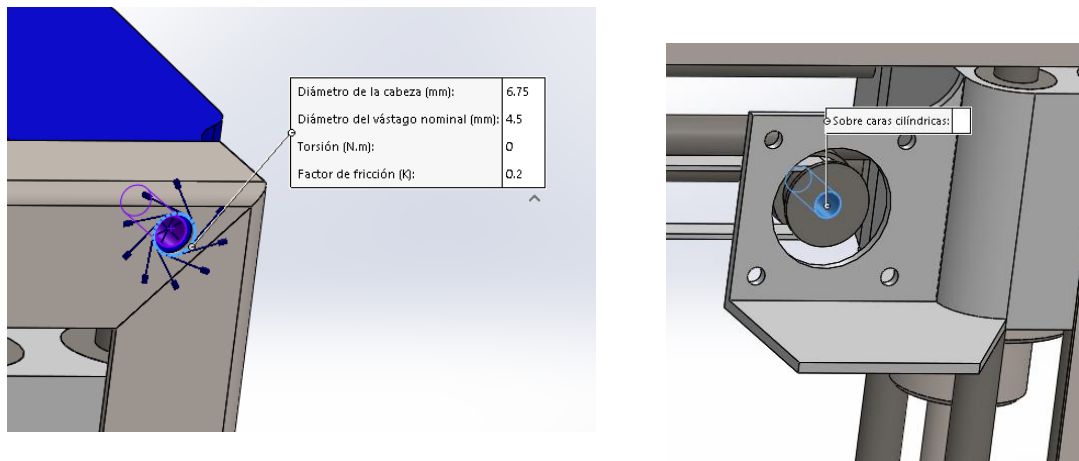


Figura 80 Conexiones por perno y caras cilíndricas

Mallado y cargas aplicadas

Se ha empleado el mismo mallado que el empleado en el análisis de la estructura base, basado en la curvatura y con elementos de 5 mm:

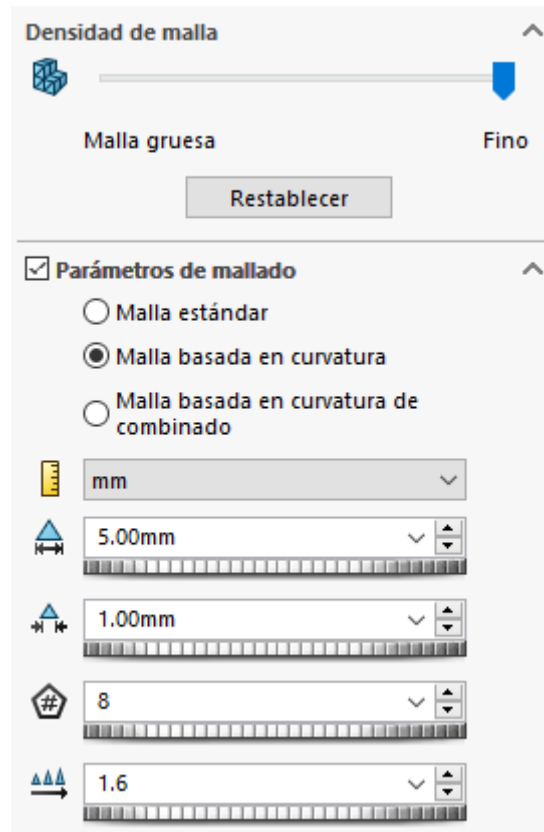


Figura 81 Mallado

Se han aplicado 2 cargas diferentes: una fuerza vertical de 10 N sobre el carro que sujeta el palpador simulando el peso del propio palpador y de sus componentes eléctricos y se ha tratado el motor Z como masa remota (Figura 82) sobre su soporte, para mantener la conexión por pernos existente.

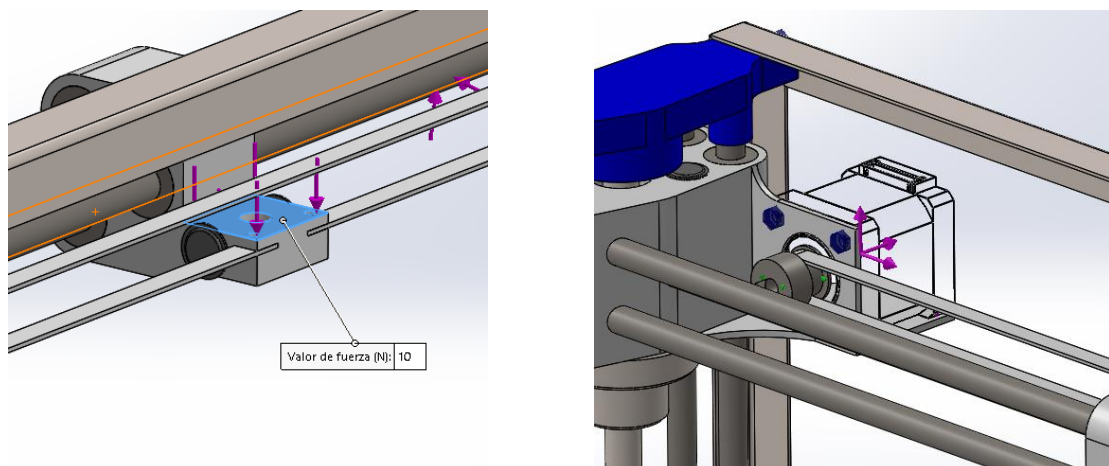


Figura 82 Carga sobre la superficie del palpador y masa libre

4.7.4.2.- Análisis estático

Con las condiciones descritas anteriormente se ha ejecutado el análisis estático. Los resultados son los siguientes:

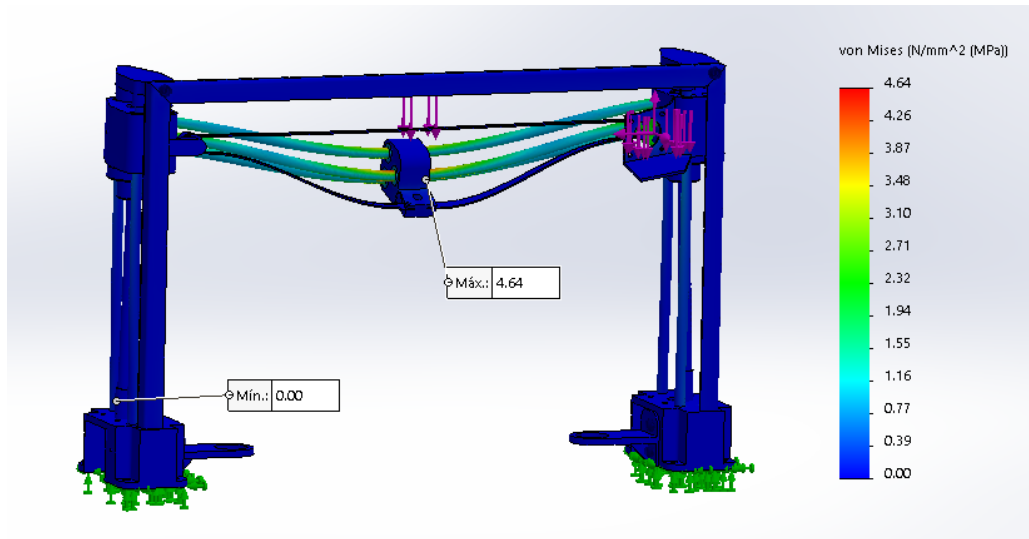


Figura 83 Tensiones

La tensión máxima es de **4.64 MPa** y se registra en la zona intermedia de las varillas superiores, justo en la parte donde se encuentra el carro con el palpador. Las tensiones no varían prácticamente con respecto al análisis preliminar, y siguen estando **muy lejos del límite elástico** del material (**210 MPa** en el acero inoxidable de las varillas). Por tanto, se puede concluir que **la estructura soportará las cargas aplicadas sin sufrir deformaciones permanentes**.

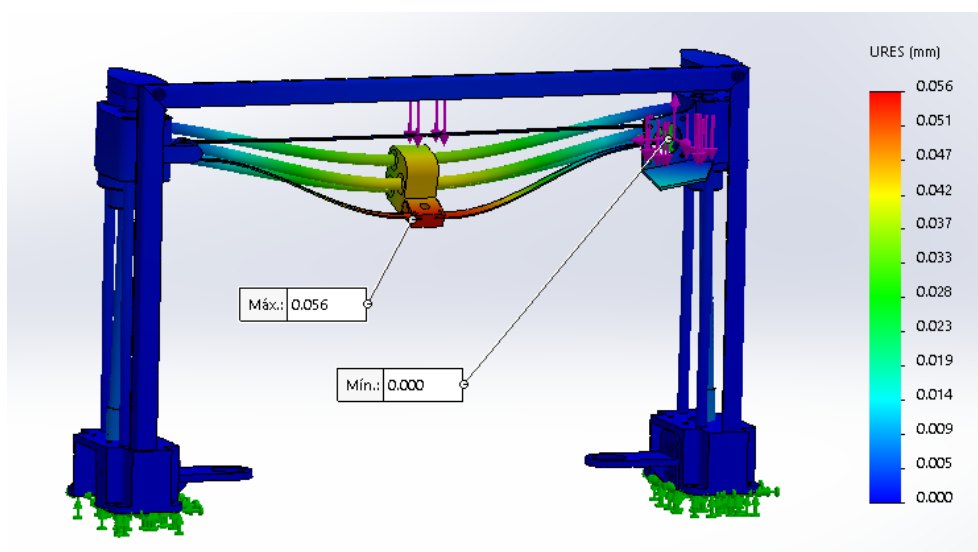


Figura 84 Desplazamientos

El desplazamiento máximo es de **0.056 mm** y se corresponde con la zona donde se aplica la carga del peso del palpador. Este valor ha disminuido considerablemente respecto al análisis preliminar ya que se ha conseguido situar la carga del motor de forma más realista (en el anterior análisis no se tuvo en cuenta que el motor se atornilla a la pieza de sujeción y por tanto la carga no se apoya totalmente en el voladizo).

4.7.4.3.- Análisis de frecuencias

Se realiza un análisis previo al estudio dinámico en el cual se visualizan los primeros modos de vibración del conjunto. Se han empleado las mismas sujeciones y condiciones de mallado que en el análisis estático, pero eliminando las cargas, que no intervienen en las frecuencias naturales.

La participación de masa y la frecuencia de los 12 primeros modos es la siguiente:

Participación de masa (Normalizada) — □ ×

Nombre de estudio: Estudio de frecuencia

Nº de modo	Frecuencia (Hertz)	Dirección X	Dirección Y	Dirección Z
1	62.692	0.0046031	0.00018961	0.61074
2	65.563	0.54519	0.00016074	0.0075517
3	84.152	0.06015	0.00030774	1.1404e-005
4	129.89	0.0064375	0.060247	0.062881
5	142.16	8.3667e-005	0.13276	0.00066923
6	162.95	0.0057558	0.0010157	0.00014661
7	230.73	0.060192	2.6969e-005	0.00047589
8	236.72	0.0044473	0.020297	3.4973e-005
9	251.81	0.077273	0.0022227	0.0021721
10	444.43	0.0031121	5.4257e-006	0.0017488
11	444.99	0.00038973	0.00017822	0.00038369
12	478.41	0.0073547	0.0072397	0.0022921
		Sum X = 0.77499	Sum Y = 0.22465	Sum Z = 0.6891

Cerrar Guardar Ayuda

Figura 85 Participación de masa

Teniendo en cuenta los modos que tienen al menos un 2% de participación en la masa total (0.02), se seleccionan las **9 primeras frecuencias naturales** para su posterior uso en el análisis dinámico.

4.7.4.4.- Análisis dinámico

Partiendo de los datos modales y empleando las mismas sujeciones y conexiones y el mismo mallado que para el análisis estático, se ha configurado un análisis dinámico para el puente móvil completo, al contrario que en la fase preliminar que se realizó el análisis sólo al pilar vertical.

Se realizarán 2 análisis de nuevo: uno para simular el movimiento de todo el puente móvil a lo largo de las guías y otro que registre el desplazamiento del carro del palpador sobre sus varillas. Para ello, se han usado cargas distintas en diferentes ejes. Ambas simulaciones se han hecho para un tiempo de **5 segundos, con un paso de 0,1 segundos entre cada iteración.**

Movimiento del puente móvil

Para este análisis se ha considerado el caso más desfavorable y que más tensiones puede crear en la estructura; en esta ocasión, sería una detención repentina de la máquina provocada por un corte de suministro o un accidente. Para ello se ha diseñado una curva de tipo escalón que simula durante los 2 primeros segundos la marcha normal del puente (considerando 10 N de fuerza combinando motor e inercia), un frenazo repentino a los 2.5 segundos y la detención del sistema. La forma de la curva es la siguiente:

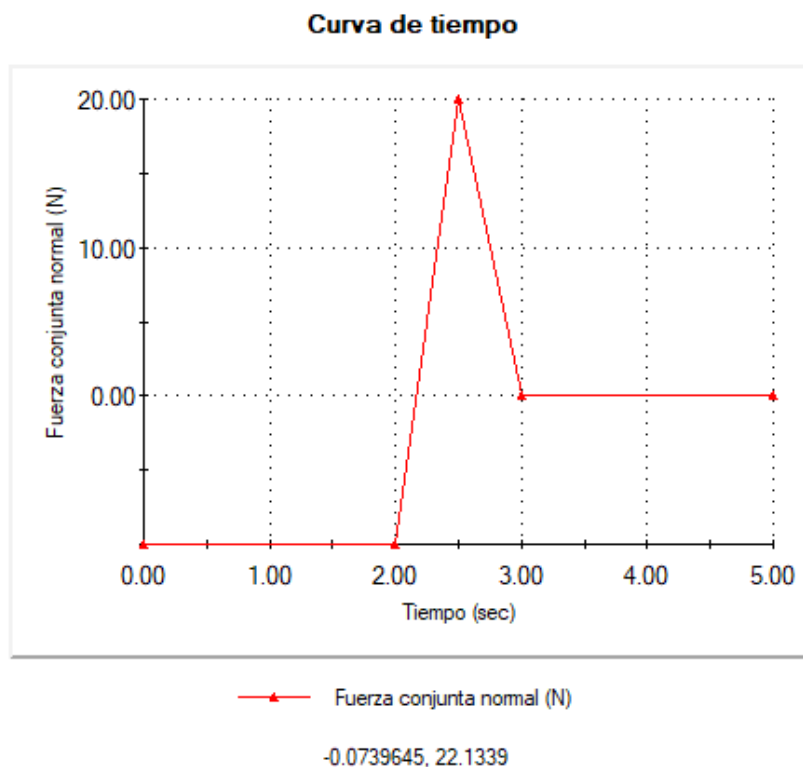


Figura 86 Función en escalón X

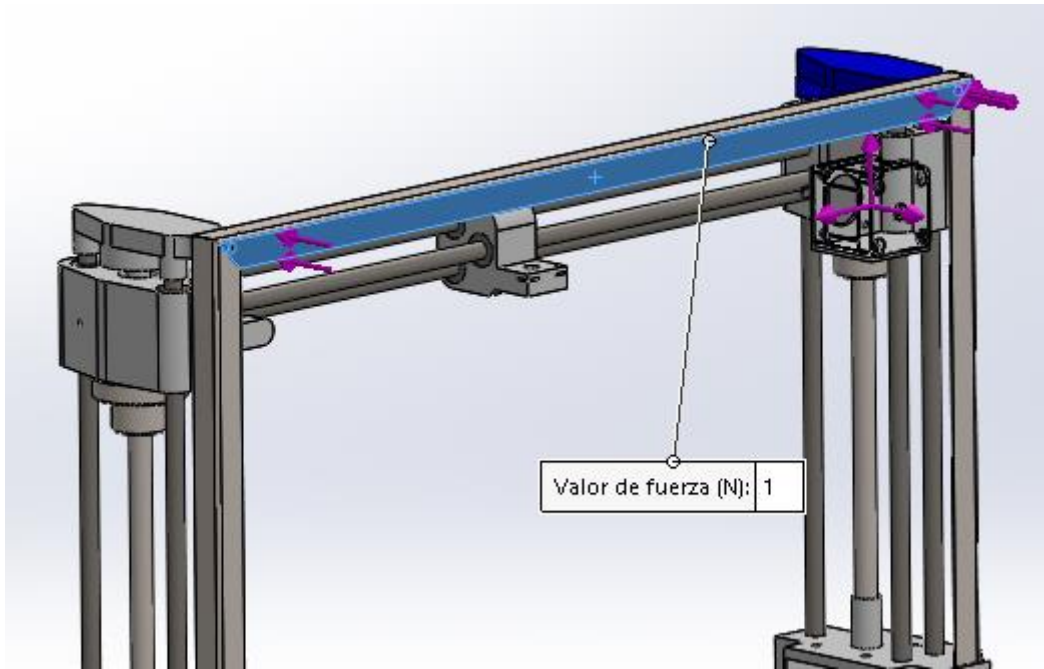


Figura 87 Localización de la carga

Como se puede observar en la Figura 87, la carga se localiza De esta forma se simula un frenazo del puente móvil. El valor aplicado a la carga es de **20 N, para la inercia del propio puente (algo sobredimensionado)**.

$$I = m \cdot a = 1.51 \cdot 10 = 15.1 \text{ N}$$

Se ha calculado una deceleración de 10 m/s^2 por un frenazo completo de 100 mm/s a 0 en 0.01 s .

Con este valor, los resultados obtenidos son los siguientes:

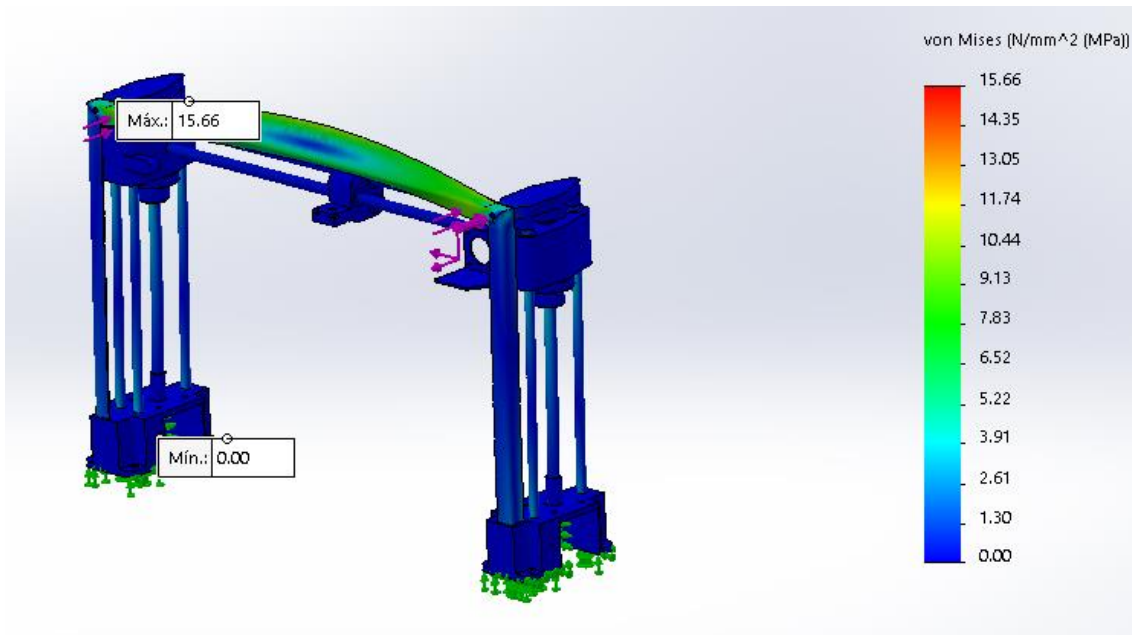


Figura 88 Tensiones resultantes

La tensión máxima registrada es de **15.66 MPa** producida en la estructura rígida, concretamente en las zonas de soldadura de los perfiles, **cuyo límite elástico es de 235 MPa**. Se ha conseguido solucionar el problema surgido en la fase preliminar, en la que se producía una tensión muy elevada en el acoplamiento husillo-motor Y.

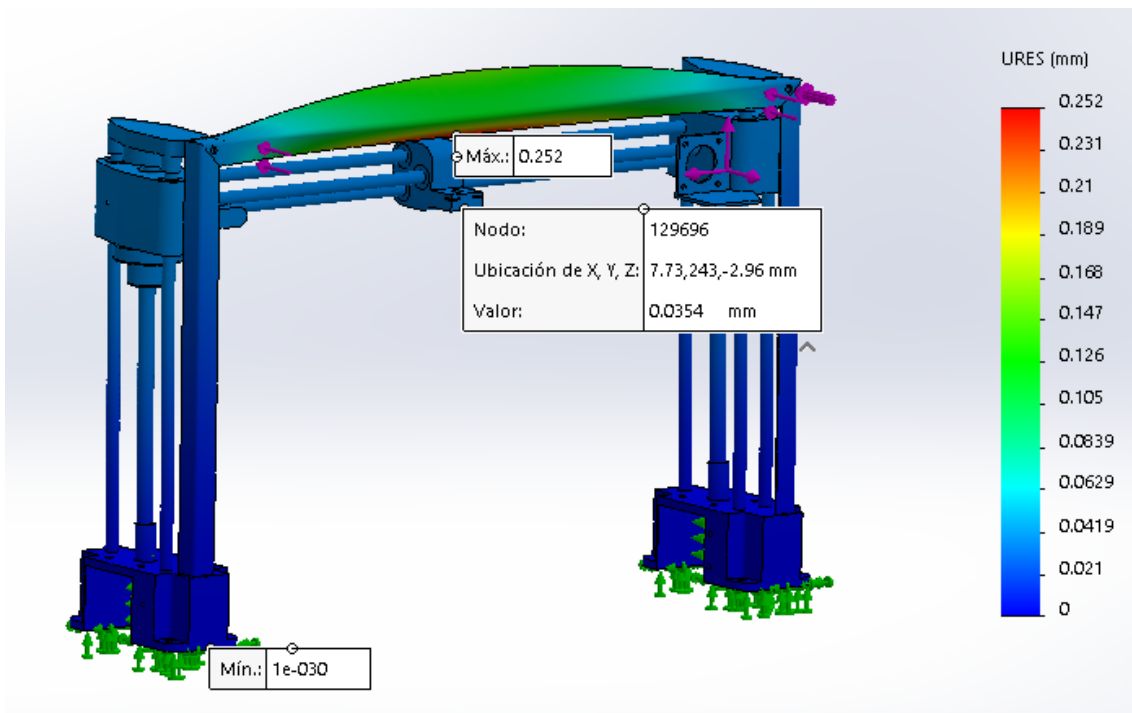


Figura 89 Desplazamientos

El desplazamiento máximo es de **0.252 mm** y se produce en el centro de la viga superior de la estructura. El valor es muy aceptable y se ha logrado reducir a

algo menos de la mitad el desplazamiento registrado en el análisis preliminar, además de producirse en una zona que no compromete la precisión de la medición.

Se ha identificado la zona exacta donde se aloja el palpador (nodos 128000 a 130000) y, como se puede observar en la imagen, la desviación es de **0.035 mm**. En la siguiente gráfica se puede observar la evolución de la desviación en esa zona:

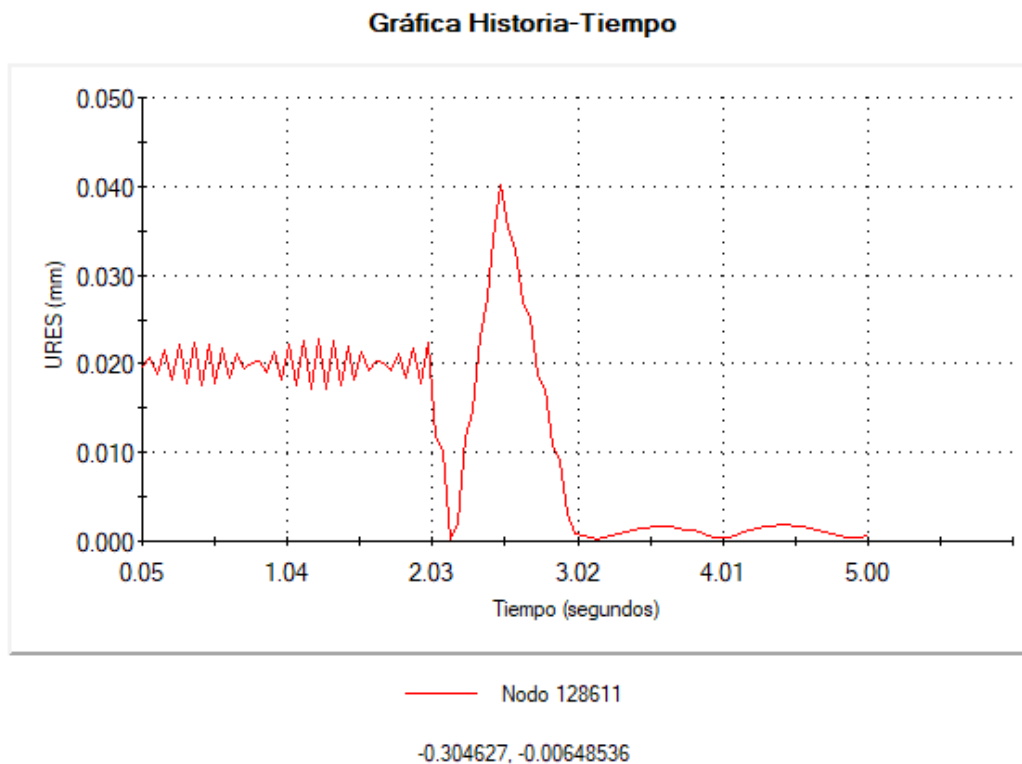


Figura 90 Evolución de la desviación

Se observa además que durante el movimiento hay un desplazamiento de unos 0.02 mm de su posición original.

Movimiento del carro

En este caso se ha aplicado una fuerza del mismo tipo que en el anterior análisis (función tipo escalón, Figura 86), pero con un valor máximo de 10 N en el momento del frenazo, una fuerza de 2 N durante la marcha y las cargas aplicadas sobre la cara lateral de la unión guías Z-husillo (Figura 91) en dirección coincidente con el eje Z (no perpendicular a la cara, ya que esta está inclinada sobre el plano XY)

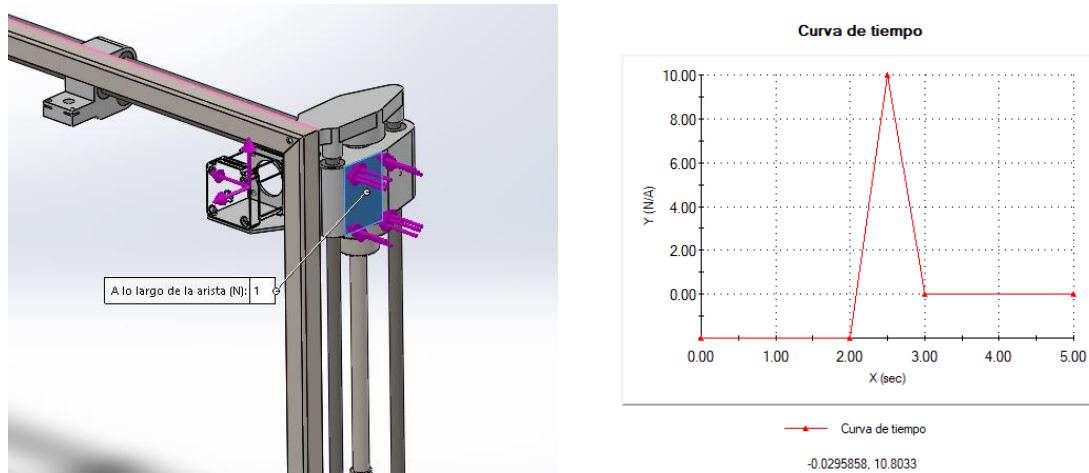


Figura 91 Localización de la carga y función escalón Z

Los resultados obtenidos son los siguientes:

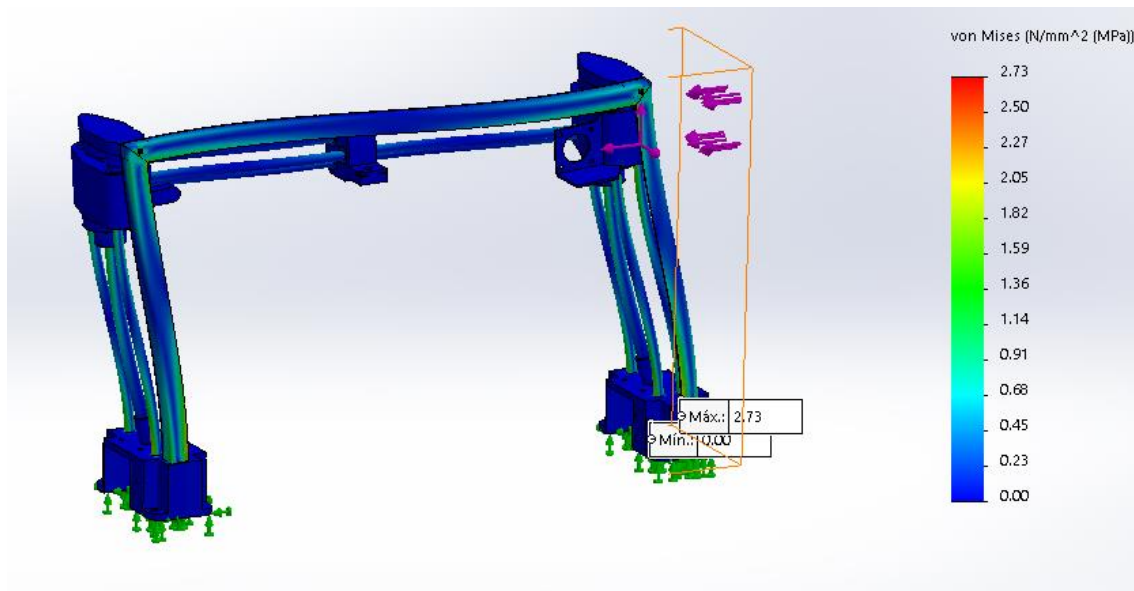


Figura 92 Tensiones resultantes

La tensión máxima es de **2.73 MPa** producida en las soldaduras de la estructura rígida, siendo su **límite elástico de 235 MPa** (acero estructural S235). Como en el análisis anterior, se ha conseguido eliminar el problema surgido en el acoplamiento del motor Y con el husillo.

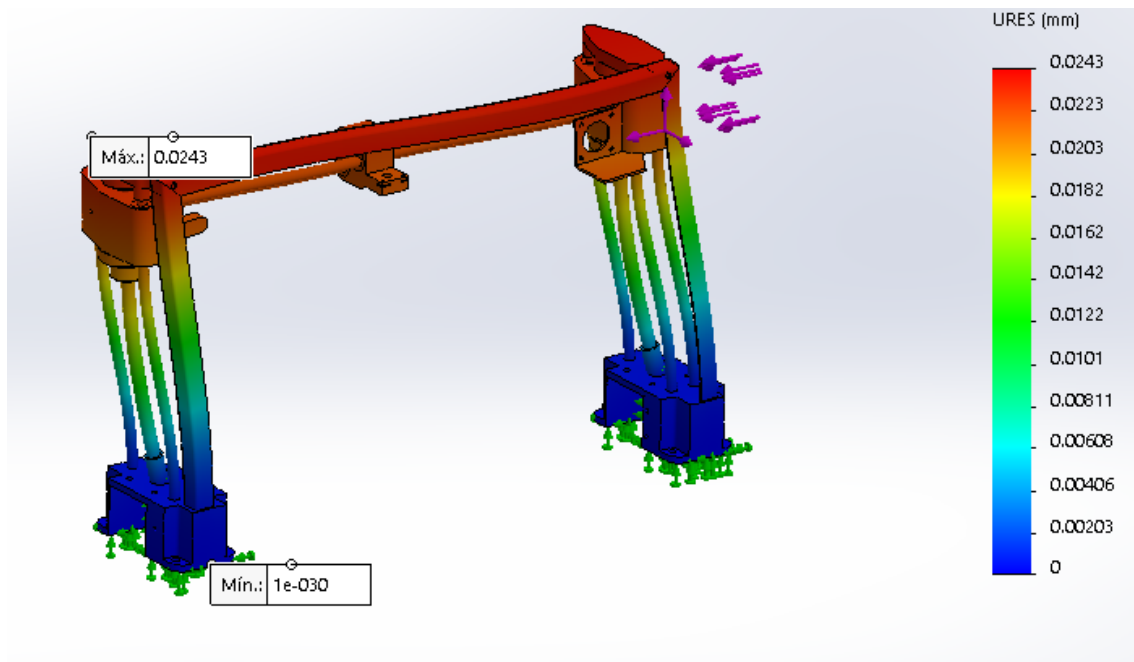


Figura 93 Desplazamientos

El desplazamiento máximo es de **0.024 mm** producido en toda la zona superior de la estructura. Se ha disminuido en gran medida el desplazamiento registrado en la fase preliminar y se ha logrado un valor menor a 0.315 mm (0.1% de la longitud de la pieza, en este caso, altura del puente móvil), por lo que se considera **un resultado aceptable**.

4.7.5.- Conclusiones del análisis

Los resultados obtenidos, en comparación con los requisitos establecidos inicialmente son los siguientes:

Ensamblaje	Análisis	Magnitud evaluada	Valor máximo aceptable	Resultado del análisis
Estructura base	Análisis estático	Tensión Von Mises (MPa)	117.5	9.41
		Desplazamiento resultante (mm)	0.6	0.073
	Análisis dinámico	Tensión Von Mises (MPa)	117.5	11.11
		Desplazamiento resultante (mm)	0.6	0.102
Puente móvil	Análisis estático	Tensión Von Mises (MPa)	105	4.64

Ensamblaje	Análisis	Magnitud evaluada	Valor máximo aceptable	Resultado del análisis
		Desplazamiento resultante (mm)	0.46	0.056
	Análisis dinámico movimiento puente móvil	Tensión Von Mises (MPa)	117.5	15.66
		Desplazamiento resultante (mm)	0.305	0.252* (0.035)
	Análisis dinámico movimiento carro	Tensión Von Mises (MPa)	117.5	2.73
		Desplazamiento resultante (mm)	0.305	0.024

Como conclusión, se puede asegurar que los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y deformaciones son inferiores a los valores máximos aceptados teniendo en cuenta los requisitos iniciales propuestos. De esta forma, se asegura que, bajo las condiciones seleccionadas, **las dos estructuras soportarán los esfuerzos estáticos y dinámicos de forma adecuada bajo criterios de resistencia y rigidez.**

4.8.- Acotación dimensional y geométrica. Análisis cadena de cotas

4.8.1.- Tolerancias generales

Para definir las tolerancias en las dimensiones que no requieren un ajuste especial, ya sea por no ser medidas funcionales o no poder tener un control específico sobre ellas, se ha empleado como norma general la UNE-EN 22768 que refleja las tolerancias generales dimensionales a aplicar en caso de no existir otra indicación. De esta forma se evita dejar dimensiones sin tolerancia o a la interpretación del operario de fabricación.

Los valores de las tolerancias generales corresponden a las clases de precisión habituales del taller. Existen 4 clases de tolerancias dependiendo de su ajuste: de más fino a más basto. En este caso se ha empleado en todas las piezas la **calidad media (m)**. Los valores de las tolerancias, tanto lineales como angulares son los siguientes:

medidas en milímetros

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles respecto al valor nominal							
Designación	Descripción	0,5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
f	fina	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	media	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	grosera	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	muy grosera	-	±0,5	±1	±1,15	±2,5	±4	±6	±8

Figura 94 Tolerancias generales en distancias

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles en función de la longitud del lado menor del ángulo considerado, en milímetros				
Designación	Descripción	hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
f	fina	±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'
m	media	±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'
c	grosera	±1°30'	±1°	±0°30'	±0°15'	±0°10'
v	muy grosera	±3°	±2°	±1°	±0°30'	±0°20'

Figura 95 Tolerancias generales en ángulos

El uso de estas tolerancias viene indicado en cada plano mediante un texto indicativo, en las inmediaciones del bloque de títulos.

4.8.2.- Acotación GPS

Junto con las tolerancias dimensionales tradicionales, se han empleado tolerancias geométricas con el objetivo de garantizar la correcta ensamblabilidad de las piezas críticas y para reducir en todo lo posible la incertidumbre en la medición producida por posibles fallos de fabricación y, consecuentemente, de montaje.

Los criterios seguidos para seleccionar las tolerancias aplicadas son los siguientes:

- Las piezas a las que se le ha aplicado tolerancias dimensionales son aquellas que sirven de soporte para elementos de transmisión o guiado (sujeciones de guías, apoyo de las varillas superiores, etc). Al ser en su

gran mayoría piezas fabricadas en PLA mediante impresión 3D, las zonas con dichas tolerancias requieren de un mecanizado para ajustar correctamente las posiciones.

- Como dátums principales se han empleado las superficies de apoyo mecanizadas con su correspondiente tolerancia de forma, mientras que los taladros donde se posicionan elementos tales como varillas han servido como dátums secundarios. En caso de no haber superficie principal de apoyo, se han tomado como dátums los planos medios de las piezas.

Los valores de las tolerancias de forma, posición y orientación se han seleccionado en base a la siguiente tabla, cuyo criterio es el proceso de fabricación empleado y la variación de su coste:

Proceso	Tolerancia Dimensional	Tolerancias de forma	Tolerancias de Orientación	Tolerancias de Situación / Posición
Taladrado	IT9-IT12	0,1-0,2	Económico: 0,1-0,3 Mayor coste: 0,03-0,1	Económico: 0,2-0,5 Mayor coste: 0,1-0,2
Escariado	IT7-IT8	0,01-0,025		
Fresado	IT7-IT10	0,01-0,05		
Torneado	IT6-IT9	0,01-0,02		
Mandrinado	IT6-IT7	<0,01		
Rectificado	IT4-IT7	<0,01		
Especiales de acabado	IT01-IT4	<0,005		

Figura 96 Tolerancias geométricas según proceso de fabricación

4.8.3.- Taladros

Se han posicionado todos los taladros para facilitar así el montaje de la máquina. Aquellos agujeros pasantes cuyo objetivo es alojar tornillos tienen un margen; de esta forma, pese a la incertidumbre posicional, se garantiza que se puedan instalar.

Para ellos, se han seleccionado tolerancias dimensionales tipo H (con mayor o menor margen según su funcionalidad, desde H7 a H12) cuyo límite inferior es la medida nominal, permitiendo así el juego. En el caso de los alojamientos de las varillas se ha buscado un encaje con apriete que evite que éstas se puedan salir; por tanto, su tolerancia es de tipo M.

4.8.4.- Análisis dimensional mediante cadena de cotas

Tras seleccionar las tolerancias dimensionales y geométricas de cada una de las piezas se han analizado las posiciones importantes a la hora de ensamblar y garantizar la menor incertidumbre de medición posible. Para esto se ha empleado una tabla Excel con la que calcular el valor de la tolerancia total y se ha comprobado posteriormente mediante la herramienta TolAnalyst de SolidWorks.

Este análisis se ha empleado para averiguar la desviación del palpador respecto de la base del puente móvil, en sus tres ejes. De esta forma se consigue comprobar la incertidumbre de montaje entre el elemento principal de medida y la base de puente, generando una cadena de cotas que incluye a todos los componentes del ensamblaje.

4.8.4.1.- Distancia eje X

La distancia evaluada en el eje X corresponde a la distancia del eje de la sonda del palpador con respecto al plano medio de la base del puente móvil:

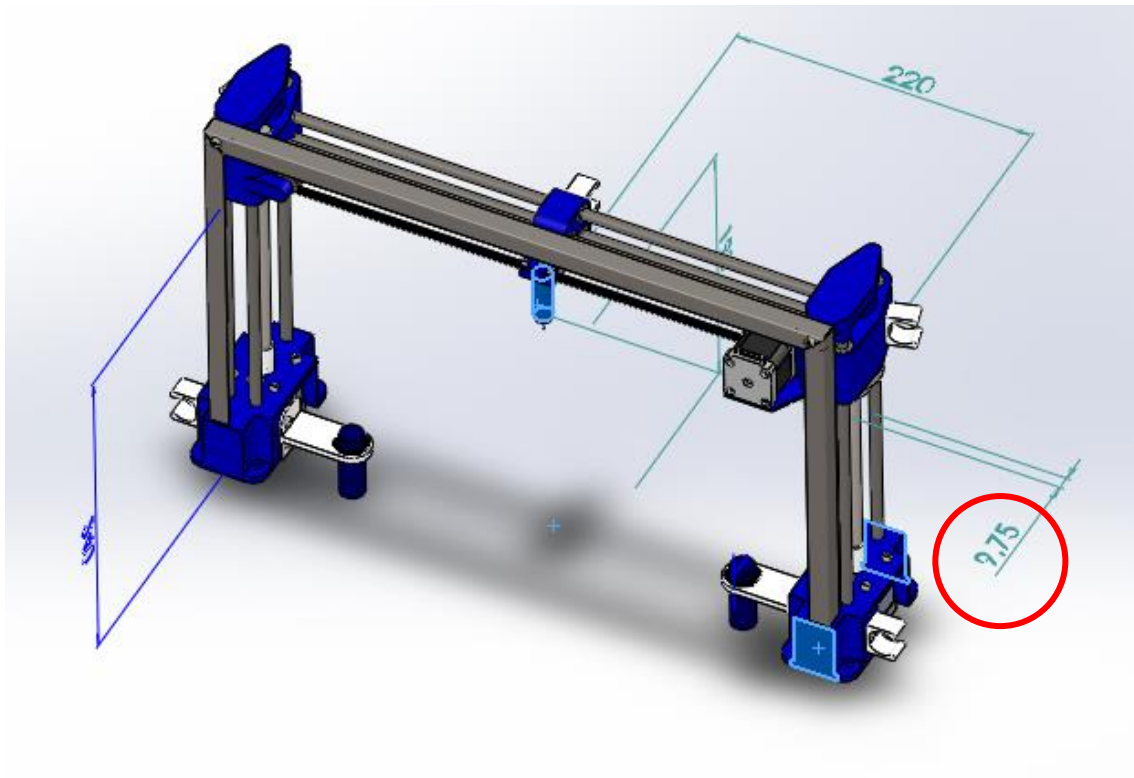


Figura 97 Distancia evaluada X

Se han tenido en cuenta las siguientes dimensiones:

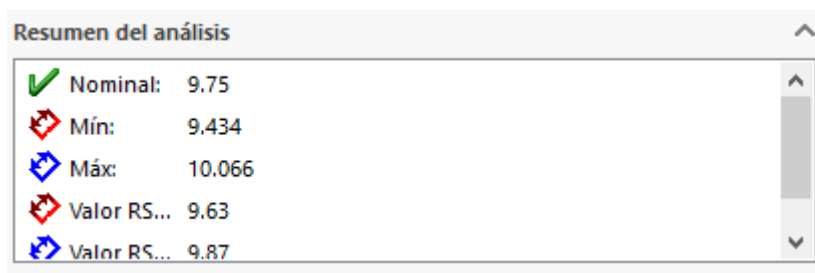
Cadena #	Descripción	Valor Nominal (+)	Valor Nominal (-)	Tol	% Contrib
1	Distancia nominal eje palpador-plano medio base (nominal)	9,75		0,0000	0,00
2	Tolerancia de posición varillas verticales (alojamientos)			0,1000	33,33
2	Tolerancia de posición varillas superiores (alojamientos)			0,100	33,33
2	Tolerancia posición alojamiento rodamientos (carro palpador)			0,100	33,33

Se trata de una sola medida nominal modificada por tres tolerancias posicionales: las de los alojamientos de las varillas verticales, de los superiores y de los rodamientos lineales con respecto al carro del palpador. Los resultados son los siguientes:

Cota Analizada (nominal)	9,75
Tolerancia Cota Analizada (peor caso)	0,3000
Tolerancia Cota Analizada (RCSC)	0,1732

En el peor caso la incertidumbre sería de **0.3 mm**, mientras que un análisis por el método de raíces cuadradas de suma de cuadrados (RCSC) otorga una incertidumbre de **0.1732**.

Con los resultados teóricos como referencia se ha realizado el análisis mediante SolidWorks TolAnalyst:



Resumen del análisis	
✓ Nominal:	9.75
✗ Mín:	9.434
✗ Máx:	10.066
✗ Valor RS...	9.63
✗ Valor RS...	9.87

Figura 98 Valores TolAnalyst X

Obteniendo un valor en el peor caso de **0.316 mm** y en el análisis por raíces cuadradas de suma de cuadrados un valor de **0.12 mm**. El resultado obtenido no se desvía demasiado de los cálculos teóricos, por lo que se considera válido. En las siguientes imágenes se observa gráficamente el valor máximo y mínimo del análisis (peor caso):

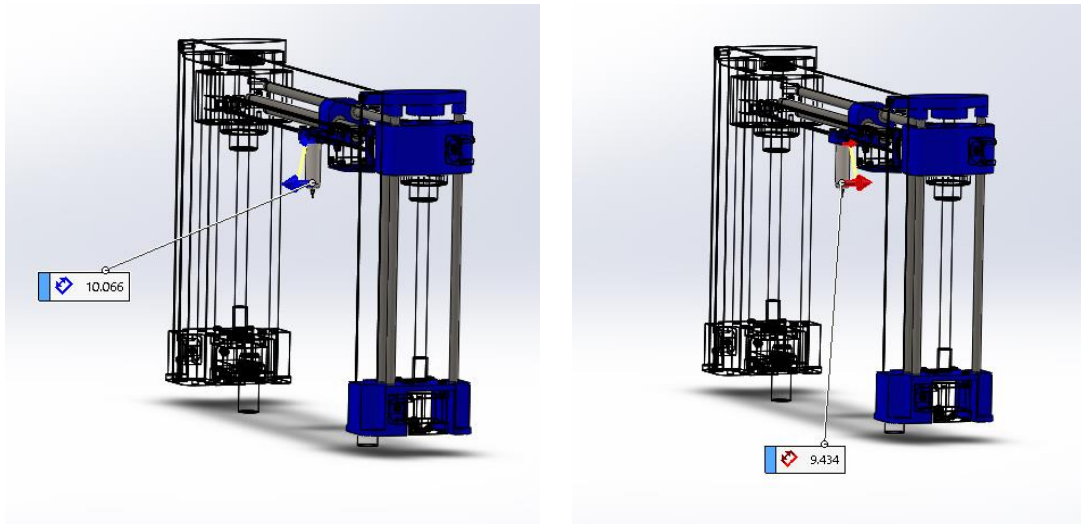


Figura 99 Valor máximo y mínimo X

4.8.4.2.- Distancia eje Y

En el caso de la distancia vertical se ha evaluado la distancia desde la unión sonda-palpador hasta el plano de la base, para incluir las tolerancias dimensionales de la sonda.

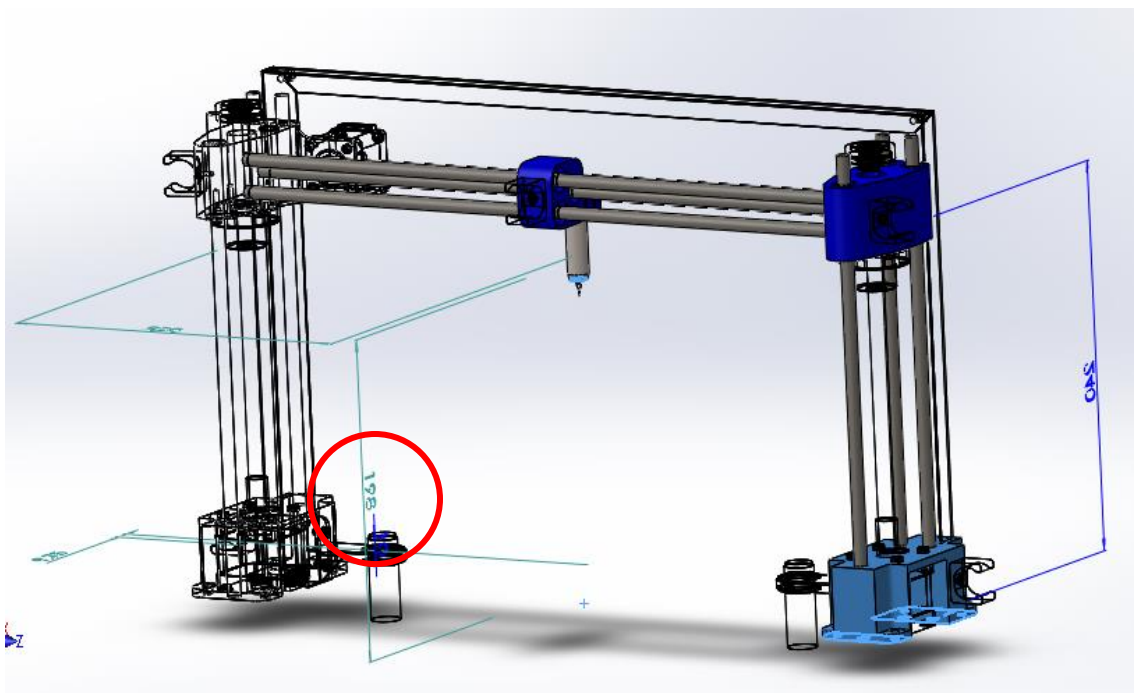


Figura 100 Dimensión evaluada Y

Se han tenido en cuenta las siguientes dimensiones:

Cadena #	Descripción	Valor Nominal (+)	Valor Nominal (-)	Tol	% Contrib
1	Distancia plano palpador-suelo (nominal)	240		0,0000	0,00
2	Longitud sonda disparo		42	0,0100	7,30
2	Tolerancia dimensional varillas			0,027	19,71
2	Tolerancia de posición varillas			0,100	72,99

Considerando la distancia del plano del palpador al suelo como distancia nominal (ya que se puede regular, no es una distancia fija), la longitud de la sonda de disparo con su tolerancia dimensional, la holgura máxima entre las varillas y su alojamiento y la tolerancia posicional de estos agujeros. El resultado es el siguiente:

Cota Analizada (nominal)	198
Tolerancia Cota Analizada (peor caso)	0,1370
Tolerancia Cota Analizada (RCSC)	0,1041

Con un valor nominal de 198, la tolerancia en el peor caso es de **0.137 mm** y en el análisis de raíces cuadradas de suma de cuadrados es de **0.104 mm**.

Posteriormente se ha pasado al análisis mediante TolAnalyst, con los siguientes resultados:

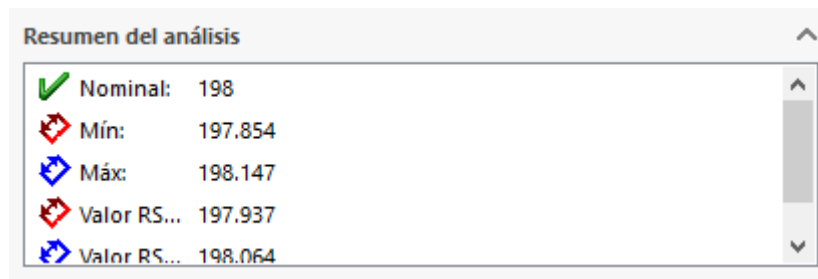


Figura 101 Valores TolAnalyst Y

Obteniendo un valor en el peor caso de **0.147 mm** y en el análisis RSCS de **0.064 mm**. Los resultados son similares a los obtenidos de forma teórica, por lo que se da por válido. La representación gráfica de valores máximos y mínimos se puede observar en las siguientes imágenes:

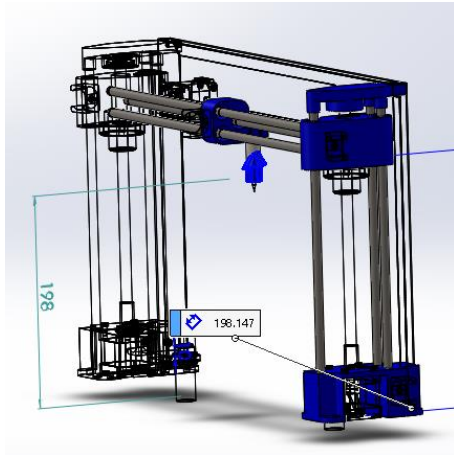


Figura 103 Valor máximo Y

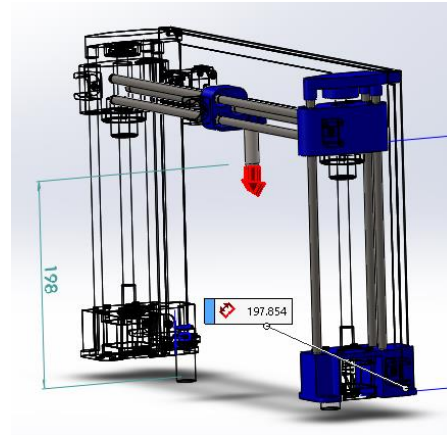


Figura 102 Valor mínimo Y

4.8.4.3.- Eje Z

La dimensión evaluada en el eje Z se trata de la anchura desde el eje del palpador hasta el plano medio de la pieza de la base.

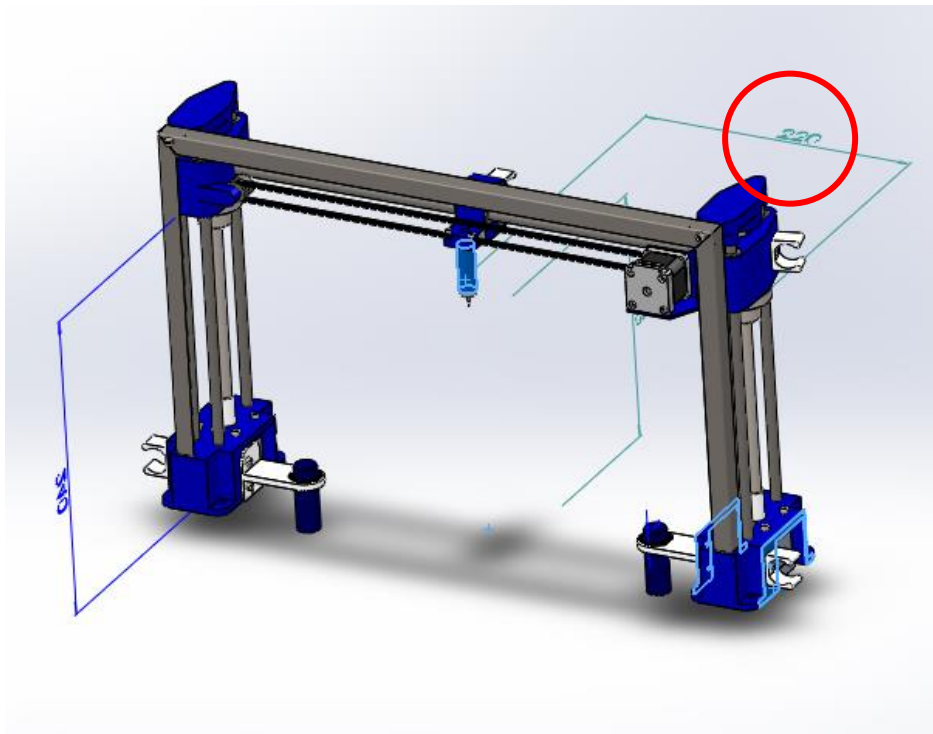


Figura 104 Dimensión evaluada Z

Las dimensiones que se han tenido en cuenta han sido las siguientes:

Código #	Cadena #	Descripción	Valor Nominal (+)	Valor Nominal (-)	Tol	% Contrib
	1	Distancia nominal eje palpador-plano medio base (nominal)	220		0,0000	0,00
	2	Perpendicularidad base-taladros varillas verticales			0,2000	100,00

En este caso sólo se han considerado la distancia nominal entre ambos elementos y la tolerancia de perpendicularidad entre el plano de la base y los taladros que alojan a las varillas. Los resultados son los siguientes:

Cota Analizada (nominal)	220
Tolerancia Cota Analizada (peor caso)	0,2000
Tolerancia Cota Analizada (RCSC)	0,2000

Al solo haber un valor de tolerancia, el resultado obtenido tanto en el peor caso como en el análisis RCSC es de **0.2 mm**.

Mediante el análisis con TolAnalyst se han obtenido estos resultados:

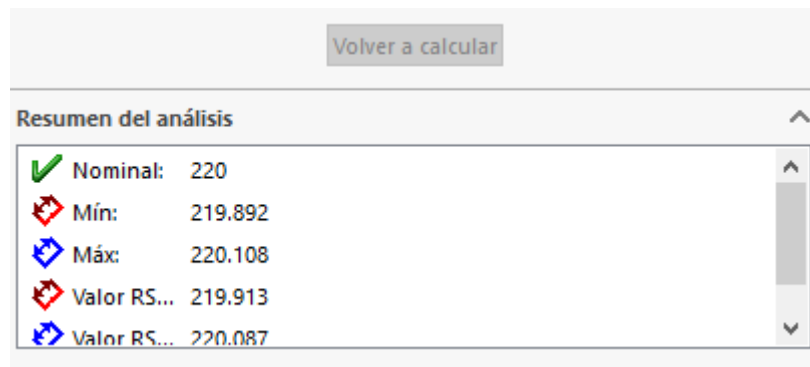


Figura 105 Valores TolAnalyst Z

Los resultados son de **0.108 mm** en el peor caso y de **0.087 mm** en el análisis RSCS. Estas variaciones respecto al valor teórico se deben a que TolAnalyst no computa de la misma forma las tolerancias de orientación, como ocurre en este caso.

Como conclusión, las desviaciones existentes no exceden el medio milímetro y no producen efecto alguno sobre la incertidumbre de medida, ya que estos errores de montaje no van a variar para la misma máquina. Por tanto, **el resultado se da por válido**.

4.8.5.- Comprobación de ajuste por pernos

Mediante este análisis se consigue evaluar la correcta ensamblabilidad entre dos elementos fundamentales como es la base del puente móvil y las guías. Para ello se han tenido en cuenta los 4 taladros inferiores de la base y los taladros de unión de las guías (señalados en rojo):

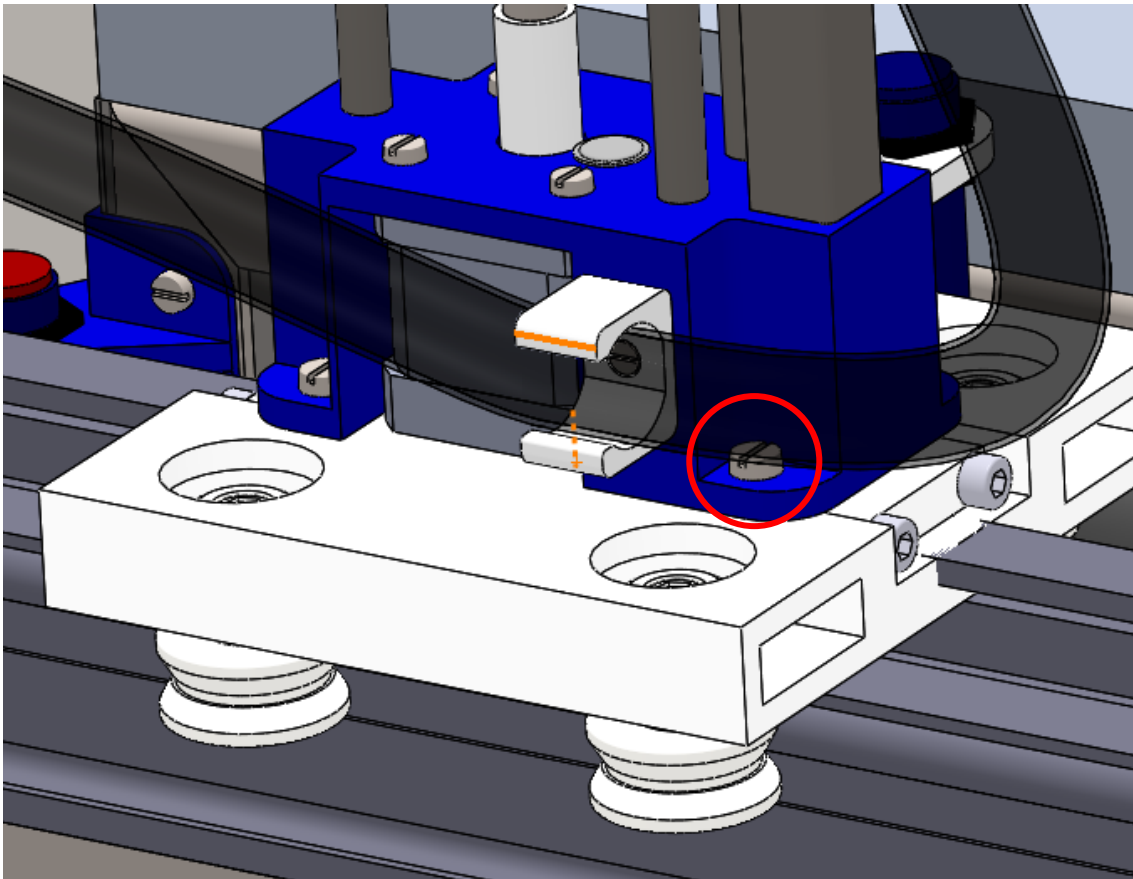


Figura 106 Taladros analizados

Los datos de los taladros de la base son los siguientes:

- Diámetro = 5.50 mm H7
- Tolerancia posicional = 0.20 mm

Los datos de los taladros de sujeción de las guías son los siguientes:

- Agujero roscado M5
- Tolerancia posicional = 0.20 mm

Los datos de tolerancias de las guías se han extraído de la Figura 96 correspondiente con las tolerancias geométricas más usuales según el proceso de fabricación y su coste.

Para comprobar que la holgura es adecuada es necesario resolver esta ecuación:

$$H > F + T1 + T2$$

Donde H es el tamaño del agujero en máximo material, F es el tamaño del perno en su condición virtual y T1 y T2 son las tolerancias posicionales respectivas. Se debe comprobar que en todo momento el valor de H es mayor que el de la suma del resto de valores para que se pueda asegurar la unión.

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$5.50 > 5 + 0.2 + 0.2$$

$$5.50 > 5.40$$

Como el valor de la holgura es mayor, **se asegura la ensamblabilidad de esta parte del sistema.**

4.9.- Hoja de operaciones de pieza significativa

La gran mayoría de piezas de diseño propio se han fabricado mediante impresión 3D de plástico PLA. Esto permite generar formas complejas; sin embargo, es necesario un proceso de mecanizado posterior para aquellas zonas que requieren de una tolerancia especial debido a su funcionalidad. En este apartado se han resumido las operaciones de mecanizado a realizar en uno de los componentes fabricados.

En el conjunto hay 3 piezas que, por su función y por los elementos que unen, se han considerado más importantes. Las 3 piezas son el acoplamiento del puente móvil con la base, la unión entre las guías verticales y la viga horizontal y la sujeción superior de las guías verticales.

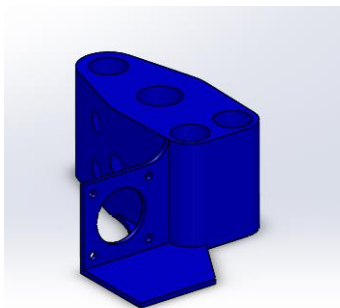


Figura 109 Unión vertical-horizontal

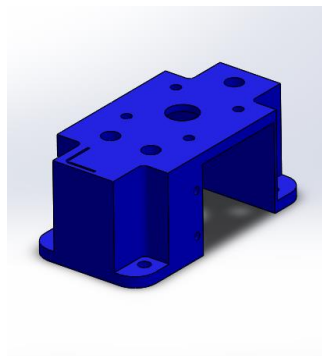


Figura 109 Acoplamiento base

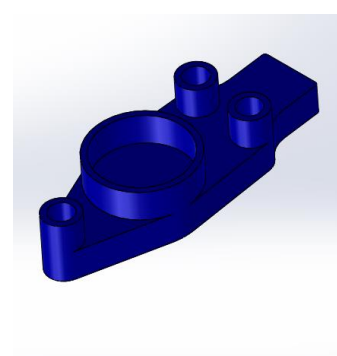


Figura 109 Soporte superior

Las tres piezas son de vital importancia, sin embargo, se ha seleccionado el acoplamiento base-guías ya que la unión entre guías vertical y horizontal tiene geometrías complejas que dificultan en gran medida la sujeción de la pieza y habría que hacer una sujeción especial (aspecto que se escapa de este análisis) y la geometría del soporte superior es más sencilla por lo que no es tan relevante a la hora del mecanizado. El plano detalle de la pieza se encuentra en el apartado D.- Planos.

4.9.1.- Posiciones en la mordaza

Como elemento de sujeción se ha empleado una mordaza Arnold que permite fijar la pieza sin interferir en el mecanizado. Se han empleado un total de 4 posiciones para poder realizar todas las operaciones de forma más cómoda:

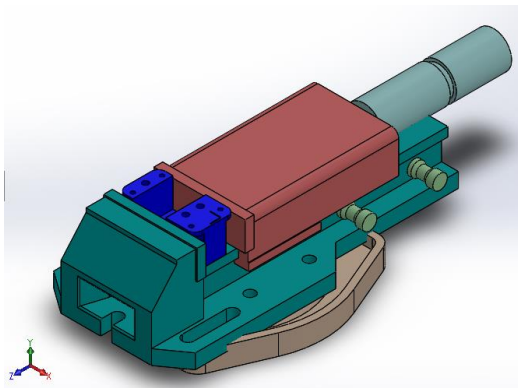


Figura 110 Posición 1: Planta inferior

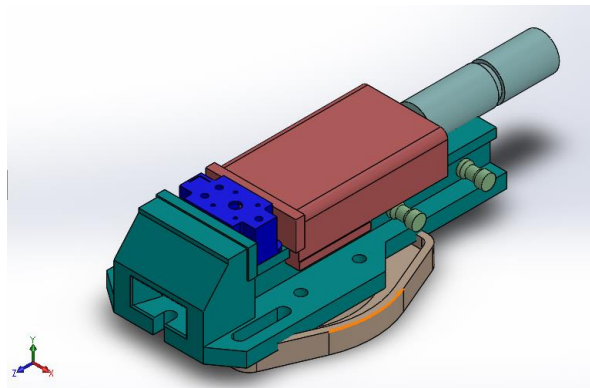


Figura 111 Posición 2: Planta

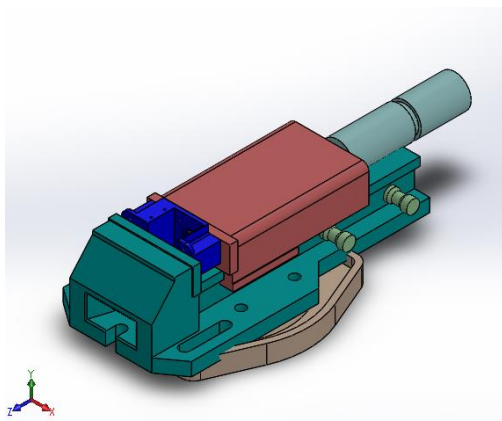


Figura 112 Posición 3: Perfil izquierdo

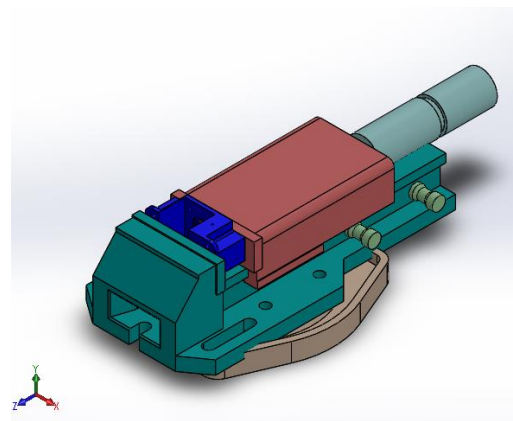


Figura 113 Posición 4: Perfil derecho

Cada una de estas posiciones permite acceder a todas las geometrías a realizar. Cabe destacar que algunos orificios como el hueco correspondiente al alojamiento de la estructura rígida no se ha mecanizado ya que es demasiado estrecho y a la vez profundo, por lo que tardaría demasiado tiempo; teniendo

en cuenta que se ha diseñado con holgura y sin requerir tolerancias especiales, se realizará mediante impresión 3D.

4.9.2.- Herramientas empleadas

Los útiles empleados para realizar todas las operaciones son las siguientes:

Tipo de herramienta	Tamaño	Posición y referencia
Fresa para planear/escuadrar	Ø50 mm	T3 (PP-PL-4P-50)
Broca de taladrado	Ø8 mm	T138 (TR-BR-N-8-HSS)
Broca de taladrado especial para polímeros	Ø5.5 mm	T4 ((HSS-R) 4341 DIN338 - Ø5.5)
Broca de taladrado especial para polímeros	Ø4.5 mm	T2 ((HSS-R) 4341 DIN340 - Ø4.5)
Macho de roscado	Ø3.3 mm	T5 (HSS M4 (Ø3,3 mm) DIN 352)
Macho de roscado	Ø2.5 mm	T6 (HSS M3 (Ø2,5 mm) DIN 352)

Se ha empleado una fresa para planear para realizar la operación de planeado de la base, tres brocas diferentes de taladrado (dos de ellas especiales para polímeros) para perforar los 3 tipos de agujeros pasantes y, por último, mediante dos machos de roscado se han trazado las roscas correspondientes.

4.9.3.- Operaciones realizadas

Las operaciones de mecanizado se han calculado mediante una tabla Excel proporcionada durante la asignatura Fabricación Asistida por Ordenador II, que incluye una macro con la que es posible calcular directamente todos los parámetros de corte necesarios.

El proceso de selección de datos ha sido el siguiente: en primer lugar, se han empleado diversas tablas con las condiciones de corte óptimas para cada material y proceso (taladrado, escariado, corte, etc.). Se han seleccionado plaquitas con recubrimiento (en caso necesario) y se han introducido todos los datos obtenidos en la macro de Excel.

Los datos propios de corte del material se pueden ver en la siguiente tabla:

Material	PLA
kc1	1400
mc	0,15

En el que K_c es la presión específica de corte y m_c es el factor de corrección. Son parámetros fijos del material y que no varían según el tipo de operación a realizar.

Las operaciones empleadas se resumen en la siguiente tabla:

Subf.	Op.	Designación	Uillaje -	Nº	Vc	sz	N	s'	aa	ar	a
			Herramienta	pasadas	m/min	mm/diente	r.p.m	mm/min	mm	mm	mm
1	11	Sujetar la pieza (3 mm encima, base inferior hacia arriba)	Mordaza								
	12	Planeado base - desbaste	T3 (PP-PL-4P-50)	1	115	0,2	732	586	2	37,5	-
	13	Planeado base - acabado	T3 (PP-PL-4P-50)	1	80	0,15	509	306	1	37,5	-
	15	Taladrado agujeros varillas	T138 (TR-BR-N-8-HSS)	9	80	0,08	3183	509	-	-	5
2	18	Taladrado agujeros tornillos inf. (x4)	T4 ((HSS-R) 4341 DIN338 - Ø5.5)	3	55	0,06	3183	382	-	-	2
	21	Sujetar la pieza (3 mm encima, base inferior hacia abajo)	Mordaza								
	22	Taladrado agujeros tornillos sup. (x4)	T2 ((HSS-R) 4341 DIN340 - Ø4.5)	3	55	0,05	3890	389	-	-	2
	31	Sujetar la pieza (apoyada en la superficie de la mordaza, eje x hacia arriba (pieza tumbada)	Mordaza								
3	32	Roscado taladros sujeción sensor difuso	T5 (HSS M4 (Ø3,3 mm) DIN 352)	1	10	0,23	965	675	-	-	5
	41	Sujetar la pieza (apoyada en la superficie de la mordaza, eje x hacia abajo (pieza tumbada)	Mordaza								
4	42	Roscado taladros sujeción sujetacables	T6 (HSS M3 (Ø2,5 mm) DIN 352)	1	10	0,17	1273	637	-	-	6

Fase 1

En la primera fase la pieza se sitúa en la mordaza boca abajo. La superficie superior se coloca 3 mm por encima de la superficie de la mordaza para facilitar el mecanizado. Las operaciones son las siguientes:

- Se realizan **2 planeados en la superficie de la base**: el primero para desbastar, 1 sola pasada eliminando 2 mm de material; el segundo, un planeado de acabado a menor velocidad para mejorar la calidad superficial. En ambos se emplea una **superposición de la herramienta de un 30%** en cada pasada radial. Las dos operaciones se realizan con la misma herramienta: **placa de escuadrar** de diámetro 50 mm.
- Se cambia de herramienta a una **broca de taladrar genérica** de diámetro **8 mm** para taladrar los agujeros pasantes que funcionan como alojamiento de las varillas. Al ser taladros muy profundos respecto a su anchura, **se realizan 9 pasadas de 5 mm de avance axial** cada una para evitar posibles accidentes con la broca.
- La última operación es la de taladrado de los agujeros exteriores de unión base-guías, para lo que se emplea una **broca de taladrar específica para plásticos** de diámetro 5.5 mm. Esto se realiza mediante **3 pasadas de 2 mm de avance axial cada una**, ya que el grosor de la superficie

taladrada es muy escasa y podrían producirse grietas o incluso fracturas en la pieza si se hicieran pasadas más profundas.

Fase 2

En la segunda fase la pieza se sitúa en la mordaza boca arriba, y de la misma forma que en la primera posición la superficie superior se coloca 3 mm por encima de la superficie de la mordaza. La operación realizada durante esta fase es la siguiente:

- Se taladran los 4 agujeros superiores que permiten unir la pieza al motor. Se realizan de nuevo 3 pasadas de 2 mm cada una como precaución ante la fragilidad de la zona.

Fase 3

Se coloca la pieza con el perfil izquierdo hacia arriba, de nuevo con la superficie superior 3 mm por encima de la superficie de la mordaza. La operación realizada es la siguiente:

- Se realiza el roscado de los taladros de sujeción del sensor difuso (2 taladros); para ello se realiza una única pasada de 5 mm a una velocidad lenta para que la rosca se forme correctamente. La extracción es vital para no dañar la rosca creada.

Fase 4

La pieza se coloca de forma opuesta a la fase 3, con el perfil derecho hacia arriba en este caso y de nuevo con la superficie superior 3 mm por encima. La operación realizada es la siguiente:

- Se rosca el taladro que une a la pieza el soporte del sujetacables. Para ello se hace una pasada de 6 mm de la misma forma que en el de los sensores difusos.

Como conclusión, las operaciones empleadas se han centrado principalmente en mecanizar los taladros, ya que en general casi todos se diseñan con tolerancias geométricas especiales que requieren de un proceso más preciso que la impresión 3D. La preforma del mecanizado, por tanto, no es un bloque ortogonal.

5.- Seguridad y ergonomía de la máquina

5.1.- Seguridad. Evaluación de riesgos y soluciones

Con el objetivo de prevenir posibles accidentes causados por el funcionamiento defectuoso de la máquina, se ha realizado un estudio de los posibles riesgos que pueden estar presentes durante su uso, valorando tanto la gravedad de los percances como su frecuencia (Tabla 3)

Nº orden	Riesgo	Tipo de peligro	Fase del ciclo vida	Probabilidad	Severidad	Riesgo para cada peligro (0-100)	Valoración del riesgo
1	Electrocución por contacto con cableado	Eléctrico	Uso	Baja	Moderada	10	Intermedio
2	Quemaduras por contacto con elementos calientes (motores)	Térmico: Abrasión	Uso	Media	Leve	10	Intermedio
3	Atrapamiento de dedos en las guías	Mecánico: Atrapamiento	Uso	Media	Leve	10	Intermedio
4	Aplastamiento de dedos/mano al transportar la máquina y colocarla	Mecánico: Aplastamiento	Transporte	Baja	Leve	4	Bajo

Tabla 3 Evaluación de riesgos

Con carácter general y previamente a la evaluación de riesgos se puede afirmar que la máquina, por su morfología, no implica un riesgo demasiado alto. Esto es así debido a que no realiza tareas en las que intervengan elementos peligrosos (cortantes, abrasivos, radiactivos, etc.) además de que la manipulación por parte del usuario es muy escasa (se reduce a tareas de mantenimiento o transporte, ya que durante su uso tan sólo se requiere encenderla o apagarla). Sin embargo, esta evaluación ha permitido detectar los posibles peligros y valorarlos.

El nivel de riesgo obtenido al sumar todos los posibles accidentes es **intermedio (valor total = 34)**, por lo que, sin ser grave, se han estudiado alternativas para evitar estos posibles accidentes:

- La **electrocución** es el peligro con mayor severidad y se puede dar principalmente por el contacto con un cable que, por falta de mantenimiento, esté pelado o se haya desconectado accidentalmente. Para prevenir esto, los cables se unirán en conjuntos debidamente protegidos mediante un **sujeta cables** (Figura 114); los cables que por su posición no puedan ser colocados dentro de un **sujeta cables** se situarán **por debajo de la estructura** y siempre que se vayan a manipular se deberá desconectar la máquina primero. Estas y otras instrucciones se escribirán en una pegatina que irá colocada en la carcasa delantera, justo al lado del botón marcha-paro (Figura 115).



Figura 114 Cadena plástica sujeta cables

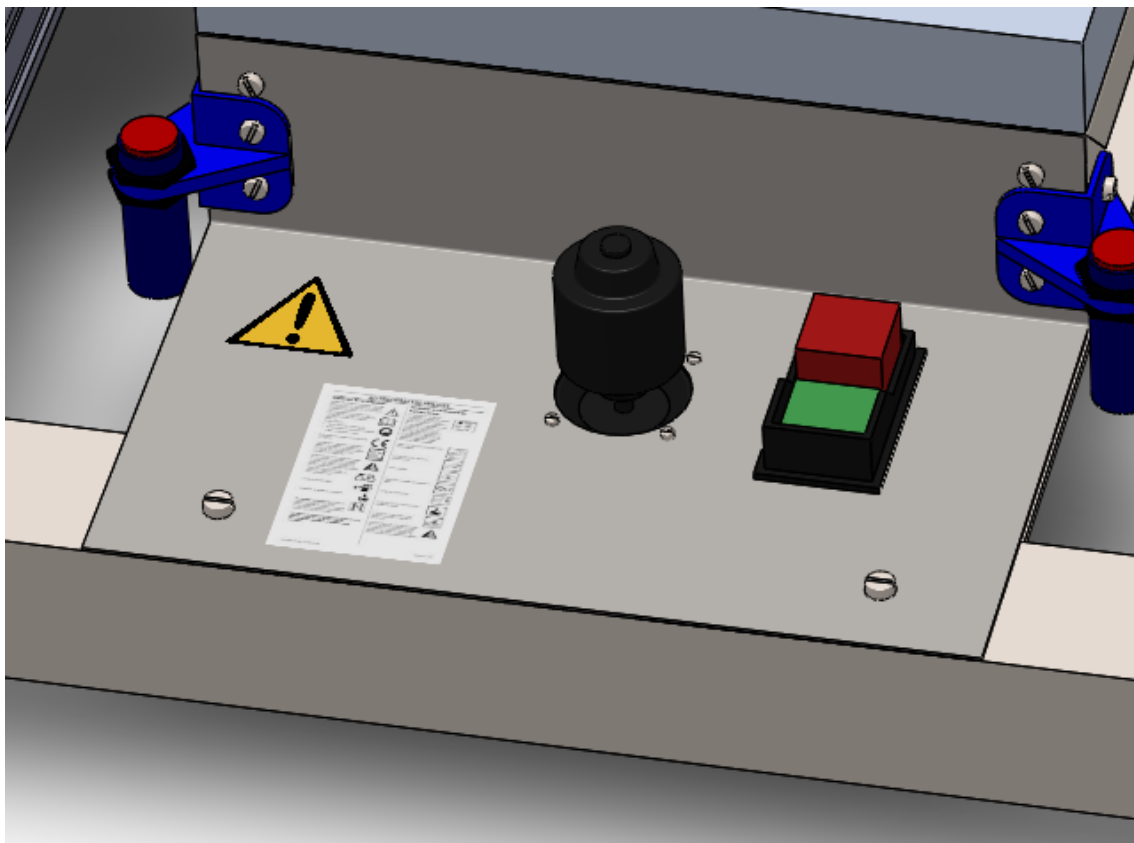


Figura 115 Instrucciones en la carcasa delantera y botón marcha-paro

- Para prevenir al usuario de las **quemaduras**, principalmente producidas por el contacto con los motores tras cierto tiempo de uso, se colocarán **advertencias** bien visibles en la zona cercana al motor (Figura 116). Además, estos motores están en zonas abiertas para que, de forma natural, se refrigeren.

- Al igual que para evitar las quemaduras, se localizarán otras advertencias en las zonas donde puedan producirse **atrapamientos** (principalmente en las guías y en los husillos). También habrá un apartado para estos accidentes en las instrucciones mencionadas previamente, y para el transporte con el objetivo de evitar los **aplastamientos**.

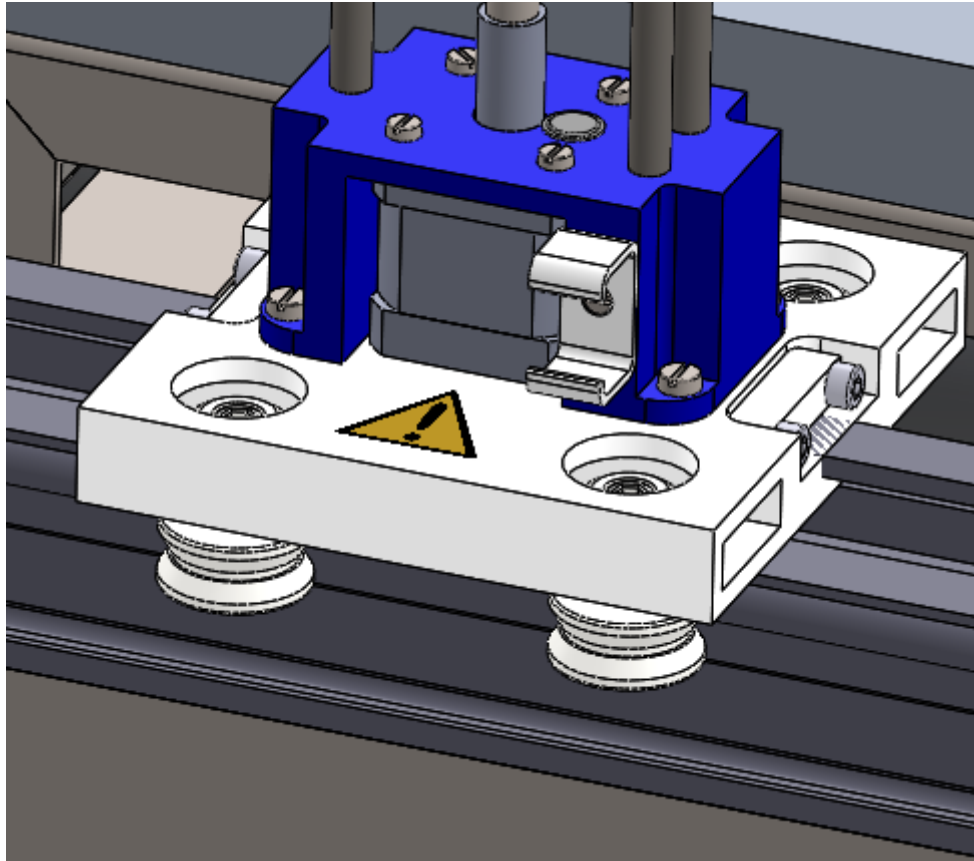


Figura 116 Advertencia situada cercana a un motor

- Las **carcasas**, tanto delantera como trasera, tienen una función más de soporte que de prevención directa de riesgos; de esta forma, se ha empleado como antes se menciona para incluir las **instrucciones generales de uso** y posibles advertencias (carcasa delantera).
- En caso de accidente o de funcionamiento indebido se ha instalado un **botón marcha-paro** en la carcasa delantera (Figura 115, al lado de las instrucciones) con el interruptor de paro más accesible para el usuario. De esta forma se cortaría el suministro de corriente de forma automática.

En general se ha preferido el empleo de advertencias y señalizaciones en lugar de instalar resguardos debido a dos razones principales:

- Los riesgos evaluados son bajos y con el empleo de dichas advertencias se puede informar al usuario adecuadamente para prevenirlo de los posibles accidentes, o por lo menos, de reducirlos al mínimo.
- El empleo de resguardos encarecería la máquina de forma innecesaria y podría no proteger completamente al usuario (por ejemplo, una carcasa sobre los motores evitaría que se pudieran tocar, pero ésta misma podría sobrecalentarse).

5.2.- Ergonomía

La máquina que se ha diseñado se va a controlar prácticamente por completo mediante software específico instalado en un ordenador, por lo que el contacto físico del usuario con la máquina se reduce a encenderla o apagarla. El interruptor marcha-paro, como se ha indicado en el apartado anterior, se ha seleccionado buscando que el botón de paro se encuentre más accesible en caso de emergencia.

En cuanto a la señalización, se han empleado iconos de advertencia bien visibles y de fácil comprensión en las zonas que se requieran, para que el usuario de un vistazo sea capaz de percibirlos. En la zona delantera se han colocado las instrucciones, las cuales tienen que tener un **tamaño de letra lo suficientemente grande** para que tenga buena legibilidad e **iconos reconocibles** por el usuario.

El espacio de trabajo de la máquina será un aula de trabajo o un taller, en el cual la persona encargada de manejar la máquina se situará de pie en el momento del uso. Se ha considerado esta postura como la más óptima ya que la máquina solo dispone de dos elementos controlables de forma manual: **el joystick y el botón de marcha/paro**. De esta forma el ordenador puede situarse en un emplazamiento diferente y agilizará la realización de otras tareas.

Por ello, la dimensión analizada para el espacio de trabajo propuesto es la altura de la mesa. Para realizar los cálculos se dispone de la tabla antropométrica con los datos de la población laboral española:

Dimensiones antropométricas de la población española.
(Obtenidas por el método de estimación proporcional).
Dimensiones en mm.

19-25 años	HOMBRES				MUJERES			
	5%	50%	95%	DT	5%	50%	95%	DT
1. Estatura.	1657	1756	1855	60,4	1519	1612	1705	56,7
2. Altura de los ojos.	1549	1646	1744	59,6	1416	1508	1599	55,8
3. Altura de los hombros.	1348	1442	1535	57,1	1227	1313	1400	53,0
4. Altura de los codos.	1029	1102	1176	44,7	941	1010	1079	41,8
5. Altura de la cadera.	862	933	1003	43,0	745	811	877	40,0
6. Altura de los nudillos.	706	763	820	34,8	668	721	775	32,5
7. Altura de la yema de los dedos.	609	663	718	33,1	569	627	685	35,3
8. Altura desde el asiento.	863	913	963	30,6	797	851	904	32,5
9. Altura ojos-asiento.	744	793	842	29,8	691	741	792	30,7
10. Altura hombros-asiento.	554	599	643	27,3	510	557	604	28,8
11. Altura codos-asiento.	201	244	288	26,5	186	229	272	26,0
12. Espesor del muslo.	138	160	181	13,2	125	149	174	14,9
13. Longitud nalga-rodilla.	550	594	637	26,5	518	562	606	27,0
14. Longitud nalga-poplíteo.	453	499	545	28,1	428	473	517	27,0
15. Altura de la rodilla.	504	549	594	27,3	458	498	537	24,2
16. Altura poplíteo.	403	444	485	24,8	357	398	439	25,1
17. Anchura de hombros.	425	464	503	24,0	356	393	430	22,3
18. Anchura hombros biacrómica.	376	404	433	17,4	331	358	386	16,7

Figura 117 Dimensiones antropométricas población española

Como se ha señalado en rojo, para el manejo de los elementos se ha seleccionado la altura de los codos como medida de referencia. Teniendo en cuenta que no se va a conocer con certeza la distribución normal de hombres y mujeres en el lugar de trabajo, se ha considerado **una distribución equitativa** (50% de hombres y 50% de mujeres).

Debido a las características de la máquina, que requiere de un elevado nivel de precisión, la mesa va a ser fija; para evitar perjudicar a un gran grupo de usuarios, se ha optado por un **criterio de diseño bilateral**, en el que se va a tener en cuenta el percentil P50 de ambos sexos y se utilizará la media de ambas dimensiones:

$$Altura\ codos = \frac{1102 + 1079}{2} = 1090.5\ mm$$

El elemento crítico que se va a manejar es el joystick, ya que el usuario debe poder ver en todo momento la posición del palpador y el efecto de desplazar el joystick. De esta forma, se empleará la altura desde el joystick hasta la mesa como corrector:

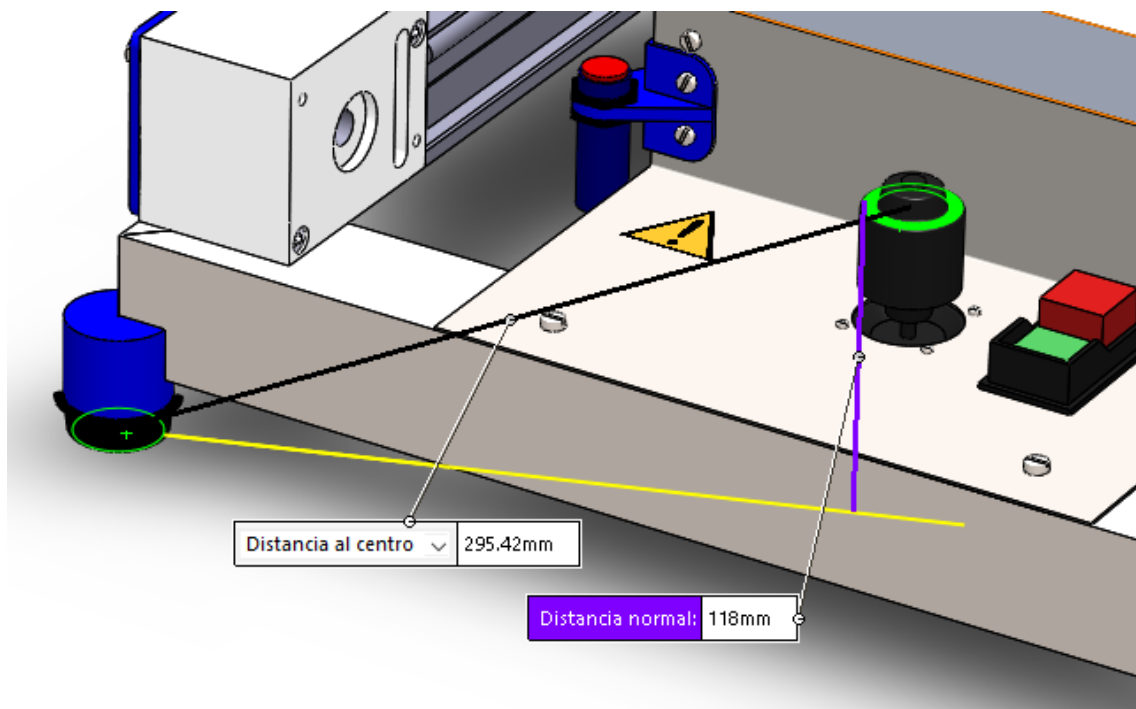


Figura 118 Distancia joystick-mesa

Por tanto, la altura final deseada de la mesa será:

$$H = 1090.5 - 118 = 972.5\ mm$$

6.- Viabilidad económica

Utilizando como referencia los costes reflejados en el presupuesto y considerando un margen de beneficios de un 20% aproximado, se ha estipulado un precio de venta en el mercado de **3500 €**. Teniendo en cuenta las características de la máquina se ha estudiado el mercado de productos similares para evaluar la competitividad que podría tener.

La máquina está diseñada con el objetivo de aportar mediciones aceptablemente precisas por un precio reducido, por lo que los productos de referencia son otras MMC de bajo coste. Generalmente este tipo de máquinas se fabrican para aplicaciones de gran precisión (como la industria aeronáutica, naval, de automoción, etc.) pero el mercado de las MMC de bajo coste no está muy desarrollado.

Como ejemplo se han estudiado los siguientes modelos:

Microscribe series

Se trata de una MMC del tipo manual, de pequeño tamaño y portátil (Figura 119). Su base es magnética para darle mayor estabilidad. Es sencilla de utilizar y se puede calibrar en 5 minutos. Sus características técnicas se pueden observar en la Figura 120.



Figura 119 Microscribe series

	i	iL	MX	MLX
Reach	25 in (.63m)	33 in (.84m)	25 in (.63m)	33 in (.84m)
Work sphere diameter	50 in (1.27m)	66 in (1.67m)	50 in (1.27m)	66 in (1.67m)
Degrees of freedom	5	5	5, 6	5, 6
Accuracy	+/-0.005 in* (0.127 mm) Better accuracy than previous G2X model of +/- .009 in	+/-0.006 in* (0.152 mm)	+/-0.002 in* (0.0508 mm)	+/-0.003 in* (0.0762 mm)
Weight	8.3 lb (3.8 kg) Most lightweight model	9.1 lb (4.1 kg)	12.0 lb (5.4 kg)	13.3 lb (6.0kg)

Figura 120 Datos técnicos de los diferentes modelos

Como se puede observar, la precisión es similar a la máquina diseñada (varía según el modelo, con valores entre +/- 0,15 y +/- 0,05 mm) siendo su alcance de medición algo mayor. Su precio de venta, dependiendo del modelo, oscila entre los **10000€ y los 13000€**, un precio que cuadruplica el del diseño presentado.

Phoenix RB

Se trata de una MMC del tipo puente móvil (Figura 121) como la máquina diseñada, pero que incluye el ordenador de control. Con varios modelos en el mercado, la más pequeña tiene un rango de medida similar (300x300x250 mm – 12''x12''x10 in) pero unas dimensiones generales mayores, y una precisión mucho más fina (4 micras + 1 micra por cada 25 mm).

Los datos técnicos se pueden ver en la Figura 122.



Figura 121 Phoenix RB

Specifications				
Measuring Range				
Model Number	X	Y	Z	
112-102	12"	12"	10"	
216-142	16"	20"	14"	
Overall Size				
Model Number	Width	Depth	Height	Weight
112-102	47"	30"	74"	198kg (436 lbs)
216-142	49"	40"	84"	280 kg (616 lbs)

Figura 122 Datos técnicos Phoenix RB

El precio de venta **en el mercado de segunda mano** es de 9500€, pudiéndose incluso triplicar el precio normal. Es una máquina mucho más precisa pero también mucho más costosa.

En conclusión, con el presupuesto existente y habiéndose conseguido asegurar la precisión deseada, **la máquina será competitiva en el mercado.**

7.- Mantenimiento

Para el correcto funcionamiento de la máquina a lo largo de su ciclo de uso y poder alargar de esta forma su vida útil, es de extrema necesidad seguir unas directrices de mantenimiento periódicas que solucionen pequeños problemas habituales de la máquina y evitar que se conviertan en desperfectos mayores.

7.1.- Ficha de fallos

Se ha realizado una tabla con los diferentes fallos que pueden ocurrir en la máquina durante su uso normal junto con la causa previsible y la solución adecuada:

Fallo	Causa	Solución adecuada
La máquina no se enciende al accionar el interruptor	Fallo en el interruptor.	Revisar las conexiones del elemento y, en caso de no funcionar, sustituirlo.
	Fallo en la conexión a la corriente eléctrica.	Revisar tanto el conector a la corriente como los cables aledaños. Si persiste el problema o se encuentra algún cable dañado, sustituirlo.
	Fallo externo de alimentación	Revisar el enchufe al que se conecta la máquina o elementos auxiliares como alargaderas, ladrones, etc.
El palpador no se desplaza como debería o directamente no se mueve	Fallo en los motores	Revisar el funcionamiento de los motores y sus conexiones. Si alguno de ellos no responde correctamente, sustituirlo.
	Fallo en los elementos de transmisión	Revisar las guías y husillos para detectar posibles elementos que los atasquen o roturas.
	Fallo en los drivers/placa CNC	Revisar tanto su programación como sus conexiones. Sustituir los elementos dañados.
Temperatura elevada	Sobrecalentamiento de los motores/controladores	Si la máquina lleva un largo periodo funcionando, desconectarla durante al menos 10 minutos. En caso contrario, revisar las conexiones tras desconectar la máquina.
Chispazos/cortocircuito	Desconexión accidental de algún cable	Revisar todo el cableado y reconectar/sustituir el cable defectuoso.

Fallo	Causa	Solución adecuada
La máquina supera los límites de la zona medida y/o llega al final de su recorrido y continúa funcionando sin detenerse o emitir ningún tipo de aviso	Fallo en los sensores	Revisar los sensores y sus conexiones, comprobar su funcionamiento de forma manual (activando el modo Joystick) y sustituir el defectuoso.
El palpador no se desplaza o se desplaza incorrectamente al accionar el joystick	Fallo en el joystick	Revisar las conexiones del elemento y sustituirlo en caso necesario.
Las medidas tomadas por el palpador se desvían excesivamente de la realidad	Desajuste de elementos mecánicos	Revisar todas las uniones entre piezas para detectar posibles tornillos aflojados, componentes desencajados, etc.
	Fallo en el palpador	Revisar el correcto funcionamiento del palpador de forma manual, con medidas conocidas. Calibrar el palpador, y si el fallo persiste, sustituirlo.

7.2.- Programación del mantenimiento

Además de los fallos puntuales previamente señalados, se han programado una tabla con una serie de revisiones que serían convenientes para el correcto funcionamiento de la máquina:

Operación de mantenimiento	Periodicidad
Calibración del sistema de medición.	Recomendable mínimo una vez al día y cada 2 horas en caso de varias mediciones consecutivas.
Verificación del funcionamiento de los motores (Mediante el modo manual con Joystick).	Diariamente, especialmente si la máquina ha pasado un largo periodo de tiempo sin usarse.
Limpieza de sensores para evitar que se acumule polvo y suciedad.	Al menos una vez a la semana.
Revisión visual de piezas para detectar anomalías/desgaste.	Semanalmente.
Limpieza superficial.	Semanalmente, con especial atención en la mesa de planitud.
Comprobación visual de elementos estructurales para detectar anomalías.	Mensualmente.
Engrase y limpieza de rodamientos y transmisiones.	Bimensualmente. Mensualmente si se trabaja en un ambiente con mucho polvo o suciedad.
Comprobación, desmontaje y limpieza del palpador y del cabezal.	Bimensualmente.
Sustitución de patas.	Anualmente si no presentan un desgaste excesivo.

Operación de mantenimiento	Periodicidad
Desmontaje y comprobación del cableado y los diferentes componentes eléctricos (sensores, Arduino, drivers, etc).	Anualmente. Semestralmente si la máquina ha presentado problemas eléctricos previamente.
Desmontaje y comprobación de motores.	Anualmente. Semestralmente si alguno de los motores ha causado problemas previamente.
Revisión general exhaustiva.	Anualmente.

8.- Normativa aplicable

La certificación de las prestaciones metrológicas de las máquinas de medición por coordenadas está regulada por normativas internacionales que garantizan a los usuarios la conformidad del producto adquirido con los estándares definidos por las comisiones de reglamentación en las que participan fabricantes, usuarios y autoridades de certificación.

En los últimos años la ISO 10360 ha sido el estándar más importante, con una mayor difusión. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es una federación mundial de organismos de estandarización nacionales. Los Estándares Internacionales los redactan comités técnicos.

La ISO 10360 regula las pruebas de aceptación y la verificación de las prestaciones de las máquinas de medición por coordenadas, conocidas como MMC.

El conjunto de las normas ISO 10360 define los criterios de aceptación y de reverificación de las máquinas de medición y las adoptan las autoridades nacionales europeas de estandarización.

Consta de varias partes, cada una se encarga de tests y pruebas específicas:

- Parte 1: Vocabulario.
- Parte 2: MMC para medir dimensiones lineares.
- Parte 3: MMC con cuatro ejes y mesa giratoria.
- Parte 4: MMC con funciones de medición por digitalización.
- Parte 5: MMC con sistemas de toma de datos con múltiples puntas.

Además de este conjunto de normas específicas acerca de las máquinas de medición por coordenadas, también se ha tenido en cuenta las siguientes normas en cuanto a seguridad general de máquinas:

- UNE-EN 13861:2011 - Seguridad de las máquinas. Guía para la aplicación de las normas sobre ergonomía al diseño de máquinas.
- UNE-EN ISO 12100:2012 - Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.
- Directiva de Seguridad de Máquinas 2006/42/CE
- UNE-EN 954-1 - Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño.
- UNE-EN 981 - Seguridad de las máquinas. Sistema de señales de peligro y de información auditivas y visuales.
- Directiva de Baja Tensión 2006/95/CE.
- Certificación de calidad ISO 9001.
- Certificación ISO 14001 sobre el sistema de gestión medioambiental.
- Ley 31/1995 del 8 de noviembre, prevención de riesgos laborales.

- Real Decreto 1338/1984 del 4 de julio, medidas de seguridad en entidades y emplazamientos públicos y privados.

Esta relación de normas se encuentra incluida también en el apartado 2.2.- Normativa aplicable del pliego de condiciones.

9.- Conclusiones

En las primeras fases del proyecto, principalmente en la etapa conceptual, se planteó la posibilidad de nuevos conceptos de máquina de medición por coordenadas que incluyeran palpadores sin contacto o incluso cortinas láser que pudieran eliminar movimientos y simplificar la parte mecánica del producto; sin embargo, el objetivo era reducir al máximo el coste y estos elementos láser suponían un gasto inasumible, por lo que se optó por un modelo más convencional. La fase conceptual sirvió también para focalizar en cuanto a relación calidad-precio y se planteó el uso de elementos y piezas de diseño propio mucho más económicos y empleando procesos de fabricación innovadores (impresión 3D).

Otro aspecto planteado inicialmente fue la posibilidad no sólo de realizar mediciones de las piezas para su control dimensional, sino además extraer una nube de puntos con la que poder formar un archivo CAD tras su correspondiente postprocesado. Tras las primeras investigaciones y estudio de mercado para conocer a fondo toda la tecnología que rodea este tipo de máquinas y gracias a la experiencia propia adquirida en el sector de la metrología, esto se descartó ante la imposibilidad de obtener una nube de puntos suficiente mediante el palpado de piezas.

Estructuralmente la máquina ha ido evolucionando principalmente en la zona del puente móvil (ya que la estructura base junto con los soportes de la mesa fueron validados por su rigidez y resistencia desde el primer momento). Desde una forma muy sencilla con tan sólo una varilla vertical de apoyo hasta la forma final, con el conjunto de 3 varillas en forma piramidal junto con la estructura rígida de soporte. Se ha logrado aumentar la resistencia mediante elementos sencillos y ya empleados en otras zonas de la máquina y sin sobrecargar el conjunto. Los análisis mecánicos han sido satisfactorios en todas sus facetas, tanto los realizados teóricamente mediante cálculos como los análisis MEF.

El diseño de transmisiones y guiado de la máquina ha resultado bastante sencillo gracias a toda la información encontrada acerca de las impresoras 3D, producto que comparte muchas similitudes con esta máquina. Mediante catálogos y páginas web especializadas se han localizado y dimensionado todos sus elementos.

En cuanto al sistema de control se ha incluido un conjunto de dos placas (Arduino + CNC) que permiten un procesado de datos mucho más rápido, aliviando de carga a la única placa Arduino planteada inicialmente. Los sensores fin de carrera y de aviso prácticamente impiden cualquier accidente que derive en una rotura del palpador o de otro elemento, en condiciones de uso normales. Los graficets de control muestran un uso básico de la máquina y sirven de forma teórica, ya que como se ha explicado previamente ésta se controlaría desde el software especializado en el ordenador.

Debido a que es un producto que no conlleva riesgos intrínsecos por su tipología, puesto que no es una máquina encargada de procesar ningún tipo de material, las medidas de seguridad necesarias han sido básicas: protección de cables, dos carcassas para ocultar componentes electrónicos, botón marcha-paro y una serie de advertencias e instrucciones de uso. Para el espacio de trabajo sólo se ha restringido la altura de la mesa donde esté colocada, ya que tan sólo hay un elemento de interacción usuario-máquina (el joystick).

Como conclusión general del proyecto, se ha logrado diseñar una máquina de medición por coordenadas que cumple los requisitos en cuanto a relación precisión-costes, que puede usarse en un entorno académico o de taller a nivel usuario de forma sencilla e intuitiva. Se ha probado tanto su viabilidad técnica en cuanto a mecanismos que la componen, resistencia de materiales y sistema de control, y económicamente es un producto que podría ser competitivo en un mercado que no está muy desarrollado todavía.

10.- Bibliografía y referencias

Software empleado

- SolidWorks 2016
 - o SolidWorks Simulation
 - o SolidWorks TolAnalyst
- Festo Simulation
- Microsoft Office (Excel, Word)

Catálogos comerciales

- CTS. Catálogo de guías lineales. http://img.web.mdsnet.it/ctsitaly/allegati_upload_file/catalogocts2017.pdf . Páginas 28-31. 01/12/2018
- CONTI. Catálogo de husillos y tuercas trapezoidales. <http://www.contigroup.it/Catalogo/Catalogo-ES.pdf> . Páginas 20 y 45. 01/12/2018.
- FIBRO. Placas y regletas rectificadas. http://www.fibro.de/fileadmin/data/FIBRO/Kapitel_B/es/B2_HK_ES_Kapitel_B.pdf . Página B7. 02/12/2018.
- MOONS´. Lineal stepper motors and Linear slides. Páginas 14 a 19. 02/07/2018.
- MOONS´. Step motors. 03/12/2018.
- SKF. Catálogo general de rodamientos. http://www.skf.com/binary/89-121486/10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf . Página 726. 07/12/2018.

Páginas web

- TRACEPARTS. Modelos CAD. <https://www.traceparts.com/en> . 12/11/2018.
- INGEMECÁNICA. Perfiles de acero. <https://ingemecanica.com/tutoriales/prontuariodeperfiles.html#angular> . 12/11/2018.
- IMPRESORAS3DLOWCOST. Material para impresoras 3D. <https://impresoras3dlowcost.com/polea-20-dientes.html> . 14/11/2018.
- VERDÚ. Patas de plástico. <https://verduonlinestore.com/patas-de-plastico/9195-plastic-sofa-leg-h14mm-d35mm-blackfinish-0000903002187.html> . 15/11/2018.
- MOONS´. Motores paso a paso. <https://www.moonsindustries.com/> . 21/11/2018.
- ELECTRÓNICA EMBAJADORES. Material para impresión 3D. <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/I3COPNE1/impresion-3d/impresoras-3d-consumibles/filamento-pla-1-75mm-color-negro-1-kg> . 22/11/2018.
- SUMINISTROS TORRAS. Tornillería. <http://www.suministrostorras.com/tornilleria-4/tornilleria-exagonal-din-933-931-y-934-135.html> . 25/11/2018

- NORELEM. Tornillería. <https://www.norelem.com/us/es/Productos/Vista-general-de-producto/Sistema-flexible-de-piezas-est%C3%A1ndar/07000-Elementos-de-uni%C3%B3n-Tornillos-de-presi%C3%B3n-esf%C3%A9ricos-y-placas-de-apoyo-Tornillos-de-sujeci%C3%B3n-y-piezas-de-presi%C3%B3n-Tornillos-de-momento-de-torsi%C3%B3n-e-insertos-roscados-Tornillos-con-ojo-Grillete-Pivote-portador/Elementos-de-uni%C3%B3n/07210-Tuercas-hexagonales-DIN-934-DIN-EN-ISO-4032-DIN-EN-24032.html> . 28/11/2018.
- CREATEC. Elementos para impresoras 3D. <https://createc3d.com/shop/es/> . 29/11/2018.
- PASAI. Tornillería. <https://www.pasaisa.com/tornillos-din-84-iso-1207-cincados.html#/metricaxl-3x8> . 29/11/2018.
- KUGELLAGER. Rodamientos. https://www.kugellager-express.de/needle-roller-bearings_835581 . 29/11/2018.
- AMAZON. Presupuesto tornillo trapezoidal. <https://www.amazon.es/TR10x2-drylin%C2%AE-Husillos-trapezoidal-PTGSG-10X2-01-R/dp/B074XTX6Y5> . 29/11/2018.
- TODOELÉCTRICO. Cableado. <https://www.todoelectronico.es/productos-material-electrico/cables-y-mangueras/cable-flexible/por-metros-libre-de-halogenos/mtr-cable-1-5-mm-libre-de-halogeno-detail.html> . 29/11/2018.
- CETRONIC. Arduino. https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?gclid=Cj0KCQjwv-DaBRCcARIsAI9sba8_A26qLNUhd8WNQeerBA9yQ-tbPJdaF7lk03uEm8MRBzg0ezJcwhoaAslPEALw_wcB&idIdioma=&cPath=1339&codProducto=151185017&idTienda=93 . 29/11/2018.
- AUTOMATION24. Sensor capacitivo. <https://www.automation24.es/sensor-capacitivo-ifm-electronic-kg6000-kg-3150nfpkg-pl-2p-us-io> . 30/11/2018.
- RENISHAW. Sonda de disparo por contacto. <http://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-1371-0270> . 30/11/2018.
- RENISHAW. Palpador recto. <http://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-5000-7801> . 30/11/2018.
- CHEFGLOBAL. Interruptor marcha-paro. <https://chefglobal.es/es/interruptor-marcha-paro/6583-interruptor-pulsante-kld-28a-medida-de-montaje-45x22mm-verderojo-2noa1-250v-tripus-555109.html> . 01/12/2018.
- ELECTAN. Sensor de fuerza resistivo. https://www.electan.com/sensor-fuerza-redondo-p-3106.html?gmeltn=1&gclid=EA1alQobChMI5buPpbCL3QIVCamaCh1SwQTHEAKYASABEgK-EfD_BwE . 01/12/2018.
- LEROY MERLIN. Chapa de acero bruto. <http://www.leroymerlin.es/fp/10208226/chapa-de-acero-bruto-fino?pathFamiliaFicha=420504> . 03/12/2018.

- CENTRAL ELECTROVENTAS. Sensor fotoeléctrico.
<https://www.centralelectroventas.com/media/Alteslmatges/026965.pdf>
. 03/12/2018.
- GO MEASURE 3D. MMC portátil. <https://gomeasure3d.com/microscribe/>
(datos técnicos)
<https://shop.gomeasure3d.com/collections/microscribe-systems/products/microscribe-m-series-digitizer> (precio). 06/12/2018.
- HELMEL. Datos técnicos MMC Phoenix RB.
<https://www.helmel.com/products/phoenix/> . 06/12/2018.
- PRACTICAL MACHINIST. Precio Phoenix RB.
<https://www.practicalmachinist.com/vb/american-machinist/helmel-phoenix-rb-cmm-sale-262469/> . 06/12/2018.
- RENISHAW. Datos técnicos sistema TP20.
<http://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/22341.aspx>
. 06/12/2018.
- BRICOGEEK. CNC Arduino Shield V3.
<https://tienda.bricogeek.com/shields-arduino/837-arduino-cnc-shield-v3.html> . 06/12/2018.
- BRICOGEEK. Driver motores paso a paso.
<https://tienda.bricogeek.com/controladores-motores/992-controlador-de-motores-paso-a-paso-35a-tb6600.html> . 07/12/2018.

11.- Anexo de cálculos

11.1.- Análisis cinemático del sistema

Los primeros criterios definidos para realizar los cálculos cinemáticos del sistema han sido las velocidades y aceleraciones deseadas. En este sentido, se han seleccionado estos requisitos para cada uno de los ejes:

Eje	Velocidad (mm/s)	Aceleración (mm/s ²)
X	100	1000
Y	10	500
Z	100	1000

En los ejes X y Z el sistema de transmisión es de poleas dentadas con correa mientras que el eje Y emplea un sistema husillo-tuerca trapezoidal; el movimiento en un husillo es mucho más lento, por ello se ha seleccionado una velocidad y aceleración mucho menores. En las correas se lograría la velocidad máxima en 0.1 segundos mientras que en el husillo se lograría en 0.02 segundos.

Con estos datos se procede al cálculo de velocidades de giro.

11.1.1.- Velocidades de giro y aceleración angular eje X

Para el eje X los datos necesarios son los siguientes:

- Diámetro polea: $D = 57.3 \text{ mm} \rightarrow r = D/2 = 28.65 \text{ mm}$
- Velocidad lineal = 100 mm/s
- Aceleración lineal = 1 m/s

En el sistema ambas poleas tienen las mismas dimensiones en cuanto a diámetro, por lo que sus velocidades y aceleraciones angulares van a ser idénticas.

Con estos datos se procede al cálculo de las velocidades y aceleraciones angulares:

$$w1 = w2 = \frac{V_{max}}{r} = \frac{100}{28.65} = 3.49 \text{ rad/s}$$

Se obtiene una velocidad angular de **3.49 rad/s**. Traducido a revoluciones por minuto se obtiene:

$$w1 = w2 = 3.49 \cdot \frac{60}{2\pi} = 33.33 \text{ rpm}$$

La velocidad angular es de **33.33 rpm**.

En cuanto a la aceleración angular también es la misma en ambas poleas. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{Amáx}{r} = \frac{1000}{28.65} = 34.9 \text{ rad/s}^2$$

El resultado es de **34.9 rad/s²**.

11.1.2.- Velocidades de giro y aceleración angular eje Y

En el eje Y los datos necesarios para el cálculo son los siguientes:

- Avance por vuelta/Paso: P = 2 mm/vuelta
- Velocidad lineal = 10 mm/s

El diámetro del husillo es irrelevante, ya que para obtener la velocidad angular tan sólo se necesita saber cuántas vueltas necesita dar para avanzar a la velocidad lineal indicada:

$$w = \frac{10}{2} = 5 \frac{\text{Vueltas}}{\text{s}} = 300 \text{ rpm}$$

La velocidad angular del husillo es de **300 rpm**, que traducido a rad/s es:

$$w = 300 \cdot \frac{2\pi}{60} = 31.42 \text{ rad/s}$$

El resultado es de **31.42 rad/s**. Para hallar la aceleración angular se divide la velocidad angular entre el tiempo que tarda en alcanzarla:

$$\alpha = \frac{w}{t} = \frac{31.42}{0.02} = 1570.8 \text{ rad/s}^2$$

La aceleración angular resultante es de **1570.8 rad/s²**

11.1.3.- Velocidades de giro y aceleración angular eje Z

En el caso del eje Z los datos necesarios son los siguientes:

- Diámetro polea: D = 20 mm → r = D/2 = 10 mm
- Velocidad lineal = 100 mm/s
- Aceleración lineal = 1 m/s

Al igual que en las guías motorizadas del eje X, el sistema ambas poleas tienen las mismas dimensiones en cuanto a diámetro, por lo que sus velocidades y aceleraciones angulares van a ser idénticas.

Con estos datos se procede al cálculo de las velocidades y aceleraciones angulares:

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{V_{max}}{r} = \frac{100}{10} = 10 \text{ rad/s}$$

Se obtiene una velocidad angular de **10 rad/s**. Traducido a revoluciones por minuto se obtiene:

$$\omega_1 = \omega_2 = 10 \cdot \frac{60}{2\pi} = 95.49 \text{ rpm}$$

La velocidad angular es de **95.49 rpm**.

En cuanto a la aceleración angular, al igual que en el eje Z, también es la misma en ambas poleas. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{A_{max}}{r} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ rad/s}^2$$

El resultado es de **100 rad/s²**.

11.2.- Comprobación de la selección de motores

Para comprobar la viabilidad técnica de los motores se ha calculado el par resistente ejercido por el conjunto a desplazar. En los motores de los ejes X y Z el movimiento se realiza mediante un sistema polea dentada-correa mientras que la elevación (eje y) se consigue por husillo-tuerca.

11.2.1.- Motor eje X

Encargado de desplazar a todo el puente móvil con respecto al eje X. El motor seleccionado en la fase preliminar es el **Nema 23 MS23HA8P4150** (datos de la serie en la Figura 123).

MS23HA - 4 Lead Bi-Polar

Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
				Nm Typ.	oz-in TYP.	@20°C	Typ.	mNm	oz-in	g cm ²	oz-in ²	kg	Lbs
39 mm (1.54 in.)	^ MS23HA0P4100	P	1	0.59	84	6.3	19.8	24	3.4	121.5	0.66	0.42	0.93
	^ MS23HA0P4160	P	1.6	0.60	85	2.6	8.1						
	^ MS23HA0P4220	P	2.2	0.60	85	1.39	4.3						
	^ MS23HA0L4350	L	3.5	0.59	84	0.56	1.62						
55 mm (2.17 in.) 1 Stack	^ MS23HA8P4100	P	1	1.50	210	7.6	50	45	6.4	221	1.2	0.6	1.3
	^ MS23HA8P4150	P	1.5	1.40	200	3.1	21						
	^ MS23HA8P4220	P	2.2	1.50	210	1.6	10.5						
	^ MS23HA8L4360	L	3.6	1.50	210	0.63	3.9						
	^ MS23HA8L4550	L	5.5	1.50	210	0.28	1.56						
77 mm (3.03 in.) 2 Stack	^ MS23HAAP4100	P	1	2.30	330	8.8	61	70	9.9	391	2.1	1	2.2
	^ MS23HAAP4150	P	1.5	2.40	340	4.3	29						
	^ MS23HAAP4200	P	2	2.30	330	2.3	15.2						
	^ MS23HAAP4300	P	3	2.40	340	1.1	6.9						
	^ MS23HAAL4500	L	5	2.30	330	0.39	2.4						

^ Preferred model

Figura 123 Datos técnicos motor Nema 23

Datos de partida del sistema:

- Diámetro polea: $D = 57.3 \text{ mm}$
- Peso puente móvil: $P = 4.32 \text{ kg}$
- Velocidad máx: $V_{\text{máx}} = 100 \text{ mm/s}$
- Aceleración: $a = 1 \text{ m/s}^2$ (de 0 a $V_{\text{máx}}$ en 0.1 segundos)
- Coef. rozamiento: $\mu = 0.2^*$
- Gravedad: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
- N° pasos/vuelta: $N = 400 \text{ pasos}$

*Coeficiente de rozamiento de las guías lineales. Debido a que el fabricante no especifica el valor, se ha tomado como referencia el caso más desfavorable para guías deslizantes (fuente: apuntes asignatura "Transmisión y guiado en maquinaria; tema 6 – guiado en traslación")

El caso estudiado es el momento del arranque, considerado el más crítico ya que se debe vencer la inercia del conjunto, el cual se encuentra parado, además del rozamiento con las guías. La fuerza resultante se calcula de la siguiente forma:

$$F_{\text{res}} = P \cdot g \cdot \mu + P \cdot a$$

$$F_{\text{res}} = 4.32 \cdot 9.8 \cdot 0.2 + 4.32 \cdot 1 = 12.787 \text{ N}$$

Como se emplean 2 motores, uno en cada guía, la fuerza resultante se divide entre ambos:

$$F_m = \frac{F_{\text{res}}}{2} = \frac{12.787}{2} = 6.393 \text{ N}$$

El par resistente se obtiene mediante esta fuerza y el radio de la polea:

$$M_{\text{res}} = \frac{D}{2} \cdot F_m$$

$$M_{\text{res}} = \frac{57.3}{2} \cdot 6.393 = 183.17 \text{ Nmm} = 0.18 \text{ Nm}$$

El resultado es un par resistente de **0.18 Nm** por cada motor. En la tabla de datos técnicos se encuentra la curva de par que el motor es capaz de aportar dependiendo de la velocidad de giro. Se emplea el n° de pasos por segundo para obtener el dato de par:

$$\frac{N}{s} = \frac{100}{2\pi D} \cdot N$$

$$\frac{N}{s} = \frac{100}{180} \cdot 400 = 222.22 \text{ N/s}$$

Con todos estos datos buscamos el par máximo que es capaz de dar el motor:

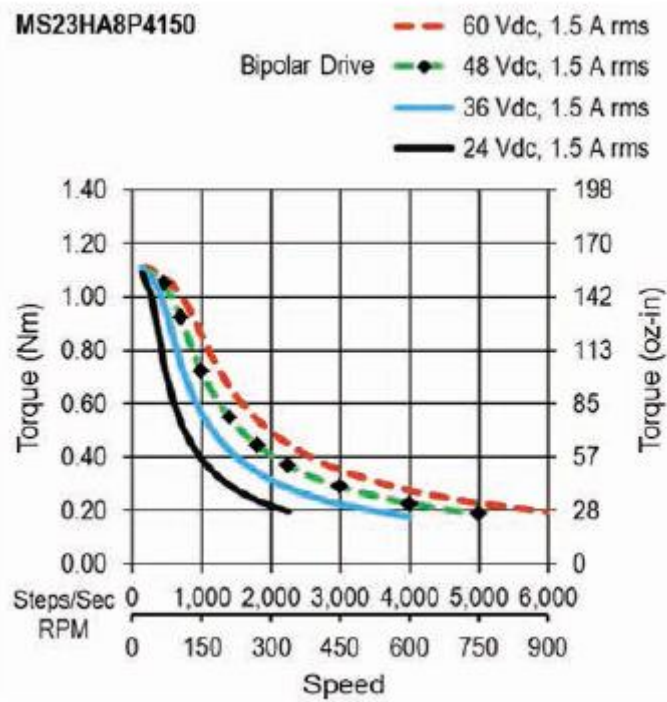


Figura 124 Par motor Nema 23

Seguindo la gráfica se puede observar que el par máximo es de **aproximadamente 1.05 Nm**, por lo que **el motor sería capaz de otorgar el par necesario para el caso más extremo**, y por tanto es el seleccionado. Las dimensiones del motor son las siguientes:

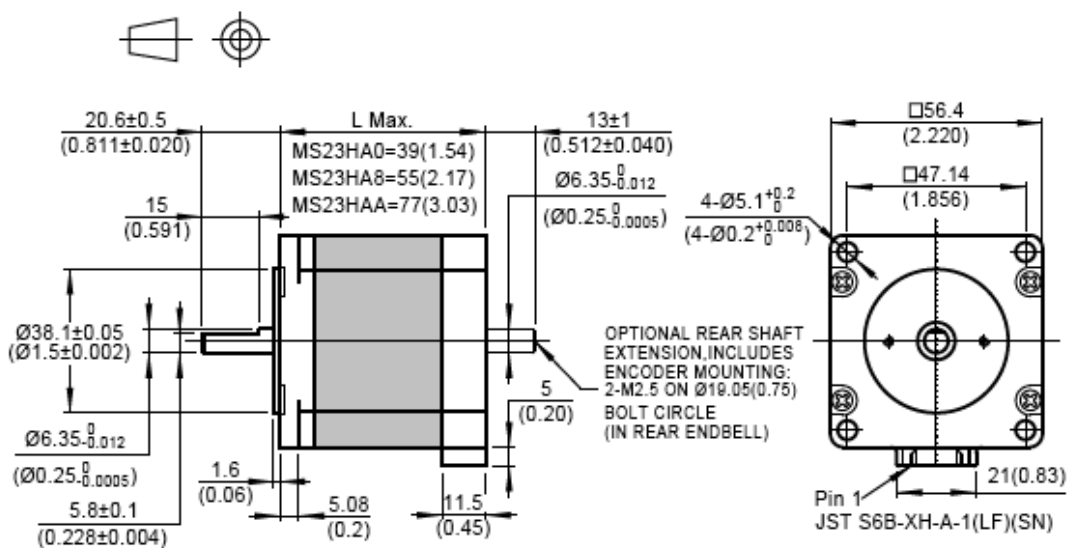


Figura 125 Dimensiones motor Nema 23

11.2.2.- Motor eje Y

Se trata de dos motores **Nema 17 LMS172-T6503** que accionan a sus respectivos sistemas tornillo-tuerca trapezoidal para elevar la guía horizontal. Los datos técnicos de la serie, en la siguiente imagen:

■ LSM17 Step Motor - 4 Lead Bi-Polar

Motor Type Code	Motor Body Length (mm)	Step Angle (°)	Electrical Connection	Rated Current (Amps)	Winding	
					Resistanc(Ohms) ±10%@20°C	Inductance(mH) Typ.
LSM174A	34,3	0,9°	Leads	0,7	5,4	14
LSM174S	34.3	1.8°	Plug In Connector	1	4.3	7.7
LSM172S	39.8	1.8°	Plug In Connector	2	1.04	2.73
LSM176S	48.3	1.8°	Plug In Connector	2	1.3	2.9

Figura 126 Datos técnicos Nema 17

Datos de partida:

- Husillo:
 - o Diámetro: $D = 10 \text{ mm}$
 - o Paso: $p = 2 \text{ mm}$
- Peso guías: $P = 1.51 \text{ kg}$
- Velocidad máxima: $V_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/s}$
- Aceleración: $a = 500 \text{ mm/s}^2$ (de 0 a $V_{\text{máx}}$ en 0.02 segundos)
- Gravedad = 9.8 m/s^2
- N° pasos/vuelta: $N = 200$ pasos

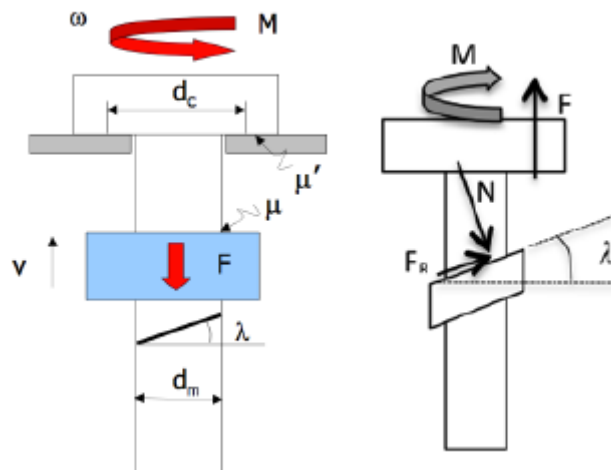


Figura 127 Diagrama husillo

En este caso, observando la gráfica de par del motor se observa que el parámetro necesario es la fuerza resistente (Figura 128). Dicha fuerza resistente se corresponde con el peso de las guías junto con su inercia:

$$F_{res} = P \cdot g + P \cdot a$$

$$F_{res} = 1.51 \cdot 9.8 + 1.51 \cdot 0.5 = 15,55 \text{ N}$$

Al emplear 2 motores, la fuerza se divide en 2:

$$F_m = \frac{F_{res}}{2} = \frac{15,55}{2} = 7,78 \text{ N}$$

La fuerza resistente del sistema es de **7.78 N** por cada motor. Sustituyendo todos los datos en la fórmula del movimiento directo del husillo se obtiene:

$$M = 7,78 \cdot \frac{0,01}{2} \cdot \text{tg}(5,74^\circ + 8,83^\circ) + 7,78 \cdot \frac{0,017}{2} \cdot 0,15 = 0,02 \text{ Nm}$$

El par necesario es de **0.02 Nm** por cada motor.

Las gráficas del catálogo indican la relación fuerza nominal – velocidad lineal del husillo:

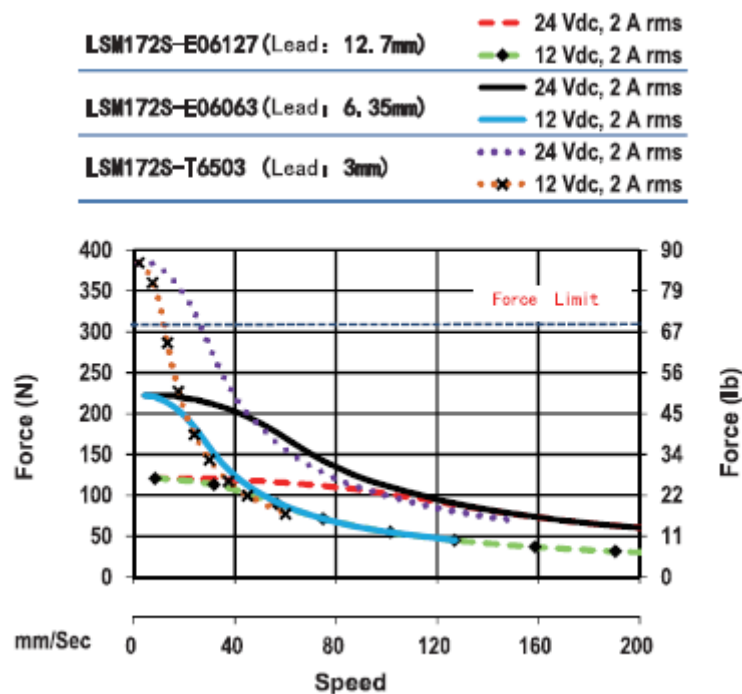


Figura 128 Par motor Nema 17

Se aprecia que para una velocidad de 50 mm/s, a 24 V, la fuerza nominal del motor es de **150 N aproximadamente**, por lo que **los motores son capaces de soportar la carga**.

11.2.3.- Motor eje Z

Para desplazar el carro del palpador a lo largo de sus guías se utiliza un motor **Nema 14 MS14HA3P4032**. Datos técnicos de la serie:

MS14HA - 4 Lead Bi-Polar

Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
	Single Shaft	P=Plug L=Leads	Amps (mounted)	Nm Typ.	oz-in TYP.	@20°C	Typ.	mNm	oz-in	g cm ²	oz-in ²	kg	Lbs
27.3 mm (1.07 in.)	MS14HA1P4026	P	0.26	0.10	15	49	56	4	0.57	12	0.066	0.15	0.33
	^ MS14HA1P4070	P	0.7	0.11	15	6.6	8.2						
	^ MS14HA1P4100	P	1	0.10	15	3.3	3.9						
	^ MS14HA1P4150	P	1.5	0.11	15	1.55	1.8						
36 mm (1.42 in.)	MS14HA3P4032	P	0.32	0.19	27	37	51	8	1.1	20	0.11	0.21	0.46
	^ MS14HA3P4075	P	0.75	0.18	25	6	8.6						
	^ MS14HA3P4100	P	1	0.18	25	3.3	4.9						
	^ MS14HA3P4150	P	1.5	0.18	25	1.61	2.2						
55.5 mm (2.19 in.)	MS14HA5P4040	P	0.4	0.32	45	30	49	10	1.4	35	0.19	0.24	0.53
	^ MS14HA5P4100	P	1	0.32	45	5.1	8.2						
	^ MS14HA5P4150	P	1.5	0.32	45	2.1	3.6						
	^ MS14HA5P4200	P	2	0.32	45	1.34	2.1						

^ Preferred model

Figura 129 Datos técnicos motor eje Z

Datos de partida del sistema:

- Diámetro polea: $D = 20 \text{ mm}$
- Peso carro + componentes electrónicos: $P = 0.5 \text{ kg}$
- Velocidad máx: $V_{\text{máx}} = 100 \text{ mm/s}$
- Aceleración: $a = 1 \text{ m/s}^2$ (de 0 a $V_{\text{máx}}$ en 0.1 segundos)
- Coef. rozamiento: $\mu = 0.2^*$
- Gravedad = 9.8 m/s^2
- N° pasos/vuelta: $N = 400 \text{ pasos}$

*Se emplea el mismo criterio que en el apartado 11.2.1.- Motor eje X

El caso es similar al del motor del eje X, considerando el rozamiento de las varillas con los rodamientos lineales y la inercia del carro en parado. La fuerza resultante es la siguiente:

$$F_{res} = P \cdot g \cdot \mu + P \cdot a$$

$$F_{res} = 0.5 \cdot 9.8 \cdot 0.2 + 0.3 \cdot 1 = 1.28 \text{ N}$$

El momento resistente se calcula de la siguiente forma:

$$M_{res} = F_{res} \cdot \frac{D}{2}$$

$$M_{res} = 1.28 \cdot \frac{20}{2} = 12.8 \text{ Nmm} = 0.013 \text{ Nm}$$

El resultado es un par resistente de **0.013 Nm**. En la tabla de datos técnicos se encuentra la curva de par del motor en función de su velocidad de giro. Se emplea de nuevo el nº de pasos por segundo para obtener el par:

$$\frac{N}{s} = \frac{100}{2\pi D} \cdot N$$

$$\frac{N}{s} = \frac{100}{180} \cdot 400 = 222.22 \text{ N/s}$$

Con estos datos se comprueba en la gráfica:

MS14HA3-0.9° Bipolar

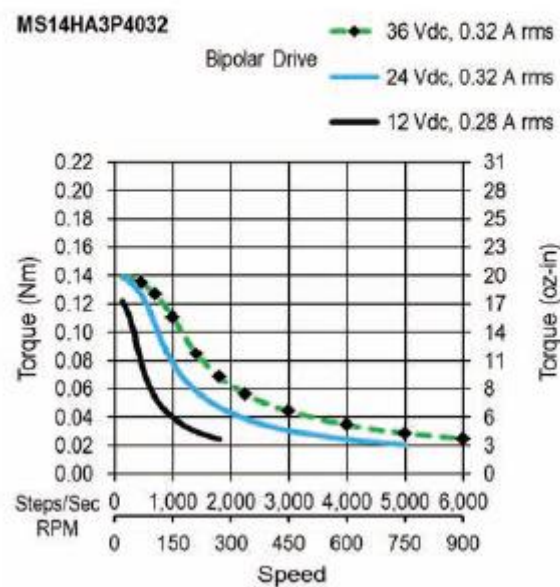


Figura 130 Par motor Nema 14

Para una tensión de 24 V, el par nominal es de **aproximadamente 0.13 Nm**, por lo que se puede concluir que **el motor podrá vencer el par resistente** calculado en el caso más desfavorable.

11.3.- Selección de elementos comerciales

Durante la fase preliminar se eligieron todos los componentes comerciales referentes a transmisiones y guiado de la máquina en sus tres ejes, utilizando los catálogos de los fabricantes. En este apartado se han realizado los cálculos necesarios para comprobar que cada uno de los elementos cumplan correctamente los requisitos mecánicos necesarios para soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos.

11.3.1.- Guías motorizadas eje X

Para el cálculo de las fuerzas y momentos presentes en el sistema se selecciona los peores casos, que en este caso se han considerado los posibles frenazos bruscos estudiados en los análisis dinámicos MEF: en el caso de los frenazos en el plano horizontal será cuando la viga superior se encuentre en su posición más elevada (para el frenazo en vertical esta posición no es crítica). Los diagramas de fuerzas y sus correspondientes cálculos se indican a continuación.

11.3.1.1.- Datos de partida

- Peso puente móvil completo: $P_p = 4.32 \text{ kg}$
- Peso subconjunto guías: $P_g = 1.51 \text{ kg}$
- Peso carro + componentes electrónicos: $P_c = 0.5 \text{ kg}$
- Velocidad máx eje X: $V_{\text{máxX}} = 100 \text{ mm/s}$
- Deceleración eje X: $a_x = 1 \text{ m/s}^2$ (de $V_{\text{máxX}}$ a 0 en 0.1 segundos)
- Velocidad máx eje Y: $V_{\text{máxY}} = 10 \text{ mm/s}$
- Deceleración eje Y: $a_y = 500 \text{ mm/s}^2$ (de $V_{\text{máxY}}$ a 0 en 0.02 segundos)
- Velocidad máx eje Z: $V_{\text{máxZ}} = 100 \text{ mm/s}$
- Aceleración: $a = 1 \text{ m/s}^2$ (de $V_{\text{máxZ}}$ a 0 en 0.1 segundos)
- Gravedad: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

11.3.1.2.- Plano XY

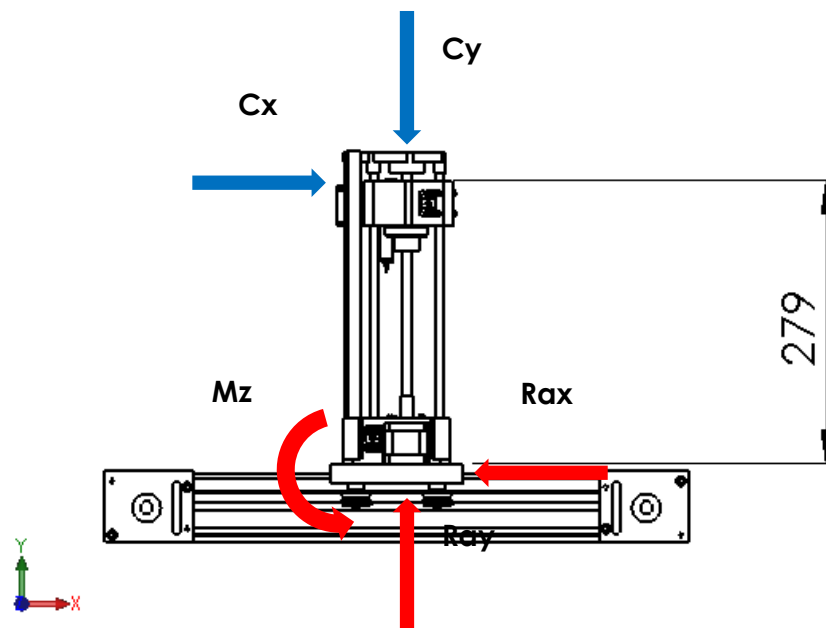


Figura 131 Diagrama de fuerzas XY

En el plano XY se tienen en cuenta las siguientes fuerzas:

- En el eje X se localiza la fuerza de inercia del puente móvil con una deceleración correspondiente al frenado.
- En el eje Y se sitúa el peso del puente móvil (contando el sistema entero, por tanto, incluyendo la viga) junto con la inercia de la guía horizontal; el peso del puente móvil es una carga constante que no se desplaza mientras que la inercia de la guía es variable, cuyo valor máximo se obtiene en el momento del frenado.

Para las fuerzas de inercia se ha considerado su deceleración máxima dependiendo del eje de movimiento:

$$C_x = P_p \cdot a_x = 4.32 \cdot 1 = 4.32 \text{ N}$$

$$C_y = P_p \cdot g + P_g \cdot a_y = 4.32 \cdot 9.8 + 1.51 \cdot 0.5 = 43.09 \text{ N}$$

Con estos datos se calculan las reacciones resultantes, empleando la base del puente móvil como punto de aplicación (a partir de ahora, A):

$$\sum F_x = 0; \quad C_x + R_{ax} = 0; \quad R_x = -C_x = -4.32 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0; \quad -C_y + R_{ay} = 0; \quad R_y = C_y = 43.09 \text{ N}$$

$$\sum M_a = 0; \quad M_z - C_x \cdot 0.279 = 0; \quad M_z = 1.21 \text{ Nm}$$

De esta forma obtenemos las reacciones en el eje X, Y y el momento generado en el eje Z.

11.3.1.3.- Plano XZ

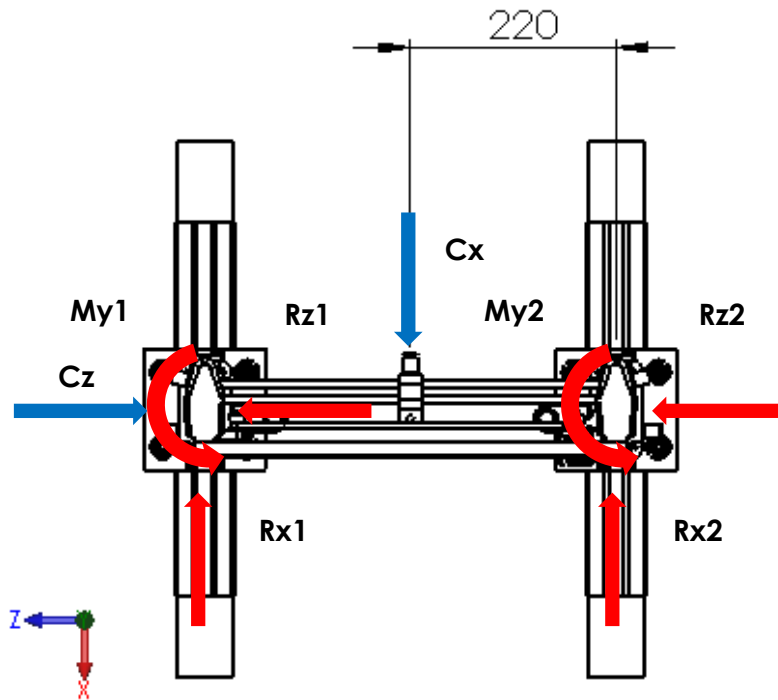


Figura 132 Diagrama fuerzas XZ

En el plano XZ se tienen en cuenta las siguientes fuerzas:

- En el eje X se emplea la misma fuerza usada para el plano XY (C_x), situada en el centro del puente móvil.
- En el eje Z se localiza una carga correspondiente a la inercia del carro en el momento del frenazo, con su correspondiente deceleración.

$$C_x = P_p \cdot a_x = 4.32 \cdot 1 = 4.32 \text{ N}$$

$$C_z = P_c \cdot a_z = 0.5 \cdot 1 = 0.5 \text{ N}$$

Con estos datos se calculan las reacciones:

$$\sum F_x = 0; \quad C_x - R_{x1} - R_{x2} = 0; \quad R_{x1} + R_{x2} = 4.32 \text{ N}$$

Como ambas guías son idénticas, la reacción en X se reparte de forma equitativa:

$$R_{x1} = R_{x2} = 2.16 \text{ N}$$

Además, se cumple que la suma de estas reacciones equivale a la reacción en X calculada anteriormente:

$$R_x = R_{x1} + R_{x2}$$

Se continúa con los cálculos:

$$\sum F_z = 0; \quad -C_z + R_{z1} + R_{z2} = 0; \quad R_{z1} + R_{z2} = C_z = 0.5 \text{ N}$$

De nuevo, como ambas guías son iguales, el esfuerzo se reparte equitativamente:

$$R_{z1} = R_{z2} = 0.25 \text{ N}$$

$$R_z = R_{z1} + R_{z2} = 0.5 \text{ N}$$

Por último, el sumatorio de momentos:

$$\sum M_{y1} = 0; \quad M_{y1} + R_{x2} \cdot 0.44 - C_x \cdot 0.22 = 0; \quad M_y = -2.16 \cdot 0.44 + 4.32 \cdot 0.22 \\ = 0 \text{ Nm}$$

$$\sum M_{y2} = 0; \quad M_{y2} - R_{x1} \cdot 0.44 + C_x \cdot 0.22 = 0; \quad M_y = -2.16 \cdot 0.44 - 4.32 \cdot 0.22 \\ = 0 \text{ Nm}$$

De esta forma obtenemos los momentos resultantes (eje Y) y las reacciones en ambos patines. En este caso los momentos resultantes son nulos en los apoyos ya que la carga se sitúa entre ambos, por lo que ninguna zona se encuentra en voladizo (si se calcularan los momentos en las distintas secciones, se obtendría un momento flector máximo en la zona cercana a la aplicación de la fuerza en la viga superior).

11.3.1.4.- Plano YZ

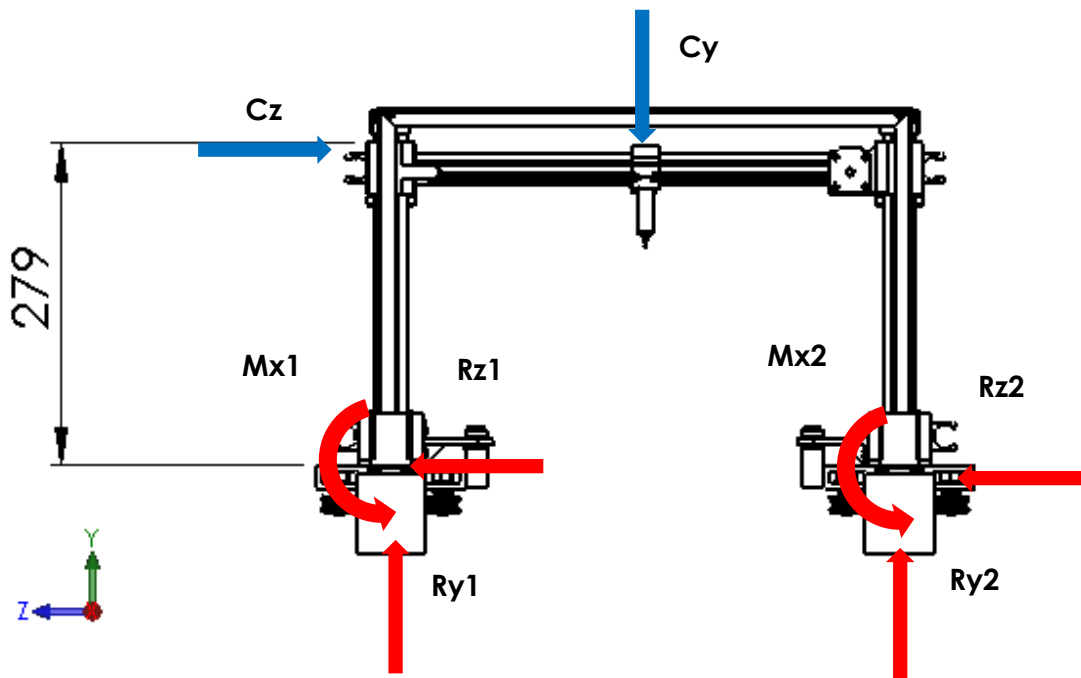


Figura 133 Diagrama fuerzas YZ

En el eje Z se tienen en cuenta las cargas C_y y C_z , que ya están calculadas previamente:

$$C_y = P_p \cdot g + P_g \cdot a_y = 4.32 \cdot 9.8 + 1.51 \cdot 0.5 = 43.09 \text{ N}$$

$$C_z = P_c \cdot a_z = 0.5 \cdot 1 = 0.5 \text{ N}$$

Con estos datos se calculan las reacciones:

$$\sum F_y = 0; \quad -C_y + R_{y1} + R_{y2} = 0; \quad R_{y1} + R_{y2} = C_y = 43.09 \text{ N}$$

La reacción se reparte de forma equitativa entre ambos patines:

$$R_{y1} = R_{y2} = 21.545 \text{ N}$$

Se continúa con los cálculos:

$$\sum F_z = 0; \quad R_{z1} + R_{z2} - C_z = 0; \quad R_{z1} + R_{z2} = C_z = 0.5 \text{ N}$$

De la misma forma que antes, al ser ambas guías iguales y estar la carga centrada, la reacción es igual en ambas componentes:

$$R_{z1} = R_{z2} = 0.25 \text{ N}$$

Se calculan los momentos en ambos patines (1 y 2):

$$\sum M_{x1} = 0; \quad M_{x1} - C_y \cdot 0.22 + R_{y2} \cdot 0.44 - C_z \cdot 0.279 = 0; \quad M_{x1} = -0.14 \text{ Nm}$$

$$\sum M_{x2} = 0; \quad M_{x2} + C_y \cdot 0.22 - R_{y1} \cdot 0.44 - C_z \cdot 0.279 = 0; \quad M_{x2} = -0.14 \text{ Nm}$$

En este caso el momento creado por la carga vertical también se anula por las reacciones en los apoyos, pero se genera un momento de igual valor en ambos patines por la fuerza en el eje Z correspondiente al frenado del carro del palpador.

11.3.1.5.- Resultados

Con los resultados obtenidos en los 3 planos de acción de las cargas se pasa a comprobar si los valores superan los límites de resistencia del elemento. Para ello se consulta el catálogo de las guías:

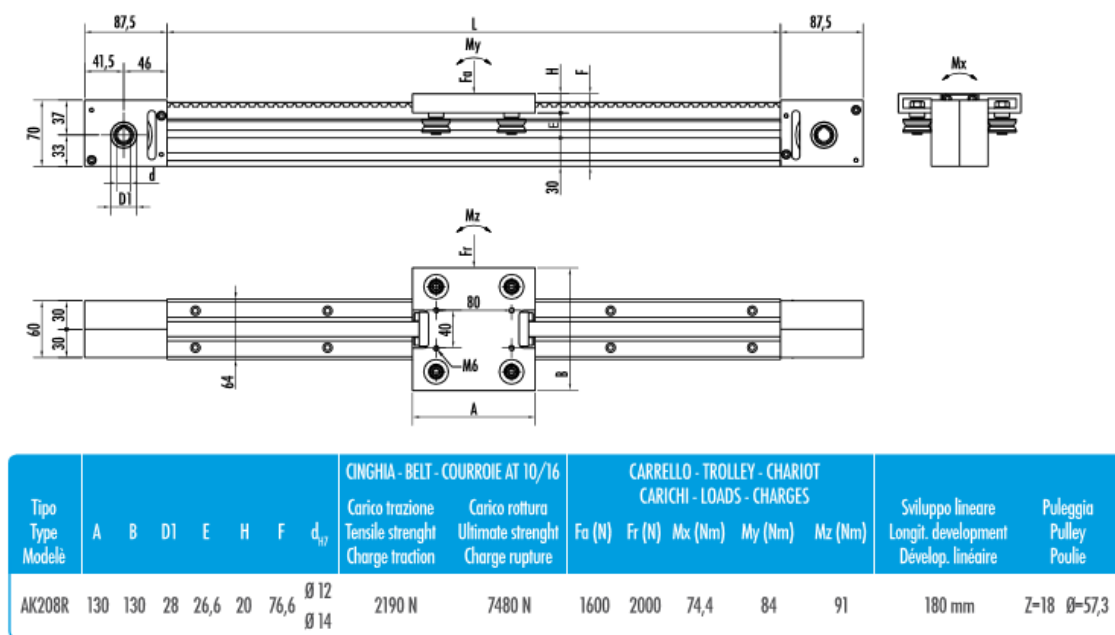


Figura 134 Datos técnicos guías motorizadas

La comparativa entre los resultados obtenidos y las cargas nominales soportadas por las guías es la siguiente tabla. Se han comparado los valores equivalentes, ya que en el diagrama de fuerzas y en el gráfico mostrado en el catálogo se emplea una nomenclatura diferente:

Carga nominal	Valor	Carga equivalente (según diagrama de fuerzas)	Resultado
Fa (N)	1600	Ry1, Ry2	21.545
Fr (N)	2000	Rz1, Rz2	0.25
Mx (Nm)	74.4	Mx1, Mx2	0.14
My (Nm)	84	Mz	1.21
Mz (Nm)	91	My1, My2	0

Los resultados obtenidos son muy inferiores a las cargas máximas que soportan las guías, por lo que se puede concluir que **la selección de las guías es válida**.

11.3.2.- Husillos trapezoidales

El husillo trapezoidal seleccionado durante la fase preliminar es de dimensiones **10x2 mm** del fabricante Conti; se ha seleccionado este modelo debido a sus reducidas dimensiones, que ofrecen una mayor resolución (gracias a un paso reducido que disminuye el avance de la tuerca por vuelta) y ayudan a que el sistema sea más compacto. Las características se indican en la siguiente figura:

Código para tornillo DERECHO	Código para tornillo IZQUIERDO	Diámetro para paso	n° entradas	Clase de precisión μm/300 mm	Rectitud mm / mm	Peso kg/mt
<input type="checkbox"/> KKA 10 TR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 TL ...	Tr 10x2	1	50	0,5 / 1000	0,48
<input type="checkbox"/> KKA 10 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 AL ...	Tr 10x3	1	50	0,5 / 1000	0,42
<input type="checkbox"/> KKA 12 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 12 AL ...	Tr 12x3	1	50	0,5 / 1000	0,65

Figura 135 Datos técnicos husillo

Para el cálculo de la carga soportada por los husillos se ha empleado la fórmula del movimiento directo, ya que va a ser un motor paso a paso colocado en la parte inferior el que accione el movimiento. Se ha considerado como situación más desfavorable la arrancada, ya que es necesario vencer la inercia del sistema (en este caso, la guía horizontal).

Datos de partida:

- Husillo:
 - o Diámetro: $D = 10 \text{ mm}$
 - o Paso: $p = 2 \text{ mm}$
- Peso guías: $P = 1.51 \text{ kg}$
- Velocidad máxima: $V_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/s}$
- Aceleración: $a = 500 \text{ mm/s}^2$ (de 0 a $V_{\text{máx}}$ en 0.02 segundos)
- Gravedad = 9.8 m/s^2

Como se ha indicado antes, se aplica la fórmula del movimiento directo del husillo:

$$M = F \cdot \frac{D_m}{2} \cdot \text{tg}(\lambda + \varphi) + F \cdot \frac{D_c}{2} \cdot \mu'$$

Donde:

- D_m : Diámetro medio del tornillo = $D = 10 \text{ mm}$
- λ : Ángulo de avance
- D_c : Diámetro medio de la cabeza de apoyo axial del tornillo = 17 mm
- μ' : Coeficiente de rozamiento tuerca-husillo = 0.15^*

- μ' : Coeficiente de rozamiento entre la cabeza del tornillo y su apoyo axial = 0.15*
- φ : Ángulo de rozamiento entre tuerca y tornillo modificado con la inclinación de la rosca α .

*Coeficiente de rozamiento acero-acero

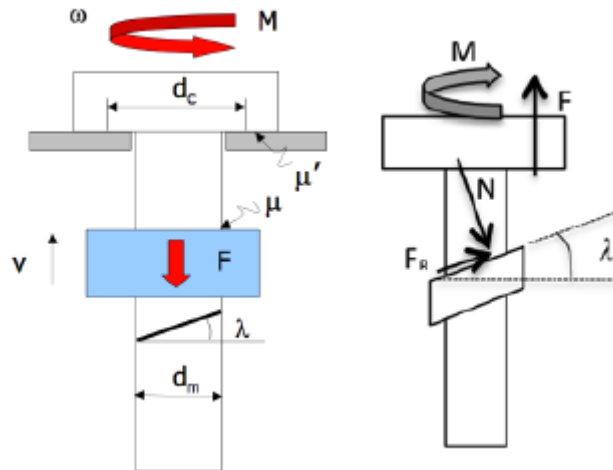


Figura 136 Diagrama husillo

El ángulo de avance λ se obtiene mediante trigonometría:

$$\lambda = \arcsen\left(\frac{p}{2 \cdot D_m}\right) = \arcsen\left(\frac{2}{2 \cdot 10}\right) = 5.74^\circ$$

El ángulo de rozamiento φ se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\mu}{\cos \alpha}\right) = \arctg\left(\frac{0.15}{\cos 15}\right) = 8.83^\circ$$

Donde 2α = ángulo de rosca.

La fuerza resistente se corresponde con el peso de las guías junto con su inercia:

$$F_{res} = P \cdot g + P \cdot a$$

$$F_{res} = 1.51 \cdot 9.8 + 1.51 \cdot 0.5 = 15.55 \text{ N}$$

Al emplear 2 husillos, la fuerza se divide en 2:

$$F_m = \frac{F_{res}}{2} = \frac{15.55}{2} = 7.78 \text{ N}$$

La fuerza resistente del sistema es de **7.78 N** por cada uno de los husillos. Sustituyendo todos los datos en la fórmula del movimiento directo del husillo se obtiene:

$$M = 7.78 \cdot \frac{0.01}{2} \cdot \text{tg}(5.74^\circ + 8.83^\circ) + 7.78 \cdot \frac{0.017}{2} \cdot 0.15 = 0.02 \text{ Nm}$$

El par motor necesario es de **0.02 Nm** por cada husillo.

Para comparar los resultados no se disponen de los datos de las cargas máximas soportadas por los husillos, por lo que se ha empleado una tabla de datos técnicos de un modelo similar:

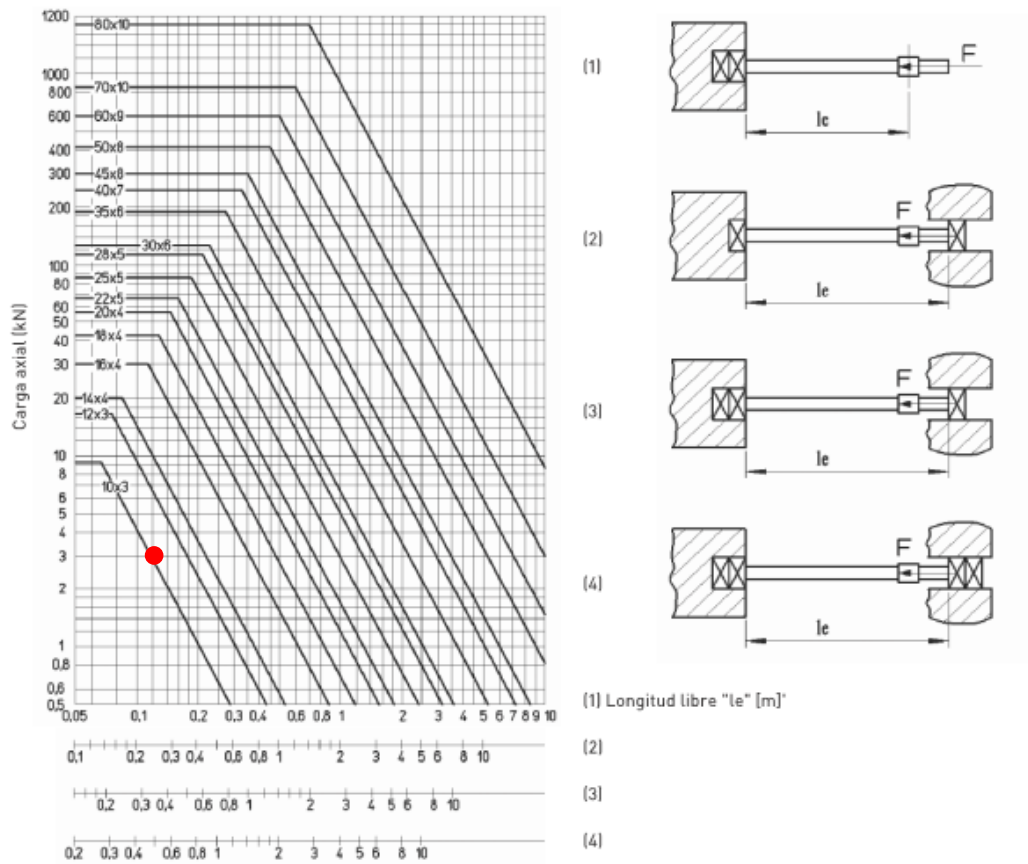


Figura 137 Gráfico de cargas máximas husillo

Se toma como referencia el modelo de dimensiones 10x3 ya que es el más similar al componente empleado. Los husillos de la máquina se han colocado de forma que tienen tan solo un empotramiento simple en la parte inferior y otro en la superior, por lo que son del tipo 2; además, su longitud es de 305 mm, pero su longitud útil se calcula de la siguiente forma:

$$Lu = Lt - (Hb + Hs) = 305 - (44.8 + 20) = 240.2 \text{ mm}$$

Para realizar este cálculo se han restado a la longitud total la altura de la base (Hb) y la de la pieza superior que la sujeta (Hs):

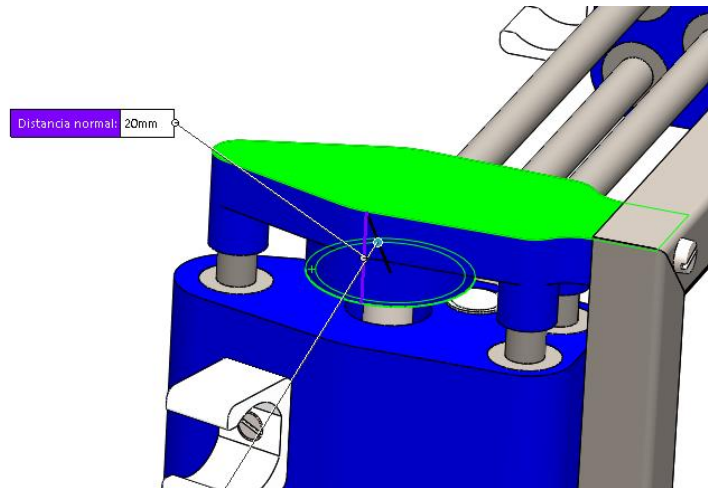


Figura 138 Anclaje superior

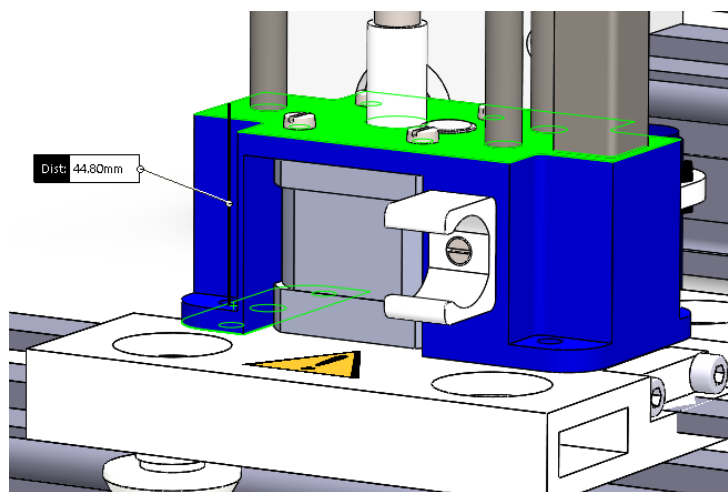


Figura 139 Anclaje inferior

De esta forma y como se observa en la Figura 137 mediante el punto rojo, la carga axial máxima soportada por cada husillo es la siguiente:

$$C_{m\acute{a}x} = 3000 \text{ N}$$

La fuerza máxima registrada en cada uno de los husillos es de 7.78 N, un valor muy inferior a la carga máxima estimada por lo que **el componente se da por válido para soportar las cargas a las que se va a someter.**

11.3.3.- Guías superiores (eje Z)

Como las guías superiores no constituyen un elemento comercial en sí, sino que se componen de varias partes, no existen datos específicos sobre cargas soportadas; por ello, **se da por válido el resultado obtenido en los análisis mecánicos** ya que tanto el carro como las varillas, en las condiciones de trabajo seleccionadas, soportaban las cargas estipuladas (ver 4.7.4.4.- Análisis dinámico).

11.3.4.- Rodamientos

11.3.4.1.- Rodamiento de soporte del husillo

Para el rodamiento que permite el giro de los husillos se ha seleccionado un rodamiento de bolas con las siguientes dimensiones:

- $D = 30 \text{ mm}$
- $d = 10 \text{ mm}$
- $h = 9 \text{ mm}$

Considerando D el diámetro exterior, d el interior y h la altura. La posición del rodamiento en la máquina es la siguiente:

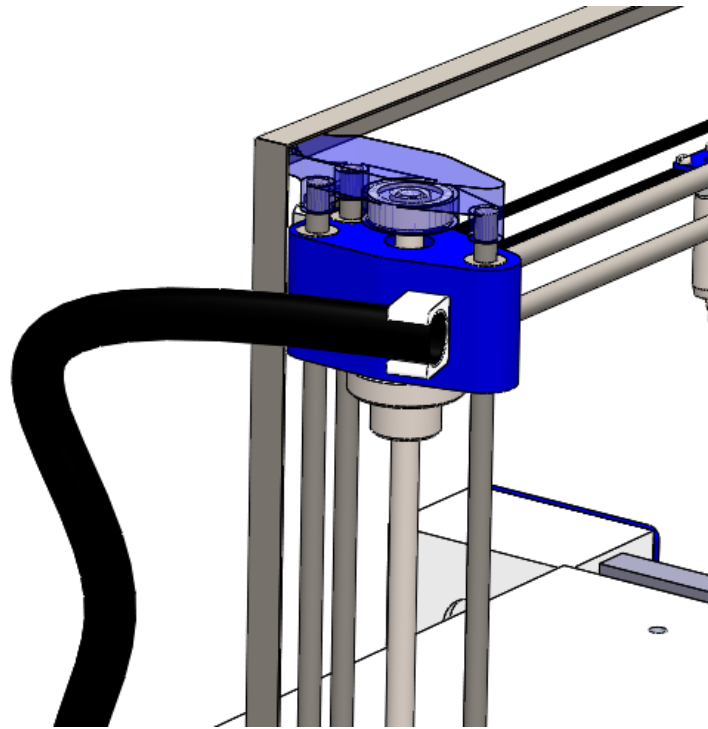


Figura 140 Localización rodamiento

En el catálogo de la marca Schaeffler se pueden encontrar los datos técnicos acerca de las cargas máximas soportadas por el rodamiento:

m	0,037 kg	Mass
C_r	5300 N	Basic dynamic load rating, radial
C_{0r}	2600 N	Basic static load rating, radial
C_{ur}	174 N	Fatigue limit load, radial
n_G	16100 1/min	Limiting speed

Figura 141 Datos técnicos

Por tanto, es necesario determinar la carga radial máxima que va a soportar. Los valores de la carga se pueden extraer de los diagramas de fuerzas de las guías, y se distribuye de la siguiente forma:

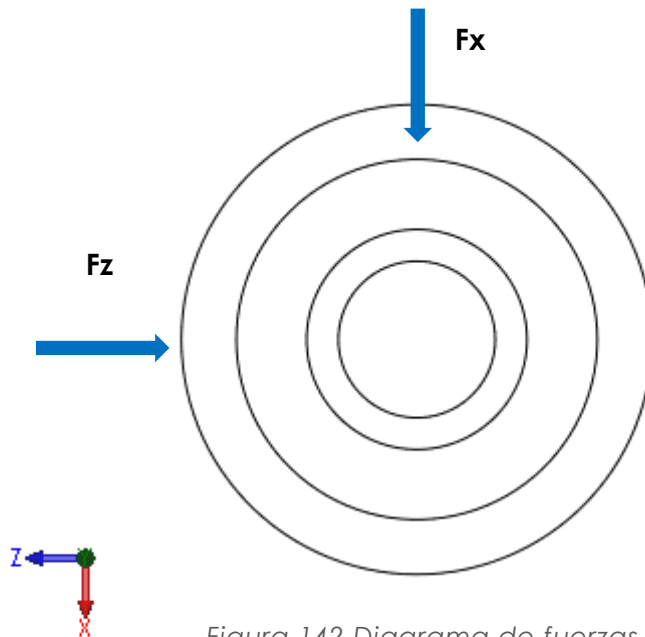


Figura 142 Diagrama de fuerzas

Teniendo en cuenta que:

- $F_x = C_x/2$, ya que la carga registrada se divide entre los dos rodamientos que sujetan ambos husillos.

$$F_x = \frac{C_x}{2} = \frac{4.32}{2} = 2.16 \text{ N}$$

- $F_z = C_z/2$, de la misma forma que anteriormente.

$$F_z = \frac{C_z}{2} = \frac{0.5}{2} = 0.25 \text{ N}$$

Por tanto, la fuerza radial resultante es la siguiente:

$$Fr = \sqrt{Fx^2 + Fz^2} = 2.174 \text{ N}$$

Se obtiene una carga radial de **2.174 N**. El fabricante recomienda un coeficiente de seguridad mínimo de 2, y como el rodamiento va a estar en constante movimiento durante su uso se considera la carga dinámica para este cálculo.

$$S = \frac{Cr}{Fr} = \frac{5300}{2.174} = 2438$$

Como el coeficiente de seguridad supera con creces el valor indicado por el fabricante, se concluye que **la selección del rodamiento es válida**, y por tanto el rodamiento soportará las cargas a las que se someterá.

Se realiza, por último, una estimación de la vida útil del rodamiento. Para ello se sigue esta fórmula:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{Cr}{Fr}\right)^a$$

En la que L es la cantidad de ciclos, Cr y Fr son las cargas nominales y soportadas respectivamente y a es un coeficiente cuyo valor es 3 para los rodamientos de bolas (en el caso de los cilíndricos y de aguja este coeficiente es 10/3). Sustituyendo las incógnitas por valores, se obtiene un resultado de:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{5600}{2.174}\right)^3 = 1.448 \cdot 10^{17} \text{ ciclos}$$

11.3.4.2.- Rodamiento de sujeción polea superior

Para el rodamiento que sirve como soporte de la polea conducida en el sistema de transmisión polea dentada-correa superior se ha seleccionado un rodamiento de agujas de las siguientes dimensiones:

- D = 8 mm
- d = 5 mm
- h = 8 mm

Donde D es el diámetro exterior, d es el diámetro interior y h es la altura. La posición del rodamiento es la siguiente:

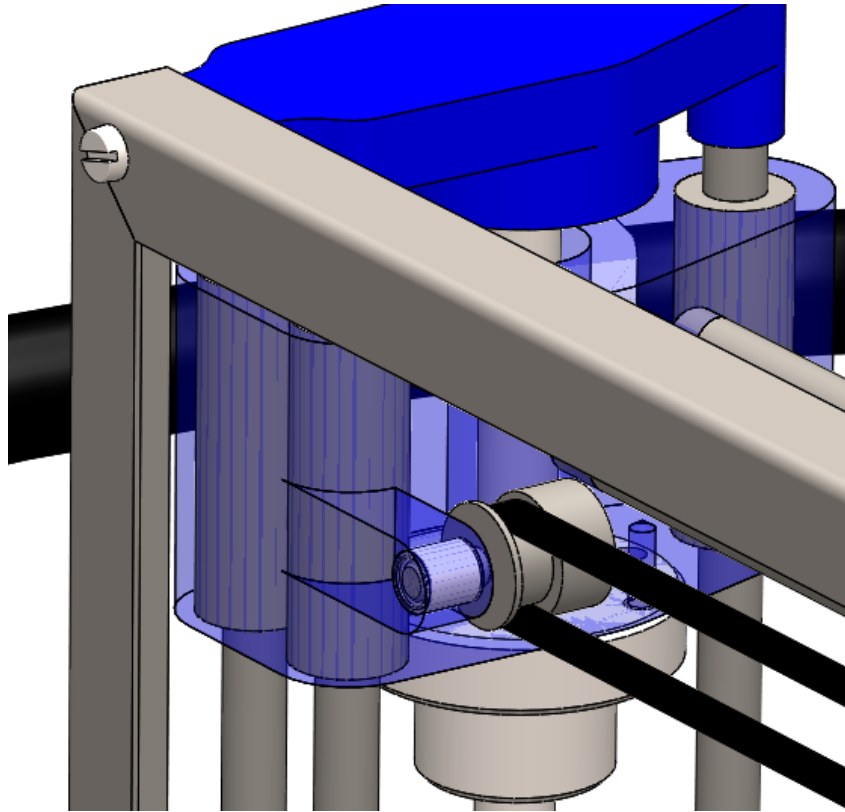
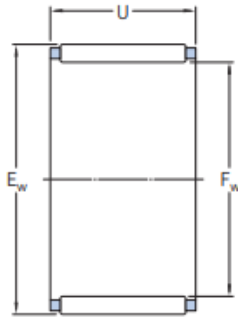


Figura 143 Localización rodamiento

En este caso la única carga existente es la generada por la tensión de la correa, por lo que se emplea el valor de la fuerza resistente empleada en el APARTADO:

$$FR = 1.28 N$$

Mediante el catálogo de la marca SKF se han obtenido los datos técnicos en cuanto a cargas soportadas:



Dimensiones principales	Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación	Sello adecuado ¹⁾	
	dinámica	estática		Velocidad de eficiencia	Velocidad límite				
F _w E _w U	C	C ₀	P _u	r. p. m.		g	-	-	
3	5 7	1,51	1,34	0,134	40 000	45 000	0,3	K 3x5x7 TN	—
	5 9	1,68	1,53	0,153	40 000	45 000	0,4	K 3x5x9 TN	—
	6 7	1,42	1,02	0,104	38 000	43 000	0,4	K 3x6x7 TN	—
4	7 7	1,72	1,32	0,137	36 000	43 000	0,5	K 4x7x7 TN	—
	7 10	2,29	1,9	0,204	36 000	43 000	0,7	K 4x7x10 TN	—
5	8 8	2,29	2	0,212	36 000	40 000	0,7	K 5x8x8 TN	—
	8 10	2,92	2,7	0,29	36 000	40 000	0,9	K 5x8x10 TN	—

Figura 144 Datos técnicos

Debido a que el rodamiento se va a mantener en constante movimiento durante su uso, se ha considerado la carga dinámica para realizar los cálculos. El fabricante recomienda un coeficiente de seguridad de 2 en cuanto a carga, por lo que se procede a la comparación de la capacidad de carga dinámica con el valor obtenido de fuerza soportada:

$$S = \frac{C}{Fr} = \frac{2290}{1.28} = 1789$$

Como el valor es muy superior al coeficiente de seguridad necesario, **la selección del rodamiento cumple con los requisitos de carga** y soportará los esfuerzos a los que será sometido. Por último, se ha analizado la vida útil del rodamiento de la misma forma que con el rodamiento de los husillos, mediante la siguiente fórmula:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{Cr}{Fr}\right)^a$$

En la que L es la cantidad de ciclos, Cr y Fr son las cargas nominales y soportadas respectivamente y a es un coeficiente cuyo valor es 10/3 para los rodamientos de agujas y cilíndricos. Sustituyendo las incógnitas por valores, se obtiene un resultado de:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{2290}{1.28}\right)^{10/3} = 6.95 \cdot 10^{17} \text{ ciclos}$$

11.4.- Incertidumbre y resolución

En este apartado se detallan las operaciones realizadas para calcular tanto la precisión como la resolución de medida de la máquina, mediante datos obtenidos sobre los distintos componentes que intervienen en estos aspectos.

11.4.1.- Motor eje X

Para obtener la resolución de los motores del eje X se han empleado tanto los datos técnicos del motor como las dimensiones del mecanismo al que transmite el movimiento, que en este caso es un sistema de 2 poleas con correa dentada. Los datos se obtienen directamente de los catálogos de los elementos comerciales, y son los siguientes:

- Perímetro de la polea: $L_c = 57.3 * 2\pi = 180 \text{ mm}$
- Paso del motor $p = 0.9^\circ$

MS23HA Series: 0.9° - Size 23



• Phases	2
• Steps / Revolution	400
• Step Accuracy	±5%
• Shaft Load (20,000 Hours at 1000 RPM)	
Axial	40 N (9 Lbs.) Push 130 N (30 Lbs.) Pull
Radial	70 N (15.5 Lbs.) At Flat Center
• IP Rating	40
• Approvals	UL Recognized File E465363, RoHS
• Operating Temp.	-20°C to +50°C
• Insulation Class	B, 130°C
• Insulation Resistance	100 MegOhms

Figura 145 Catálogo Nema 23

Tipo Type Modèle	A	B	D1	E	H	F	d ₁₀	CINGHIA - BELT - COURROIE AT 10/16		CARRELLO - TROLLEY - CHARIOT CARICHI - LOADS - CHARGES					Sviluppo lineare Longit. development Dévelop. linéaire	Puleggia Pulley Poulie
								Carico trazione Tensile strenght Charge traction	Carico rottura Ultimate strenght Charge rupture	Fa (N)	Fr (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)		
AK208R	130	130	28	26,6	20	76,6	Ø 12 Ø 14	2190 N	7480 N	1600	2000	74,4	84	91	180 mm	Z-18 Ø=57,3

Figura 146 Catálogo guías motorizadas

11.4.1.1.- Resolución

Con los datos extraídos, para el cálculo del avance lineal por paso se emplea la siguiente fórmula:

$$a = \frac{Lc \cdot p}{360} = \frac{180 \cdot 0.9}{360} = 0.45 \text{ mm/paso}$$

La resolución del motor en estas condiciones sería de **0.45 mm/paso**. Debido a que se busca una incertidumbre de +/- 0.1 mm, esta resolución no es lo suficientemente fina como para alcanzar dicha precisión; como solución se opta por incluir un encoder que permite mejorar la resolución. Las características del encoder se detallan en la siguiente figura.

Encoders

For NI NEMA 17, 23, 24, and 34 Size Stepper Motor Rear Shaft



- 2000 counts per revolution (CPR)
- A, B, and Z (index) channels
- Differential outputs
- 5 mm, 1/4 in., or 3/8 in. hub diameter

Figura 147 Datos encoder Nema 17-23

Conociendo la distancia que se desplaza la guía con cada vuelta completa y la resolución por vuelta del encoder, la ecuación queda de esta forma:

$$a = \frac{180}{2000} = 0.09 \text{ mm/paso}$$

Se obtiene una resolución de **0.09 mm/paso**. En este caso el valor es inferior al margen de precisión buscado, por lo que se considera válido.

11.4.1.2.- Precisión

La precisión porcentual se obtiene de los datos del motor (Figura 145Figura 123). Pese a que el movimiento se realiza mediante 2 motores, se ha considerado la incertidumbre como si fuera tan solo un motor ya que funcionan de forma simultánea moviendo la misma estructura (en este caso, el puente móvil). Traducido en valores absolutos, el resultado sería el siguiente:

$$\text{Precisión} = 0.45 \cdot 0.05 = 0.025 \text{ mm} = 25 \mu\text{m}$$

La precisión obtenida en el motor del eje X es de **25 μm** .

11.4.2.- Motor eje Y

En el caso del motor del eje Y, el mecanismo a desplazar es un sistema husillo trapezoidal-tuerca. Para los cálculos se han empleado los datos técnicos de los elementos comerciales implicados, resumidos en las siguientes imágenes:

Código para tornillo DERECHO	Código para tornillo IZQUIERDO	Diámetro para paso	n° entradas	Clase de precisión $\mu\text{m}/300 \text{ mm}$	Rectitud mm / mm	Peso kg/mt
<input type="checkbox"/> KKA 10 TR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 TL ...	Tr 10x2	1	50	0,5 / 1000	0,48
<input type="checkbox"/> KKA 10 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 AL ...	Tr 10x3	1	50	0,5 / 1000	0,42
<input type="checkbox"/> KKA 12 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 12 AL ...	Tr 12x3	1	50	0,5 / 1000	0,65

Figura 148 Catálogo husillo

■ LSM17 Step Motor - 4 Lead Bi-Polar

Motor Type Code	Motor Body Length (mm)	Step Angle (°)
LSM174A	34.3	0.9°
LSM174S	34.3	1.8°
LSM172S	39.8	1.8°
LSM176S	48.3	1.8°

LSM17 Series

Phases	2
Step Accuracy	$\pm 5\%$
IP Rating	40
Approvals	RoHS
Operating Temp.	-20°C~+50°C
Insulation Class	B(130°C)
Insulation Resistance	100MegOhms

Figura 149 Catálogo Nema 17

11.4.2.1.- Resolución

En este caso, el dato de avance por vuelta se toma directamente del paso del husillo. El paso del motor es de 1.8° para el modelo seleccionado. Por tanto, los datos son los siguientes:

- Paso del husillo: $L_c=2$ mm
- Paso del motor: $P=1.8^\circ$

Con estos datos, la ecuación empleada es la siguiente:

$$a = \frac{2 \cdot 1.8}{360} = 0.01 \text{ mm/paso}$$

La resolución del motor en el eje Y es de **0.01 mm/paso**. El valor se encuentra dentro de los límites aceptables (no supera el valor de la precisión deseada), por lo que no sería necesario emplear un encoder que refine la resolución; sin embargo, para facilitar la toma de medidas se ha empleado un encoder del mismo tipo que el del eje X debido a que se adapta a un motor Nema 17 (Figura 145). De esta forma su nueva resolución es:

$$a' = 0.01 \cdot \frac{200}{2000} = 0.001 \text{ mm/paso}$$

La nueva resolución con el encoder incorporado es de **0.001 mm/paso**.

11.4.2.2.- Precisión

Los cálculos de precisión se realizan de la misma manera que para el motor del eje X: se emplea el dato porcentual de precisión en función de la resolución del motor. La ecuación queda de la siguiente manera:

$$\text{Precisión} = 0.01 \cdot 0.05 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mm} = 0.5 \mu\text{m}$$

La precisión obtenida en el motor Y es de **0.5 μm** .

11.4.3.- Motor eje Z

El motor del eje Z es un caso similar al del motor X, ya que el mecanismo es el mismo (se emplean 2 poleas dentadas con una correa como mecanismo de transmisión). Los datos técnicos del motor se pueden observar en la siguiente figura:

MS14HA Series: 0.9° - Size 14



• Phases	2
• Steps / Revolution	400
• Step Accuracy	±5%
• Shaft Load (20,000 Hours at 1000 RPM)	
Axial	25 N (5.6 Lbs.) Push 65 N (15 Lbs.) Pull
Radial	30 N (6.5 Lbs.) At Flat Center
• IP Rating	40
• Approvals	RoHS
• Operating Temp.	-20°C to +50°C
• Insulation Class	B, 130°C
• Insulation Resistance	100 MegOhms

Figura 150 Catálogo Nema 14

11.4.3.1.- Resolución

Conociendo las dimensiones de la polea ($R=3$ mm) y extrayendo los datos necesarios del motor, se obtienen estos datos:

- Perímetro de la polea: $L_c = 3 \cdot 2\pi = 18.8$ mm
- Paso del motor: $P = 0.9^\circ$

Con estos datos se puede calcular la siguiente ecuación:

$$a = \frac{18.8 \cdot 0.9}{360} = 0.047 \text{ mm/paso}$$

El avance por paso obtenido es de **0.047 mm/paso**. Como en el apartado anterior, el valor no supera a la precisión deseada, sin embargo, para facilitar la toma de datos se incorpora un encoder (en este caso específico para Nema 14, detallado en la siguiente figura).

E4T

OPTICAL ENCODERS



Features and Benefits:

- Compact miniature size best for NEMA 8, 11, 14, and 17.
- 100 to 500 cycles per revolution (CPR)
- Single ended or differential output options
- High retention Snap-in polarized connector
- Tracks from 0 to 100,000 cycles/sec
- 400 to 2000 pulses per revolution (PPR)
- -20 to + 100°C operating temperature

Figura 151 Encoder eje Z

Como se menciona en el apartado 4.5.1.- Encoders, el modelo de encoder seleccionado es el de 2000 pasos/vuelta, por lo que la nueva resolución es la siguiente:

$$a' = 0.047 \cdot \frac{400}{2000} = 0.0094 \text{ mm/paso}$$

La resolución con encoder es de **0.0094 mm/paso**.

11.4.3.2.- Precisión

La precisión se calcula de la misma forma que anteriormente, mediante el valor porcentual indicado en el catálogo del motor:

$$\text{Precisión} = 0.047 \cdot 0.05 = 2.35 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 2.35 \mu\text{m}$$

La precisión obtenida es de **2.35 μm** en el eje Z.

11.4.4.- Sistemas de transmisión/guiado

Los elementos que conforman la transmisión y el guiado no encajan perfectamente pese a que estén fabricados con tolerancias muy ajustadas. Todos estos sistemas tienen un juego o backlash que se traduce en una incertidumbre añadida.

11.4.4.1.- Guías lineales

Debido a que no se ha encontrado la información específica de la precisión de las guías seleccionadas (tanto en el caso de las guías motorizadas como de las varillas) se ha empleado la tolerancia indicada en los apuntes de la asignatura "Sistemas de transmisión y guiado en maquinaria. Tema 6 – Guiado de traslación" para guías lineales de máquina-herramienta.

Parámetros de selección

Precisión de posicionado

En muchas aplicaciones de transporte industrial es del orden de 1 mm o 0.1 mm, mientras que en máquinas herramienta puede ser entre 1 y 10 micras (100 veces mayor)

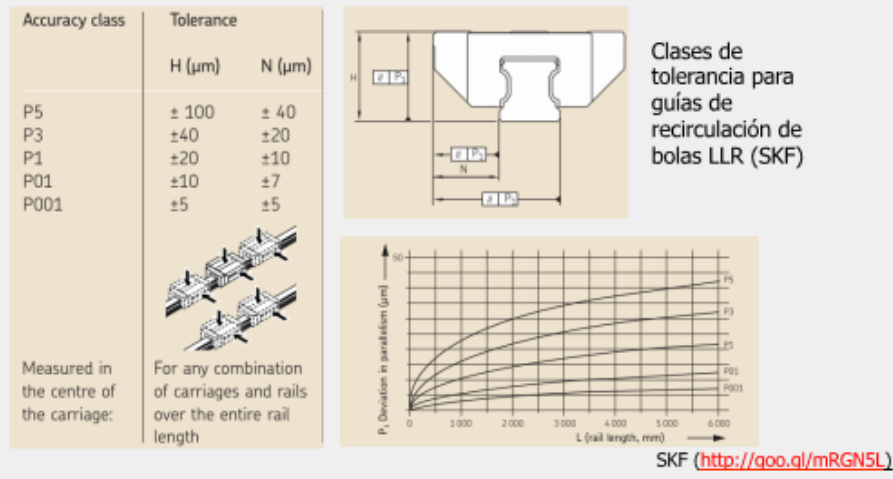


Figura 152 Datos precisión guías

La precisión tomada como referencia es de **10 μm** .

11.4.4.2.- Transmisión – husillo

La incertidumbre del husillo se tiene en cuenta en el eje Y, que es en el que trabaja (dirección vertical), ya que los otros dos ejes están restringidos por el sistema de guiado. Para obtener la precisión del husillo se ha empleado directamente el catálogo del fabricante, el cual incluye los datos de precisión del sistema. Se pueden ver en la siguiente imagen:

Código para tornillo DERECHO	Código para tornillo IZQUIERDO	Diámetro para paso	n° entradas	Clase de precisión $\mu\text{m}/300\text{ mm}$	Rectitud mm / mm	Peso kg/mt
<input type="checkbox"/> KKA 10 TR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 TL ...	Tr 10x2	1	50	0,5 / 1000	0,48
<input type="checkbox"/> KKA 10 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 10 AL ...	Tr 10x3	1	50	0,5 / 1000	0,42
<input type="checkbox"/> KKA 12 AR ...	<input type="checkbox"/> KKA 12 AL ...	Tr 12x3	1	50	0,5 / 1000	0,65

Figura 153 Precisión husillo

La incertidumbre en el husillo es de **50 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$** ; como el husillo utilizado tiene unas dimensiones de 305 mm, el valor final es:

$$\text{Incertidumbre} = \frac{50 \cdot 305}{300} = 50.83 \mu\text{m}$$

El valor final es de **50.83 μm** .

11.4.4.3.- Transmisión – correa dentada y poleas

En el caso de las correas dentadas la incertidumbre se tiene en cuenta en el eje Z en el caso de la correa superior y en el X en el caso de la inferior, que son los ejes en los que trabajan respectivamente (dirección horizontal), ya que los otros dos ejes están restringidos por el sistema de guiado correspondiente. Como no se ha encontrado información directamente de los catálogos de los fabricantes, por lo que se ha optado por emplear la precisión existente en sistemas de transmisión del mismo tipo de otros fabricantes:

Accionamientos electromecánicos

Ayuda para la selección

FESTO

Cuadro general: Ejes accionados por correa dentada y por husillo

Ejes accionados por correa dentada

- Velocidad de hasta 10 m/s
- Aceleración de hasta 50 m/s²
- Precisión de repetición de hasta $\pm 0,08$ mm
- Carreras de hasta 8500 mm (carreras más largas sobre demanda)
- Diversas posibilidades de conectar el motor

Ejes accionados por husillo

- Velocidad de hasta 2 m/s
- Aceleración de hasta 20 m/s²
- Precisión de repetición de hasta $\pm 0,003$ mm
- Carrera de hasta 3000 mm

Sistema de coordenadas

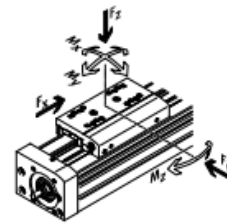


Figura 154 Precisión guías

De esta forma, la precisión usada como referencia es de **80 μm** .

11.4.5.- Resultados finales

En la siguiente tabla se resumen los valores finales de la resolución y la incertidumbre por cada eje, sumando cada uno de los valores indicados previamente:

Eje	Resolución (μm)	Incertidumbre (μm)
Eje X	90	105
Eje Y	1	51.33
Eje Z	9.4	82.35
Resultante	101.4	143.06

ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO

Se ha realizado un presupuesto en base a todos los aspectos económicos que afectan a la materialización de este proyecto. Se han recopilado todos los datos referentes tanto a componentes comerciales como a piezas de diseño propio, así como los materiales necesarios para fabricarlas y la mano de obra de diseño, fabricación y montaje. Se ha considerado un volumen de producción de **50 piezas**.

1.- Estado de mediciones

En primer lugar, se han recogido los datos técnicos de las piezas de diseño propio, para las que se ha indicado material, proceso de fabricación y cantidad de piezas empleadas en cada máquina:

Denominación	Material	Proceso de fabricación	Cantidad
Bloque plástico pata	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4
Estructura soporte	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Sujeción portacables	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	7
Unión base-motor X	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Acoplamiento motorX-guía	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción guías X	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4
Soporte mesa planitud	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Apoyo soporte mesa planitud	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Carcasa delantera	Chapa de acero inoxidable	Plegado + Taladrado	2
Acoplamiento tornillo-motorY	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción motorY-guías-varilla	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Eje polea no motriz	Acero inoxidable	Mecanizado	1
Soporte palpador	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	1

Denominación	Material	Proceso de fabricación	Cantidad
Soporte superior husillo y varilla	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Estructura rígida	Acero S235	Soldadura de perfiles + Taladrado	1
Sujeción sensor difuso puente	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	2
Sujeción sensor difuso base	PLA	Impresión 3D + Mecanizado	4

2.- Presupuesto

El presupuesto se ha dividido en los siguientes apartados:

- **Piezas a fabricar. Materiales:** Incluye los datos de los materiales adquiridos, así como de los perfiles comerciales que se van a emplear para la fabricación de las piezas de diseño propio.
- **Elementos comerciales:** Componentes adquiridos a fabricantes externos.
- **Mano de obra:** Costes derivados del diseño, montaje y fabricación de la máquina en lo referente a salarios del personal cualificado.
- **Otros gastos:** Se incluye un apartado destinado a costes comerciales, electricidad, limpieza, imprevistos, etc. que no se han reflejado en el presupuesto. Se ha considerado un **15%** del presupuesto total.

2.1.- Piezas a fabricar. Materiales

Los materiales adquiridos para fabricar las piezas de diseño propio básicamente son diferentes perfiles de acero S235, chapa de acero inoxidable y plástico PLA para impresión 3D. La cantidad se ha estimado según el volumen de las piezas a fabricar y la oferta del proveedor.

PIEZAS A FABRICAR. MATERIALES					
Nº	Material	Dimensiones	Cantidad	Precio/ud (€)	Precio total (€)
1	Plástico PLA	Rollo 1 kg	1,00	16,94	16,94
2	Chapa acero bruto fino	500x250x0,6 mm	1,00	5,60	5,60
3	Perfil T acero	40x5 mm	1,36	4,28	5,82
4	Perfil L acero	50x50x4	2,20	6,27	13,79
5	Perfil L acero	25x25x3	1,00	3,75	3,75
6	Perfil L acero	15x15x1,5	1,00	2,80	2,80
TOTAL					48,70

El presupuesto unitario en cuanto a materiales asciende a **48.70 €**.

2.2.- Elementos comerciales

Incluidos en este apartado todos los componentes electrónicos, sistemas de transmisión y guiado, tornillería y otros componentes fabricados externamente.

ELEMENTOS COMERCIALES					
Nº	Tipo	Denominación	Cantidad	Precio/ud (€)	Precio total (€)
1	Guía lineal motorizada	AK208-R	2	60,22	120,44
2	Tornillo trapezoidal	tipo KKA – material C45 1.0503 (T10x2)	2	15,99	31,98
3	Placa aluminio rectificada	ISO 6753-1 - 315x250x32 mm	1	377,73	377,73
4	Varilla lisa acero	Createc 306	9	2,75	24,75
5	Polea dentada	GT2 20 dientes	2	3,63	7,26
6	Correa dentada	GT2 6mm	1	3,30	3,30
7	Pata plástico negra	H14 Ø35mm	5	0,06	0,30
8	Rodamiento lineal	LM8UU 24 mm	6	0,75	4,50
9	Rodamiento lineal	LM8UU 45 mm	3	2,50	7,50
10	Motor paso a paso	Nema MS23HA8P4150-E	1	40,54	40,54
11	Motor paso a paso	LMS172-T6503	1	97,53	97,53
12	Motor paso a paso	Nema MS14HA3P4032	1	33,52	33,52
13	Encoder incremental	ENC-7741 Inc Encoder, NEMA 17-23	2	64,00	128,00
14	Encoder incremental	E4T Differential OEM miniature, NEMA 14	1	52,00	52,00
15	Contador digital	Texas Instruments CD74HC192E	1	1,25	1,25
16	Sensor de detección difusa	FOT.PNP NO/NCM18 XUB0APSNM12	4	38,82	155,28
17	Placa electrónica control	ARDUINO UNO Rev3	1	26,78	26,78
18	Módulo de control CNC	Shield V3	1	3,00	3,00
19	Sensor de fuerza resistivo	Sparfunk SPRK-SEN-09375	10	7,38	73,80
20	Tubo organizador de cables	STEREN, 1,5 m x 20 mm	1	5,99	5,99
21	Sonda de disparo por contacto	TP20 A-1371-0270	1	895,00	895,00
22	Palpador por contacto	Rubí M2 Ø0,7mm A-5000-7801	1	81,00	81,00
23	Tornillo cabeza hexagonal	DIN 24017 - 24018	6	0,80	4,80
24	Tuerca hexagonal	ISO 4032-4034	36	0,12	4,32
25	Tornillo cabeza ranurada	DIN EN ISO 1207	74	0,83	61,42
26	Tornillo avellanado cabeza ranurada	DIN EN ISO 2009	7	0,52	3,64
27	Rodamiento de agujas	DIN 5405 K5x8x8	1	0,81	0,81
28	Rodamiento de bolas	DIN 628 7200B	1	4,40	4,40
29	Cableado	1,5 mm sin halógenos	10	0,28	2,80
30	Interruptor marcha paro	KLD-28A 45x22 mm	1	16,00	16,00
TOTAL					2269,64

El presupuesto unitario en cuanto a elementos comerciales asciende a **2269.64** €.

2.3.- Mano de obra

Se incluyen todos los salarios de los trabajadores que desempeñan tareas en el proyecto. Los salarios empleados corresponden a información directa sobre el sueldo medio por hora de un empleado de las mismas características y cualificación. En caso de no encontrar dicha información se ha estimado el sueldo respecto a cargos similares.

Se ha diferenciado entre dos secciones:

MANO DE OBRA - DISEÑO				
Nº	Tipo	Cantidad (h)	Precio unitario (€/hora)	Precio total
1	Ingeniero diseño maquinaria	375	16,00	6000,00
			TOTAL	6000,00

MANO DE OBRA - FABRICACIÓN Y MONTAJE				
Nº	Tipo	Cantidad (h)	Precio unitario (€/hora)	Precio total
1	Operario fabricación	160	9,12	1459,20
2	Operario montaje	120	9,12	1094,40
			TOTAL	2553,60

MANO DE OBRA - TOTAL		
Nº	Tipo	Precio total
1	Diseño	6000,00
2	Fabricación y montaje	2553,60
TOTAL (50 Unidades)		8553,60

El coste total **para el lote de producción completo** de la mano de obra asciende a **8553.60 €**.

2.4.- Presupuesto final

Con todos estos datos se ha elaborado el presupuesto final. Reseñar que el valor obtenido en el apartado "Mano de obra" se ha dividido entre el lote de producción esperado para aplicar los costes indirectos correspondientes.

PRESUPUESTO TOTAL		
Nº	Categoría	Precio total (€)
1	Piezas a fabricar. Materiales	48,70
2	Elementos comerciales	2269,64
3	Mano de obra (unitario)	171,07
4	Otros gastos (15%)	373,41
TOTAL		2862,83

El presupuesto final del proyecto asciende a **2862.83 €**.

PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

1.- Objeto

El pliego de condiciones técnicas recoge todos los aspectos legales referentes al proyecto, la normativa aplicable según la tipología del producto y las diferentes disposiciones de carácter general. También se incluyen las condiciones técnicas en las que se realiza el proyecto y las de los materiales empleados en su diseño y fabricación.

En el mismo se indican y depuran todas las responsabilidades que contraen tanto el fabricante como los distintos entes relativos al proyecto: proveedores, clientes, intermediarios y personas físicas o jurídicas que intervienen en el proyecto, ya sea directamente o indirectamente. Este apartado establece todos los términos legales en caso de cualquier disputa surgida de posibles no conformidades referentes a cualquier aspecto del proyecto.

Junto al pliego de condiciones se incluyen los planos en los documentos con carácter contractual, siendo el conjunto de éstos el principal documento legal en cuanto a características de los materiales, acabados y procesos de fabricación y montaje necesarios para el correcto funcionamiento de la máquina.

2.- Condiciones generales y legales

2.1.- Mercado CE

Se garantiza mediante el pliego de condiciones la seguridad tanto de los clientes y usuarios de la máquina como de los trabajadores que la fabricarán, teniendo siempre en cuenta la Directiva de Máquinas, la cual integra las directrices de diseño, fabricación y montaje de productos de este tipo con carácter general; cualquier otro aspecto no incluido en dicha Directiva se regulará mediante normas específicas atendiendo a la tipología del producto y sus características.

El logotipo del mercado CE asegura que cualquier máquina fabricada en la Unión Europea ha pasado una serie de controles de calidad específicos de su campo y que, por tanto, además de cumplir los requisitos de seguridad, ningún país puede prohibir su libre circulación, distribución y puesta en el mercado por los países pertenecientes a la Unión.

2.2.- Normativa aplicable

La certificación de las prestaciones metrológicas de las máquinas de medición por coordenadas está regulada por normativas internacionales que garantizan

a los usuarios la conformidad del producto adquirido con los estándares definidos por las comisiones de reglamentación en las que participan fabricantes, usuarios y autoridades de certificación.

En los últimos años la ISO 10360 ha sido el estándar más importante, con una mayor difusión. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es una federación mundial de organismos de estandarización nacionales. Los Estándares Internacionales los redactan comités técnicos.

La ISO 10360 regula las pruebas de aceptación y la verificación de las prestaciones de las máquinas de medición por coordenadas, conocidas como MMC.

El conjunto de las normas ISO 10360 define los criterios de aceptación y de reverificación de las máquinas de medición y las adoptan las autoridades nacionales europeas de estandarización.

Consta de varias partes, cada una se encarga de tests y pruebas específicas:

- Parte 1: Vocabulario.
- Parte 2: MMC para medir dimensiones lineares.
- Parte 3: MMC con cuatro ejes y mesa giratoria.
- Parte 4: MMC con funciones de medición por digitalización.
- Parte 5: MMC con sistemas de toma de datos con múltiples puntas.

Además de este conjunto de normas específicas acerca de las máquinas de medición por coordenadas, también se ha tenido en cuenta las siguientes normas en cuanto a seguridad general de máquinas:

- UNE-EN 13861:2011 - Seguridad de las máquinas. Guía para la aplicación de las normas sobre ergonomía al diseño de máquinas.
- UNE-EN ISO 12100:2012 - Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.
- Directiva de Seguridad de Máquinas 2006/42/CE
- UNE-EN 954-1 - Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño.
- UNE-EN 981 - Seguridad de las máquinas. Sistema de señales de peligro y de información auditivas y visuales.
- Directiva de Baja Tensión 2006/95/CE.
- Certificación de calidad ISO 9001.
- Certificación ISO 14001 sobre el sistema de gestión medioambiental.
- Ley 31/1995 del 8 de noviembre, prevención de riesgos laborales.
- Real Decreto 1338/1984 del 4 de julio, medidas de seguridad en entidades y emplazamientos públicos y privados.

Para una correcta realización del proyecto se debe consultar la última versión de las normas y directivas citadas. En caso de discrepancia o contradicción entre normas se aplicará la más restrictiva y actualizada.

Podrá ser de aplicación cualquier norma internacional que se haya pactado previamente entre el fabricante y cualquier ente interesado relativo al proyecto.

2.3.- Garantías

2.3.1.- Garantía global de la máquina

El fabricante se compromete al correcto funcionamiento de la máquina ofreciendo 1 año de garantía a contar desde el momento de puesta en marcha de la misma. Para el cálculo se utiliza un año laboral convencional.

En caso de cualquier desperfecto o fallo en el funcionamiento de la máquina producido por un defecto de fábrica, siempre que sea durante el año de garantía, los costes del mantenimiento y/o sustitución de la máquina correrán a cargo del fabricante, incluyendo gastos de transporte, mano de obra u otros aspectos necesarios para garantizar la solución del problema causado.

Si se producen fallos debidos a defectos en el diseño del producto, el fabricante se responsabiliza de los costes relacionados con el rediseño y los cambios en los procesos de fabricación.

Las modificaciones propuestas por el proveedor no podrán instalarse en la máquina a no ser que haya una aceptación por parte del cliente y exista un compromiso de prolongación de la garantía de los componentes afectados de 6 meses.

Si con las modificaciones los objetivos en cuanto a prestaciones no son adecuados respecto a las previsiones, el proveedor asume los costes ocasionados al cliente.

El proveedor se compromete a dar asistencia técnica a la hora de la instalación de la máquina definiendo un coste suplementario en la oferta, nunca incluyéndolo en el precio inicial. Dicha asistencia técnica se deberá realizar por profesionales suficientemente cualificados para tales tareas, ya sea personal de la empresa o empleados subcontratados a terceros.

El fin de la garantía se encuentra sujeto a la llegada del final de la garantía contractual o al compromiso del proveedor en el caso de que la garantía haya sido prolongada debido a cualquier desperfecto mencionado anteriormente.

2.3.2.- Garantía específica de elementos comerciales

La garantía de este tipo de elementos será la que proporcione el proveedor de estos; siempre igual o superior a 2 años desde el momento de recepción de la

máquina. Si el cálculo erróneo de los elementos comerciales propicia su degradación o rotura durante la garantía, el proveedor deberá asumir los costes relativos a los desperfectos causados al cliente.

2.4.- Control de calidad

El fabricante se compromete a realizar los controles de calidad pertinentes tanto a los componentes por separado como a los conjuntos ya ensamblados. Será responsabilidad del fabricante la asunción de costes derivados de un mal funcionamiento debido a una calidad de los componentes inferior a la estipulada.

En todo momento se deberá contar con el certificado de calidad pertinente de los componentes comerciales, cuya responsabilidad recae en el fabricante.

Las piezas deberán pasar un control dimensional para asegurar su correcta fabricación, y tanto las piezas como los conjuntos hasta la máquina completa se someterán a las pruebas correspondientes que aseguren el funcionamiento adecuado. Dichas pruebas serán realizadas por el fabricante.

2.5.- Interpretación de documentos

Todos los documentos que integran el proyecto deben ser perfectamente entendibles para cualquier profesional cualificado que esté relacionado con el proyecto y que necesite de estos documentos para realizar su labor. Junto con la máquina, los elementos que deberán estar presentes son:

- Plano de conjunto de la máquina en el que se definan sus diferentes partes, denominación, cantidad y posición en el ensamblaje.
- Planos de subconjuntos con información similar al plano general, relativa a los componentes que formen dicho subensamblaje.
- Planos de despiece de las piezas de diseño propio y que, por tanto, se hayan fabricado de forma independiente por parte del proveedor. La acotación de estos planos debe ser adecuada y suficiente para que las piezas puedan ser correctamente entendidas y dimensionadas por parte del encargado de fabricación.
- Listado de referencias de los elementos comerciales empleados, con su nombre comercial, cantidad y posición en el ensamblaje.
- Esquemas neumáticos y eléctricos, en el caso de estar presentes elementos de este tipo en la máquina.
- Certificado de conformidad CE acorde con la legislación vigente.
- Manual de funcionamiento de la máquina junto con el plan de mantenimiento preventivo, instrucciones de manipulación y desmontaje del utillaje.

- Precauciones y medidas de seguridad a adoptar para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina.

2.6.- Uso de la máquina

El usuario tiene derecho a reclamar toda la información referente al funcionamiento de la máquina en condiciones normales y seguras. El usuario es responsable de los daños causados por un uso incorrecto o no reflejado en el manual de instrucciones.

3.- Pliego de condiciones

3.1.- Niveles de producción y capacidad

La máquina será capaz de funcionar durante un año laboral natural (8 horas diarias, 260 días al año), en condiciones adecuadas de trabajo y con el correcto mantenimiento y las revisiones periódicas realizadas. Se recomienda, sin embargo, apagar la máquina durante 10 minutos en casos de uso intensivo, considerando éste 2 horas en funcionamiento continuado.

La función de la máquina es realizar mediciones dimensionales de piezas mediante la extracción de coordenadas de los puntos palpados y el postprocesado de los datos obtenidos.

3.2.- Puesto de trabajo y seguridad

La zona donde se ubicará la máquina para el uso por parte del trabajador/alumno deberá cumplir con los estándares de seguridad y ergonomía mencionados previamente.

Se señalarán los posibles peligros y riesgos de uso de forma claramente visible y entendible por todos los trabajadores o personas que en algún momento intervengan en el funcionamiento, puesta en marcha o mantenimiento de la máquina, empleando medios visuales, auditivos, etc. según sea necesario. Los elementos de seguridad de la máquina serán normalizados y homologados para tal uso. Las señales y los mandos deben ser claros y en ningún momento presentar información ambigua o interpretable.

Las zonas internas de la máquina o que contengan elementos peligrosos para la salud del trabajador deben ser inaccesibles a menos que sea necesaria su manipulación, desconectando la máquina previamente.

El proveedor se compromete a incluir toda la información pertinente acerca de seguridad y posibles malos usos de la máquina, y cómo solucionarlos en caso de producirse.

3.3.- Materiales

3.3.1.- Componentes fabricados

El material de cada una de las piezas de diseño propio debe quedar especificado en su correspondiente plano de despiece. Junto con la pieza se incluirá un certificado de calidad y de procedencia de dicho material, emitido por el proveedor. Los procesos de fabricación de cada pieza vendrán indicados en la memoria descriptiva de la máquina, o en su defecto, acompañarán a la información acerca del material en los planos.

3.3.2.- Componentes comerciales

Todos los materiales con los que esté fabricado cualquier componente comercial deben estar certificados y acordes con lo que el proveedor indique en la hoja de datos técnicos del elemento. En caso de detectarse que alguna pieza o material del componente no cumpla con los certificados de calidad, es responsabilidad del proveedor sustituir la pieza defectuosa o el elemento comercial completo.

Se deberá informar del proceso adecuado para el reciclaje del componente comercial al final de su vida útil. La responsabilidad de dicho reciclaje recae en el cliente final.

3.3.3.- Utillajes

Se utilizarán en todo momento utillajes resistentes a posibles condiciones adversas derivadas del uso de la máquina, ya sea resistencia térmica, eléctrica, mecánica, u otras características que sean pertinentes.

Se dará preferencia al uso de utillajes comerciales ya certificados, siempre teniendo a mano el certificado de calidad de este. En caso de diseño propio de utillajes, el fabricante deberá responsabilizarse de los controles de calidad necesarios.

El proveedor de los utillajes se responsabilizará del correcto funcionamiento. En caso de desperfectos producidos en la máquina causados por defectos en los utillajes, los costes de reparación correrán a cuenta del fabricante del utillaje.

3.4.- Montaje y puesta en marcha

Los procesos de ensamblaje tanto de elementos comerciales como de piezas de diseño propio se especificarán de manera inequívoca para el correcto montaje de la máquina. Estos procesos vendrán detallados en la memoria descriptiva del producto.

Los procesos de soldadura se deberán realizar cumpliendo las normas de seguridad correspondientes para evitar cualquier accidente que afecte al operario de fabricación. Se realizarán los controles pertinentes para comprobar la resistencia de la soldadura y garantizar el buen funcionamiento de las piezas unidas.

Las uniones atornilladas se materializarán siguiendo la normativa UNE 17-108-81: tornillos y tuercas de acero, momentos de apriete, para garantizar la precisión en la unión y evitar posibles desperfectos en las piezas atornilladas.

El montaje y puesta a punto que sea necesario realizar en el lugar de trabajo del cliente se hará únicamente por profesionales cualificados, siendo responsabilidad del fabricante de la máquina la selección del personal adecuado para desempeñar estas tareas. Cualquier defecto de instalación deberá ser reparado por el fabricante, asumiendo los costes.

Se establecerá un periodo de prueba de 1 semana para detectar cualquier posible fallo de uso antes de la entrega de la máquina al cliente. Se pondrá a disposición del cliente la formación necesaria para el correcto uso de la máquina.

3.5.- Mantenimiento

Se seguirán en todo momento las indicaciones del fabricante en cuanto a mantenimiento y reparación o sustitución de piezas. En caso de desperfectos derivados de ignorar las directrices o de realizar operaciones de mantenimiento no indicadas por el fabricante, se perderán automáticamente los beneficios de la garantía establecida y los costes de reparación correrán a cuenta del cliente.

Los elementos que requieran operaciones específicas de mantenimiento deberán ser fácilmente desmontables, y este mantenimiento se podrá realizar fuera de la máquina.

3.6.- Acabado e identificación de la pieza

Cada una de las máquinas deberá estar correctamente identificada mediante una placa o etiqueta colocada en alguno de los elementos estructurales, visible y protegida contra elementos agresivos que puedan hacer que esta información quede ilegible. Los datos necesarios serán los siguientes:

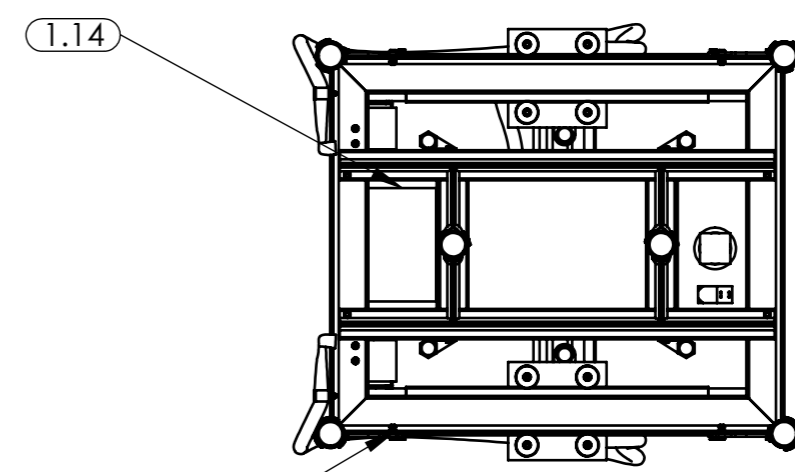
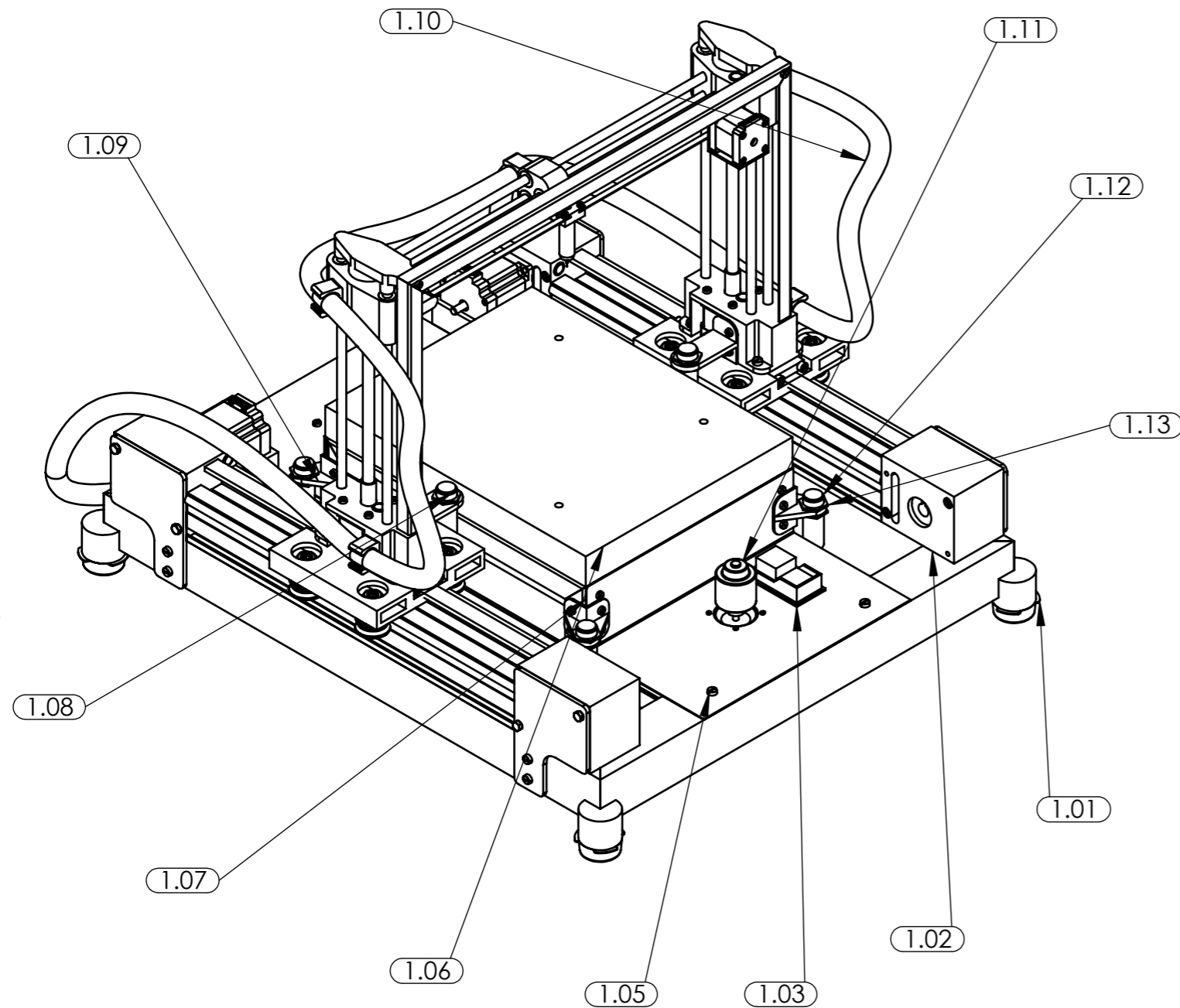
- Nombre, CIF, dirección y teléfono del fabricante
- Potencia de consumo de la máquina
- Nº o referencia del utillaje o máquina
- Fecha de fabricación
- Propietario del utillaje

PLANOS

El listado de planos se puede ver en la siguiente tabla:

Hoja n°	Denominación	Plano
1	Máquina medición por coordenadas	1.00
2	Subconjunto estructura base	1.01
3	Subconjunto pata	1.01.01
4	Bloque plástico pata	1.01.01.03
5	Estructura soporte	1.01.02
6	Sujeción portacables	1.01.03
7	Subconjunto guías X	1.02
8	Unión base-motor X	1.02.01A
9	Unión base-motor X	1.02.01B
10	Acoplamiento motorX-guía	1.02.02
11	Sujeción guías X	1.02.03
12	Subconjunto mesa	1.06
13	Soporte mesa planitud	1.06.01
14	Apoyo soporte mesa planitud	1.06.02
15	Carcasa delantera	1.07A
16	Carcasa delantera	1.07B
17	Subconjunto puente móvil	1.08
18	Subconjunto elevación	1.08.01
19	Acoplamiento tornillo-motorY	1.08.01.03
20	Sujeción motorY-guías-varilla	1.08.03A
21	Sujeción motorY-guías-varilla	1.08.03A
22	Subconjunto guía palpador	1.08.06
23	Soporte palpador	1.08.06.02
24	Eje polea no motriz	1.08.06.06
25	Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY	1.08.06.07A
26	Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY	1.08.06.07B
27	Sujeción portacables	1.08.06.11
28	Soporte superior husillo y varilla	1.08.07
29	Estructura rígida	1.08.11
30	Sujeción sensor difuso puente	1.08.12
31	Sujeción sensor difuso base	1.09

Los planos correspondientes se encuentran a continuación.

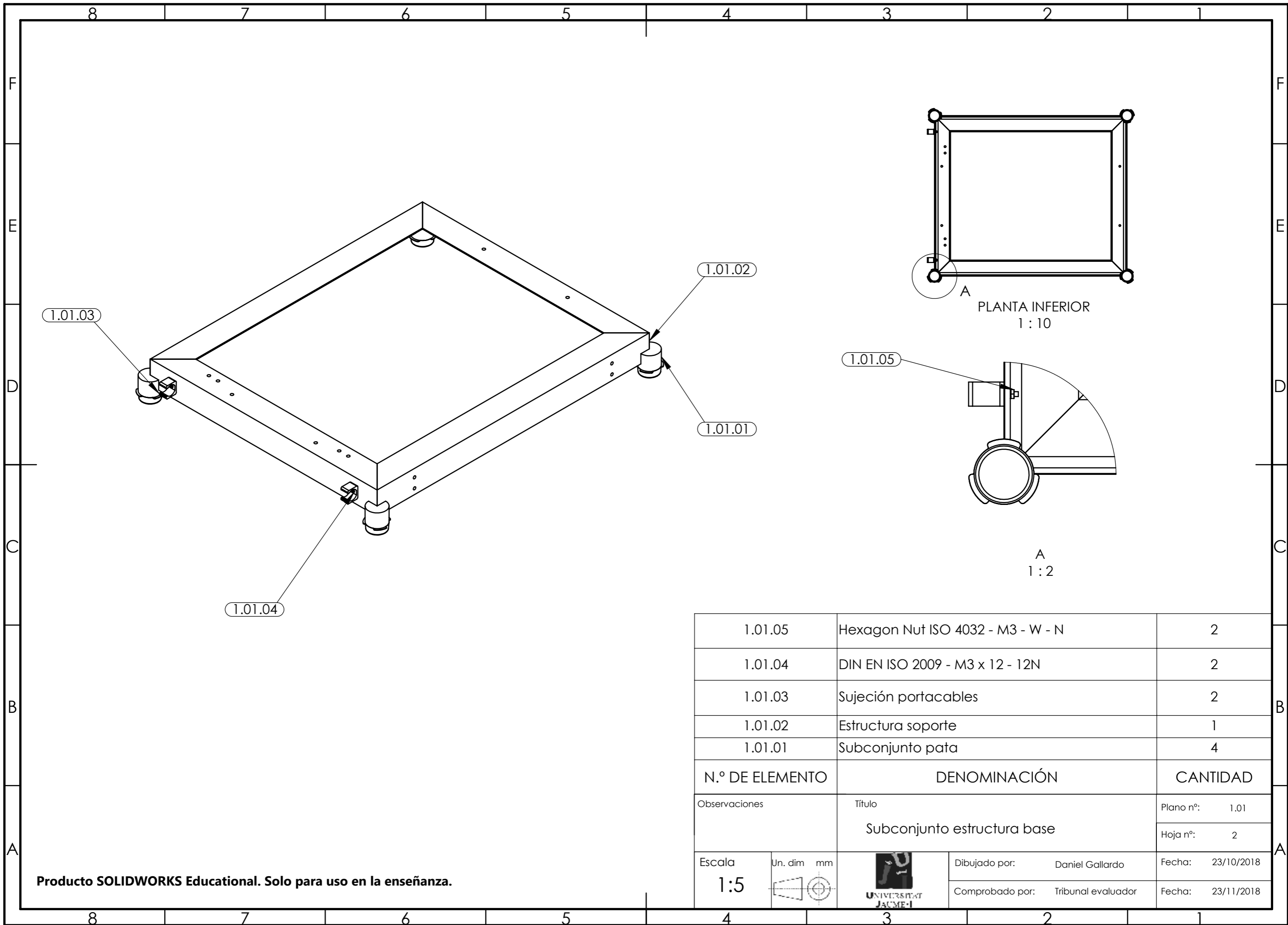


PLANTA INFERIOR
1 : 10

1.14	Componentes eléctricos	1
1.13	Tuerca sensor difuso	8
1.12	Sensor difuso PNP	4
1.11	Joystick	1
1.10	Sujetacables	2
1.09	Sujeción sensor difuso base	4
1.08	Subconjunto puente móvil	1
1.07	Carcasa delantera	2
1.06	Subconjunto mesa	1
1.05	DIN EN ISO 1207 - M4 x 5 - 5N	52
1.04	Hexagon Nut ISO 4032 - M4 - W - N	32
1.03	Interruptor marcha-paro KLD-28A	1
1.02	Subconjunto guías X	1
1.01	Subconjunto estructura base	1

N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título	Plano n.º: 1.00
	Máquina medición por coordenadas	Hoja n.º: 1
Escala	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
1:5		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

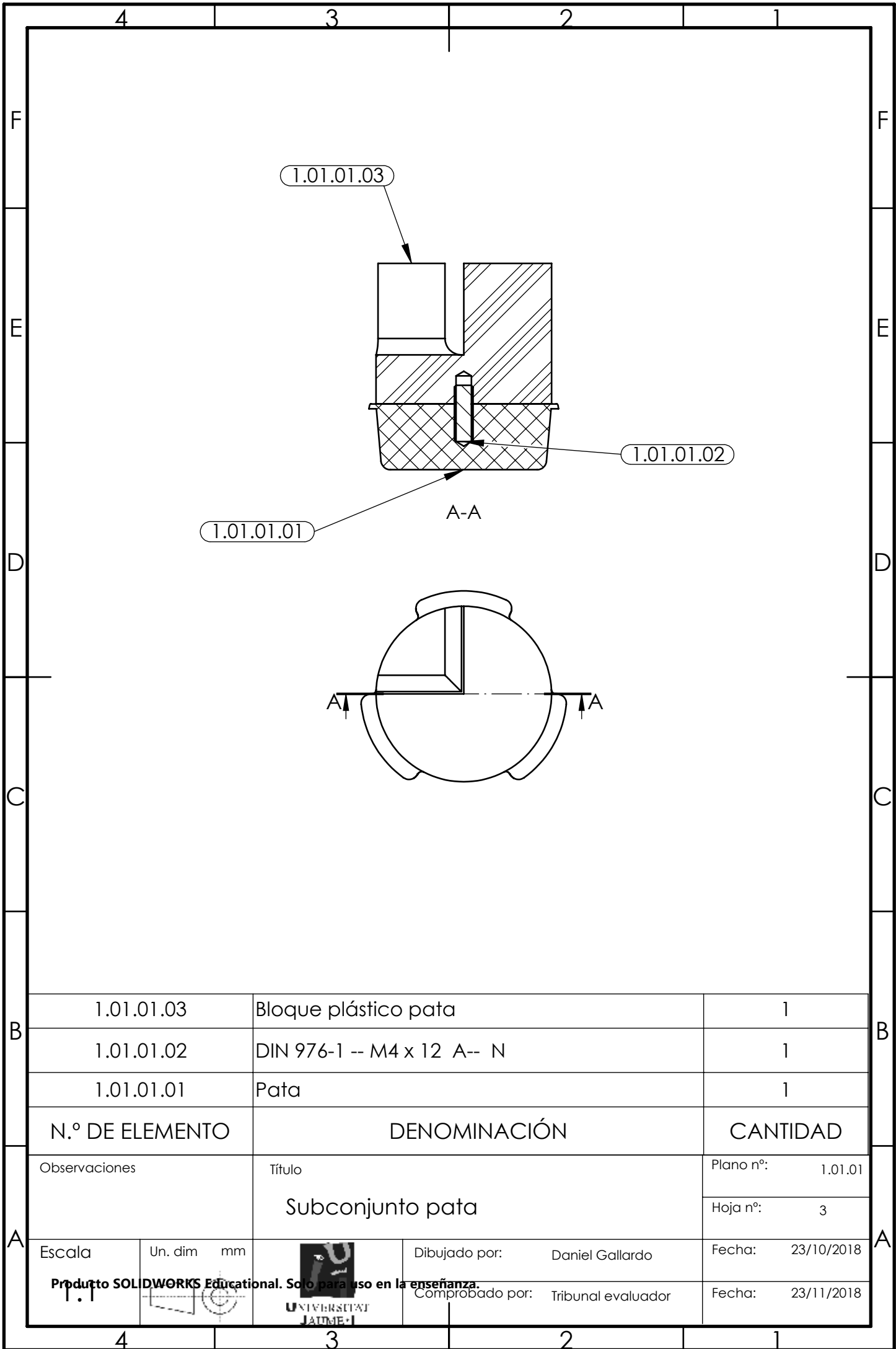
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



1.01.05	Hexagon Nut ISO 4032 - M3 - W - N	2
1.01.04	DIN EN ISO 2009 - M3 x 12 - 12N	2
1.01.03	Sujeción portacables	2
1.01.02	Estructura soporte	1
1.01.01	Subconjunto pata	4
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título Subconjunto estructura base	Plano nº: 1.01
		Hoja nº: 2
Escala 1:5	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

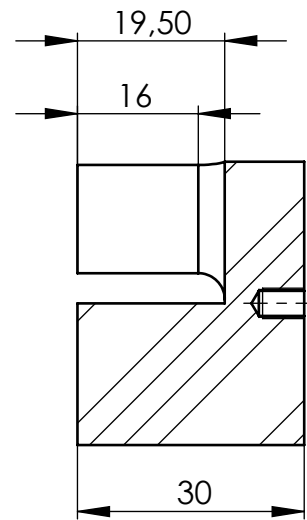
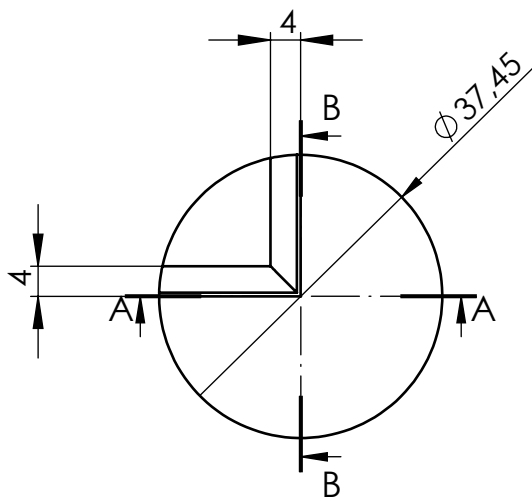
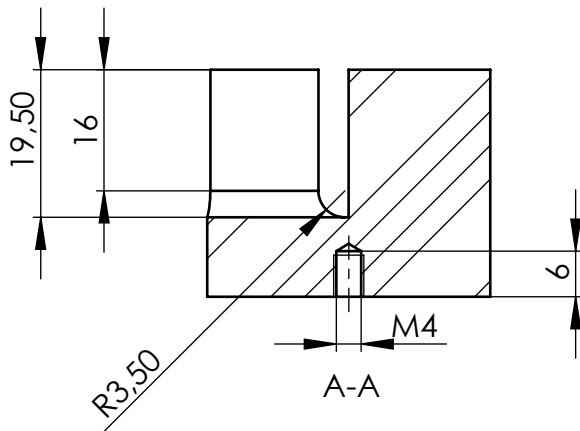
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.





1.01.01.03	Bloque plástico pata	1
1.01.01.02	DIN 976-1 -- M4 x 12 A-- N	1
1.01.01.01	Pata	1
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título Subconjunto pata	Plano nº: 1.01.01
		Hoja nº: 3
Escala	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo Fecha: 23/10/2018
		Comprobado por: Tribunal evaluador Fecha: 23/11/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



B-B

Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones

Material: PLA

Título

Bloque plástico pata

Plano nº: 1.01.01.03

Hoja nº: 4

Escala

Un. dim mm

Dibujado por:

Daniel Gallardo

Fecha: 23/10/2018

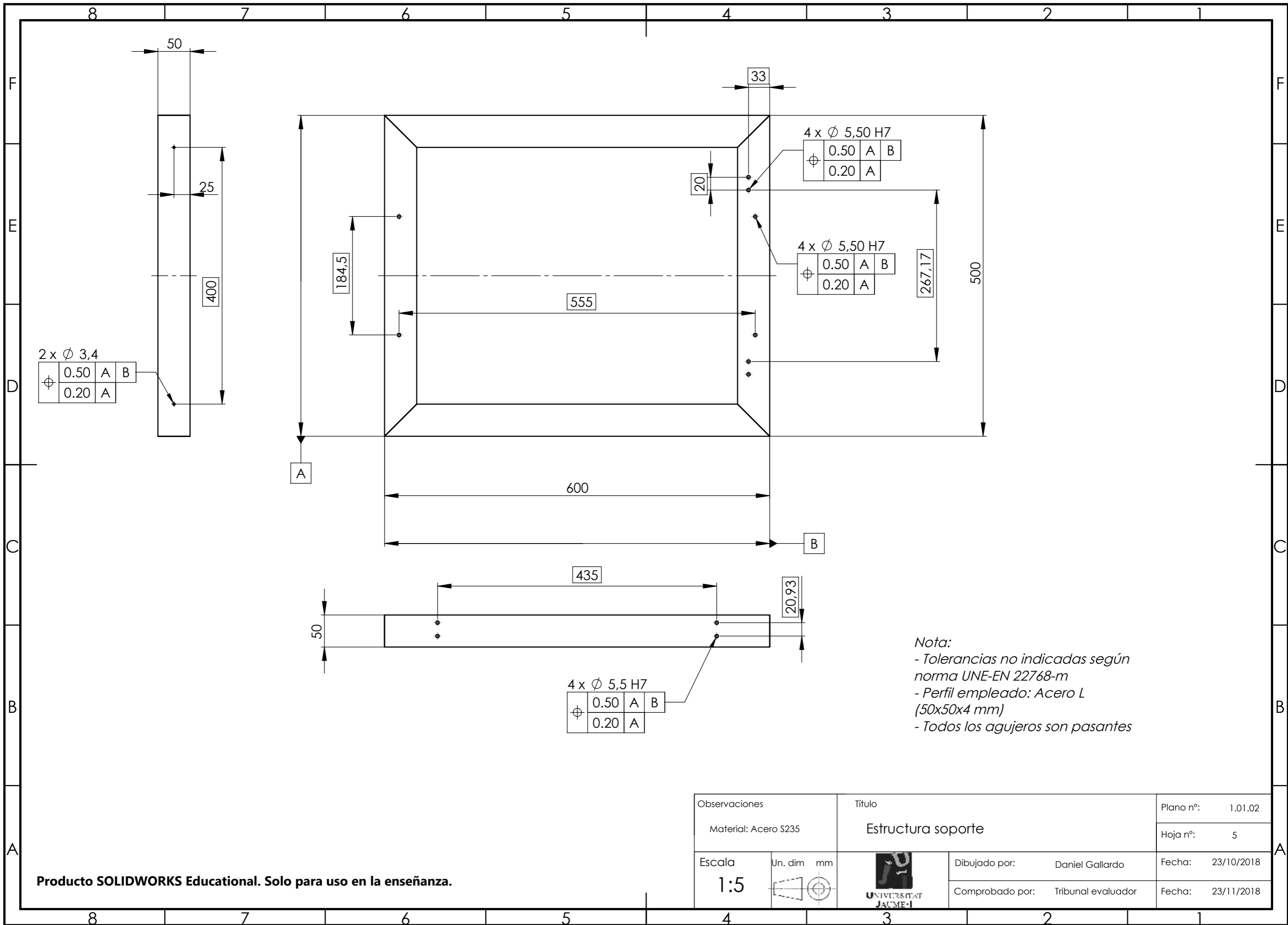
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Comprobado por:

Tribunal evaluador

Fecha: 23/11/2018





2 x \varnothing 3,4

\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

4 x \varnothing 5,50 H7

\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

4 x \varnothing 5,50 H7

\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

4 x \varnothing 5,5 H7

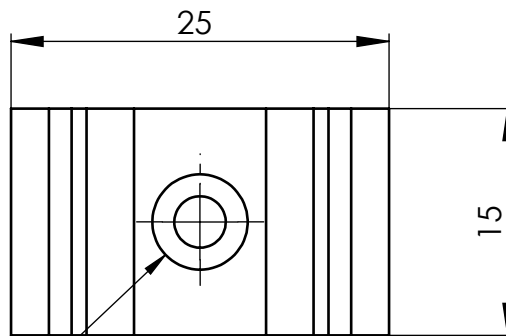
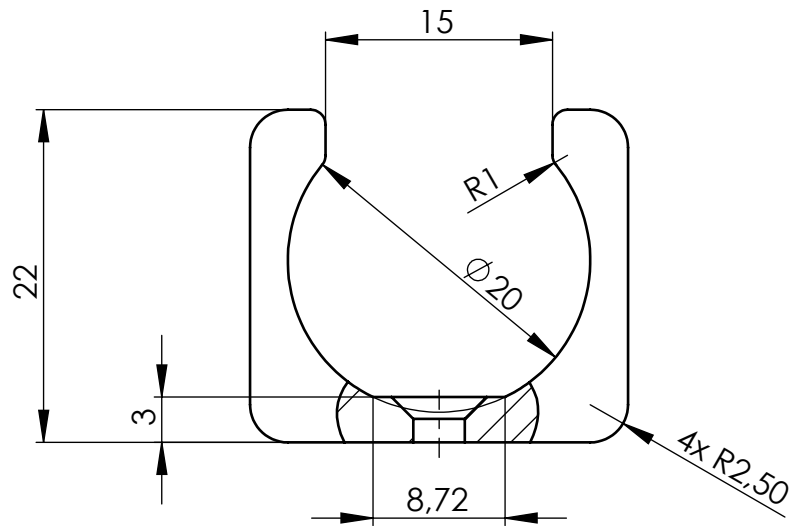
\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

Nota:
- Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m
- Perfil empleado: Acero L (50x50x4 mm)
- Todos los agujeros son pasantes

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.


Observaciones		Título		Plano nº:	1.01.02
Material: Acero S235		Estructura soporte		Hoja nº:	5
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
1:5			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					23/10/2018
					23/11/2018

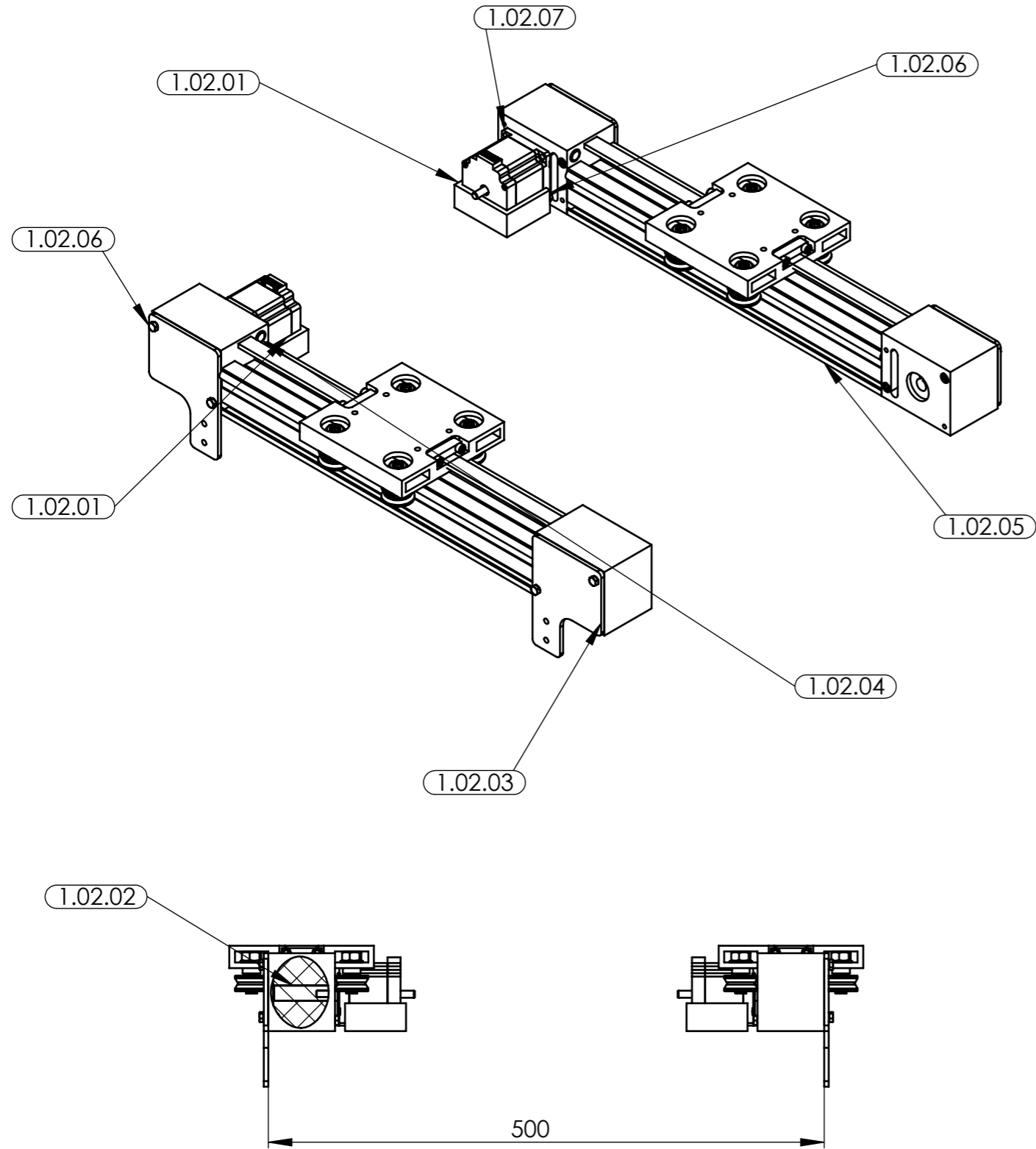




$\checkmark \varnothing 3,40 \text{ H7}$
 $\checkmark \varnothing 6,30 \text{ X } 90^\circ$

Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.01.03
Material: PLA		Sujeción portacables		Hoja nº:	6
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
2.1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					



1.02.07	Motor paso a paso MS23	2
1.02.06	DIN EN 24018 - M5 x 20-WN	12
1.02.05	Guía motorizada ak208r-12-400	2
1.02.04	Sensor de fuerza resistivo	4
1.02.03	Sujeción guías X	4
1.02.02	Acoplamiento motorX-guía	2
1.02.01	Unión base-motor X	2
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título Subconjunto guías X	Plano n°: 1.02
		Hoja n°: 7
Escala 1:5	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

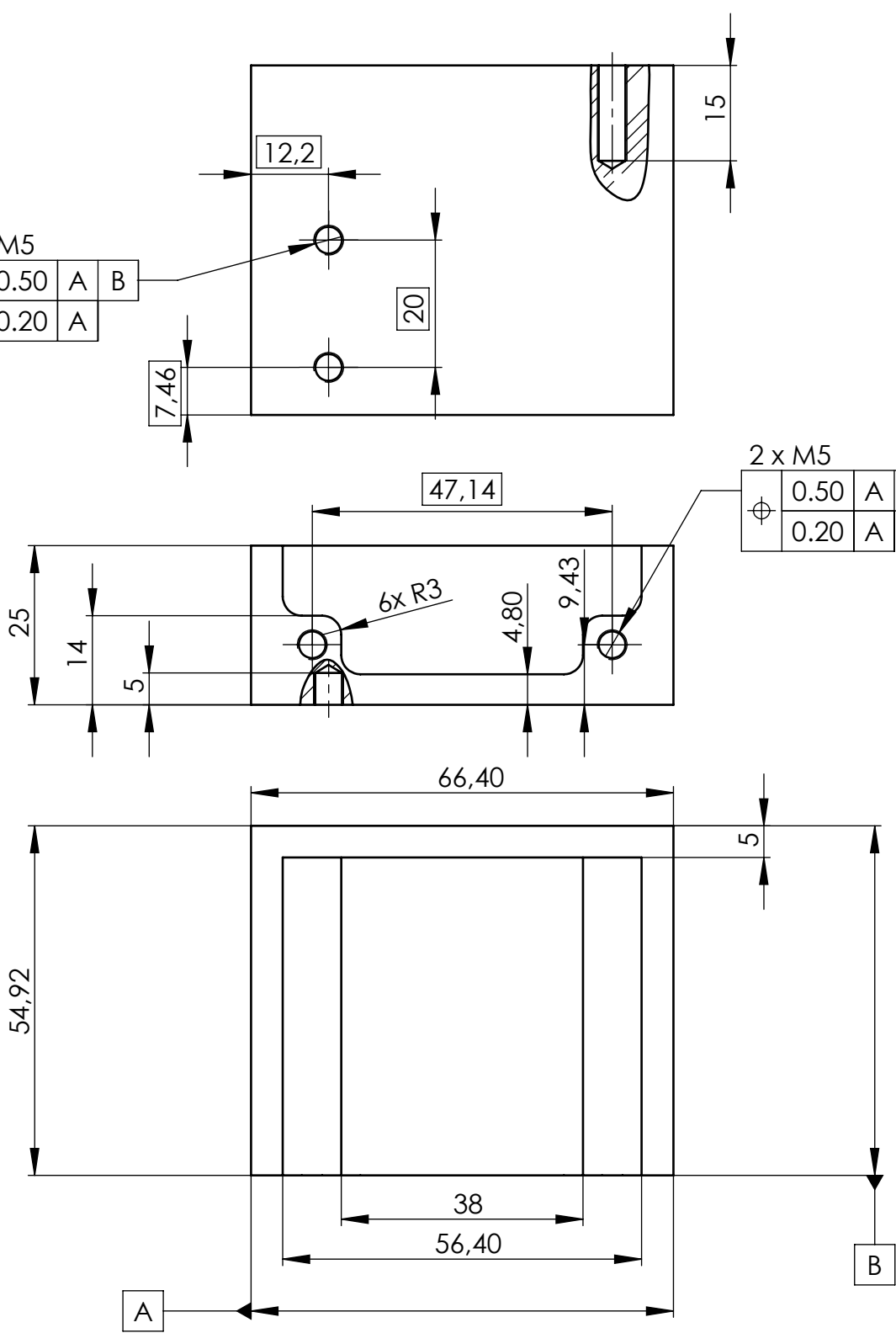


2 x M5


⌀	0.50	A	B
	0.20	A	

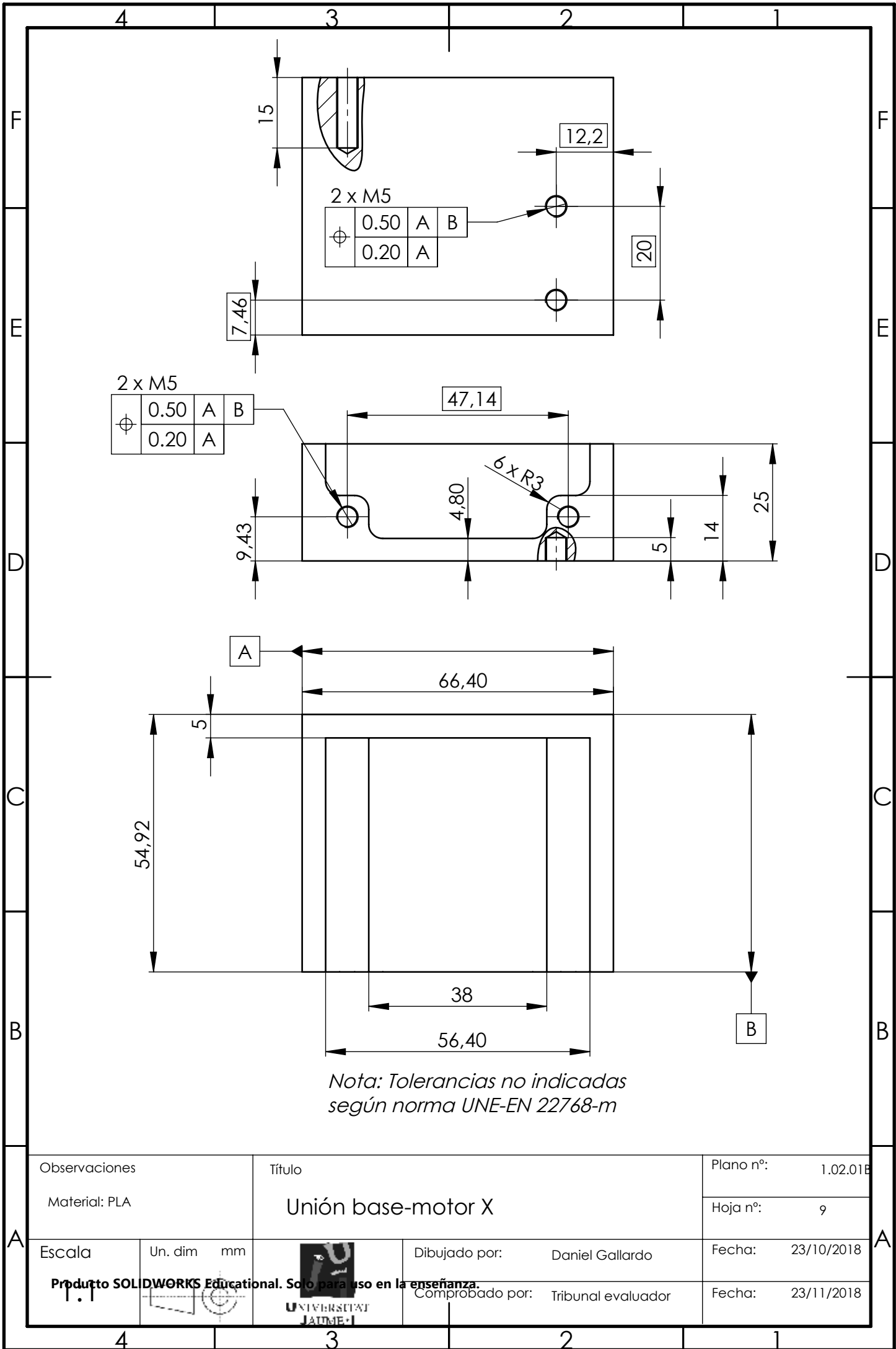
2 x M5

⌀	0.50	A	B
	0.20	A	




Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

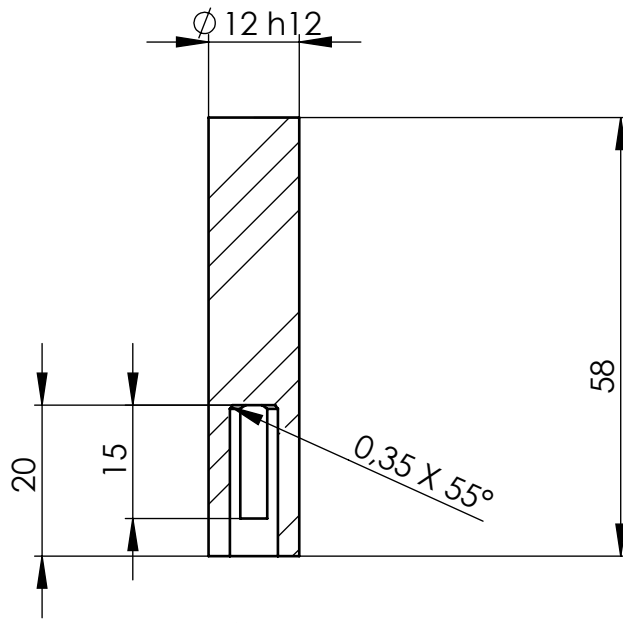
Observaciones	Material: PLA		Título	Unión base-motor X	Plano nº:	1.02.014
					Hoja nº:	8
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:	23/10/2018
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza. 			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:	23/11/2018



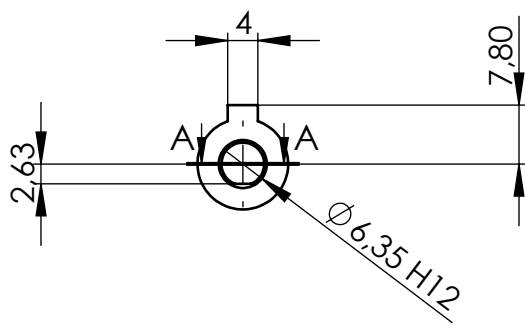
Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.02.01E	
Material: PLA		Unión base-motor X		Hoja nº:	9	
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:	23/10/2018
			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:	23/11/2018


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



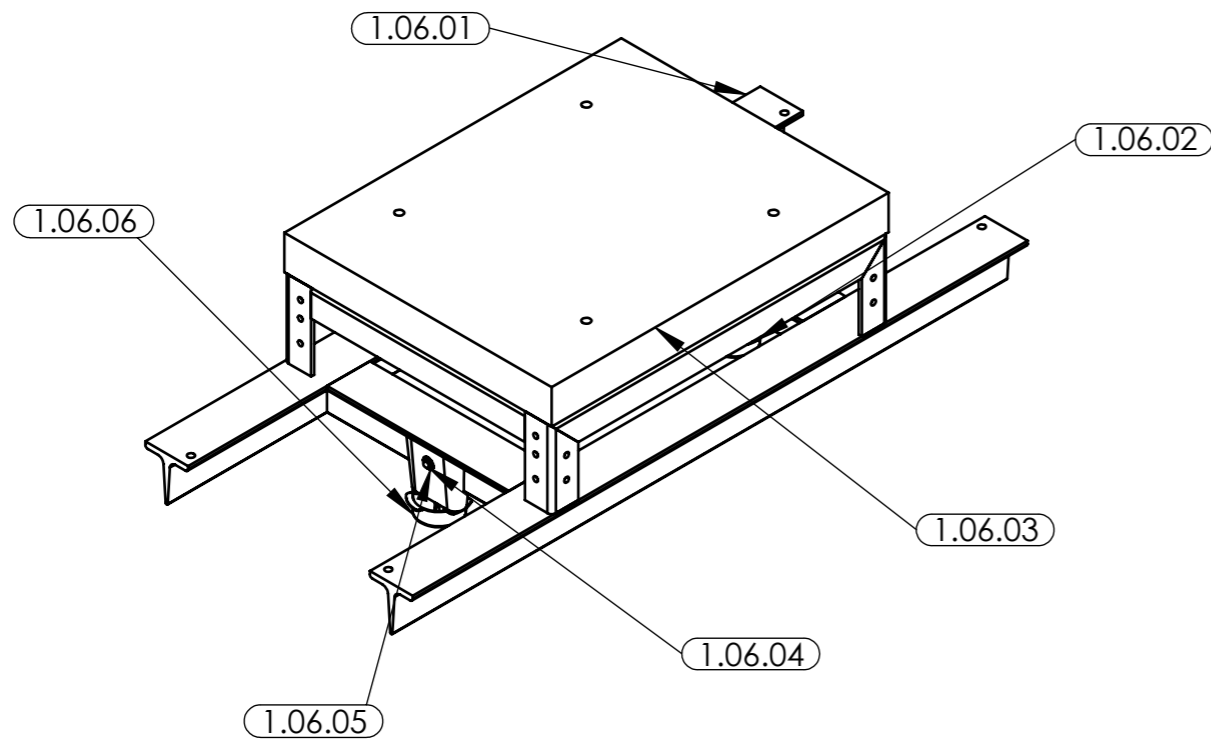
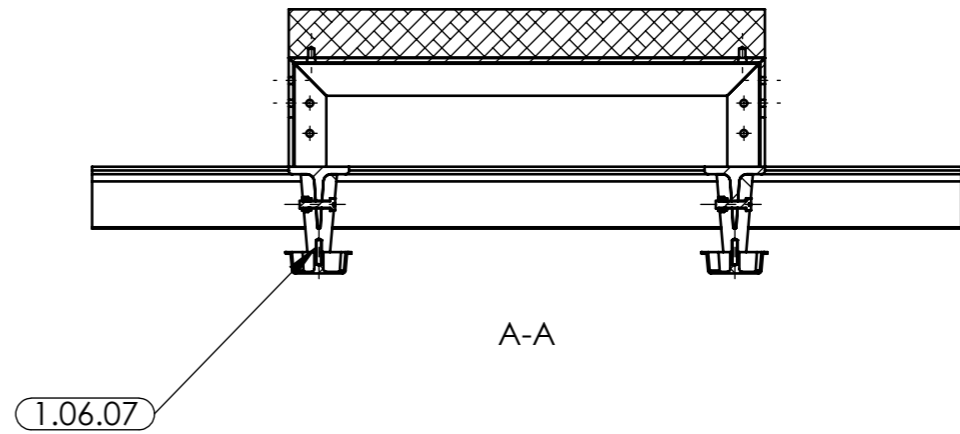
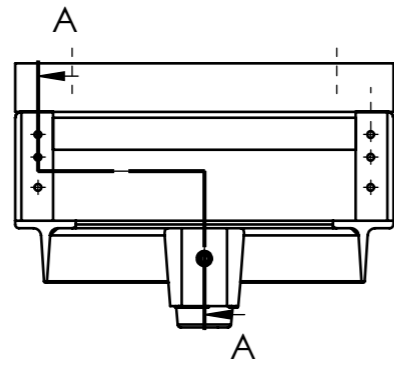
A-A



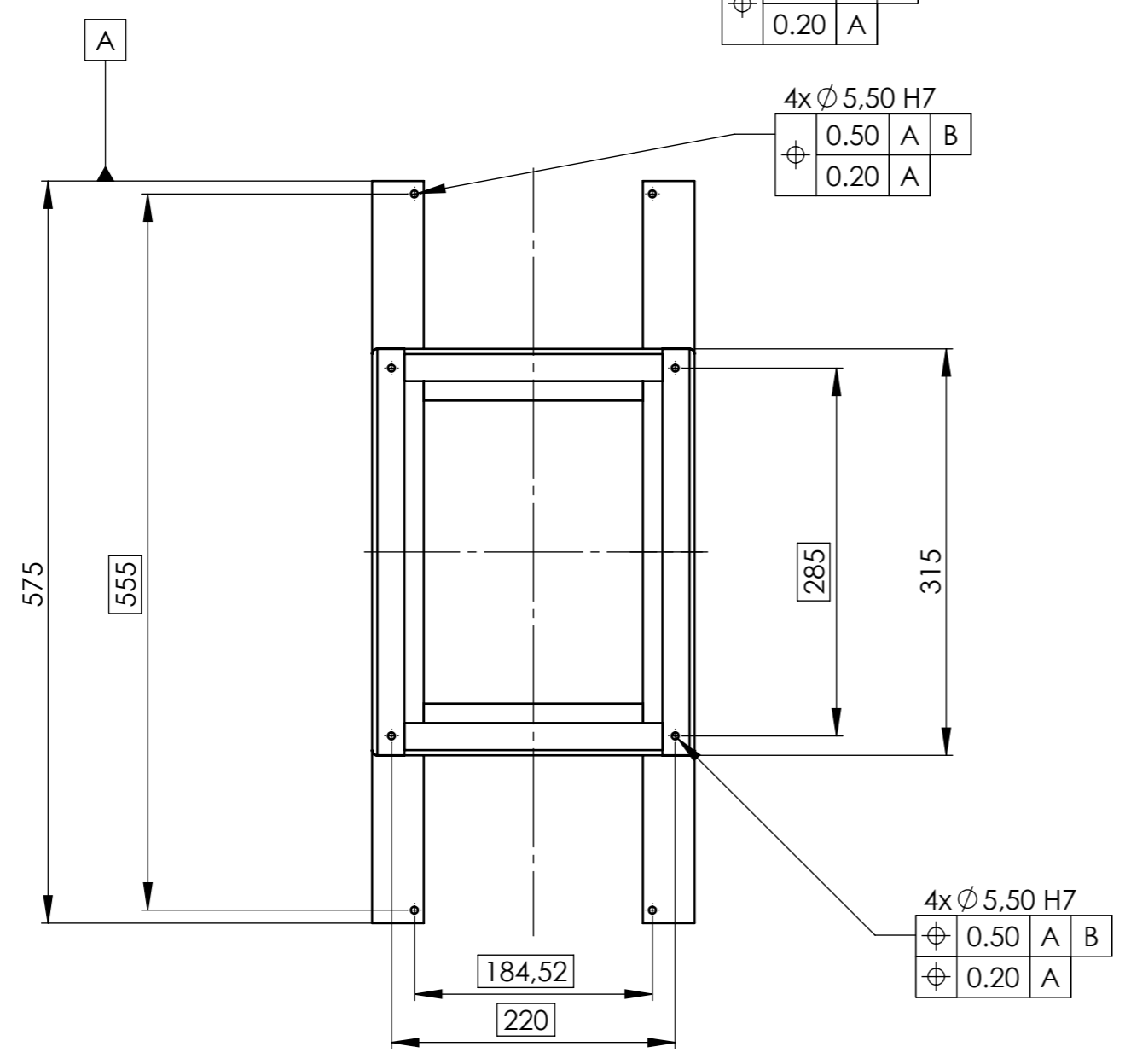
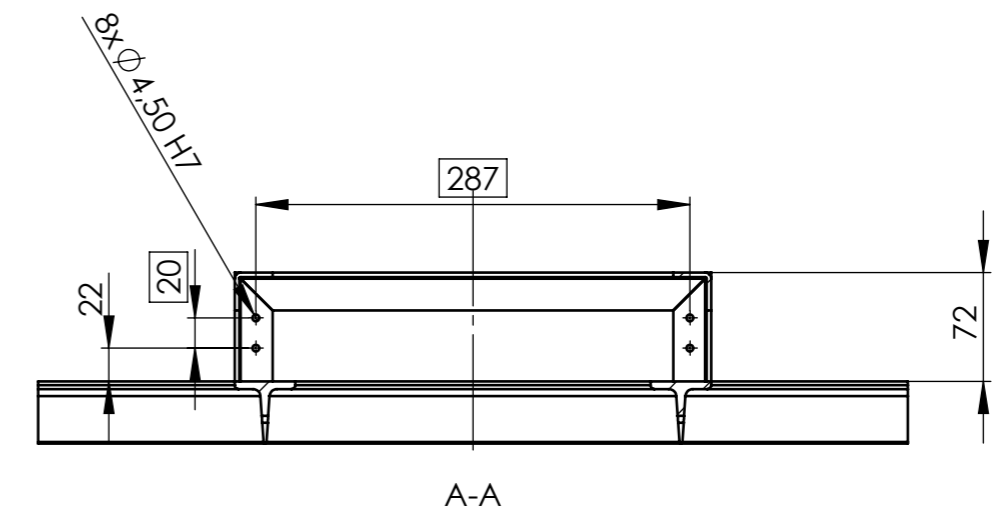
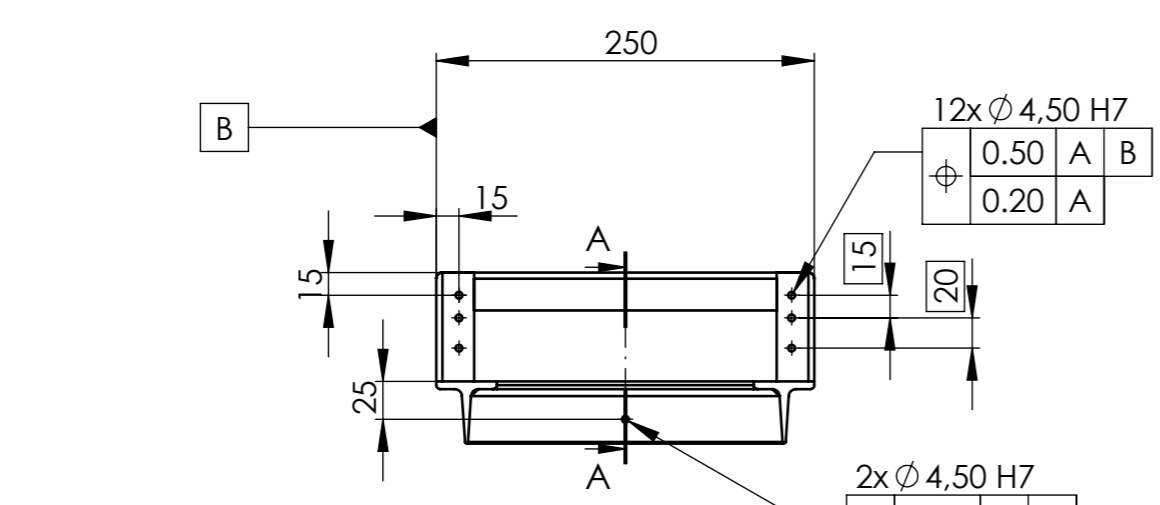
Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.02.02	
Material: PLA		Acoplamiento motorX-guía		Hoja nº:	10	
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:	23/10/2018
			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:	23/11/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



1.06.07	DIN 976-1 -- M4 x 16 A-- N	2
1.06.06	Pata	2
1.06.05	Hexagon Nut ISO 4034 - M5 - N	2
1.06.04	DIN EN ISO 1207 - M5 x 20 - 20N	2
1.06.03	Placa aluminio DIN876	1
1.06.02	Apoyo soporte mesa planitud	2
1.06.01	Soporte mesa planitud	1
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título Subconjunto mesa	Plano n.º: 1.06
		Hoja n.º: 12
Escala 1:5	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

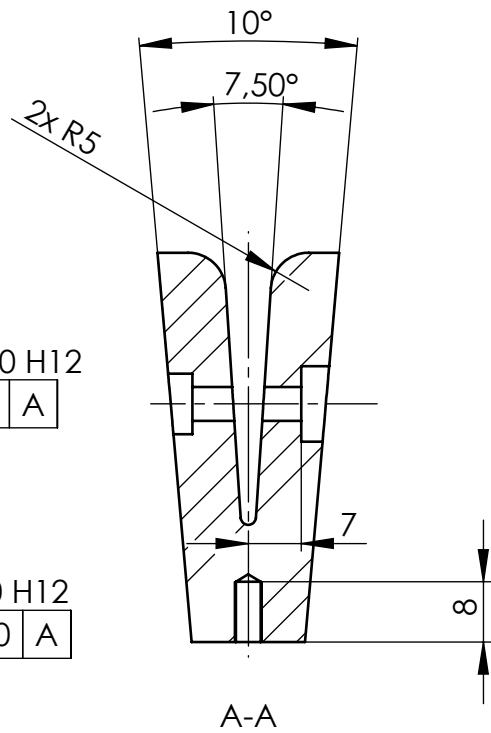
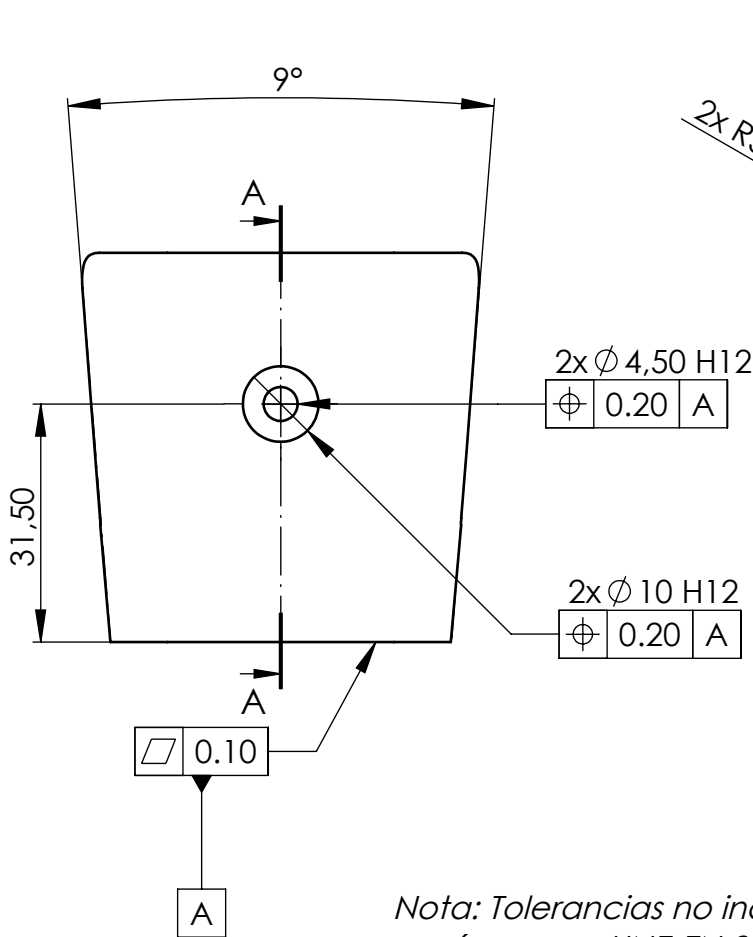
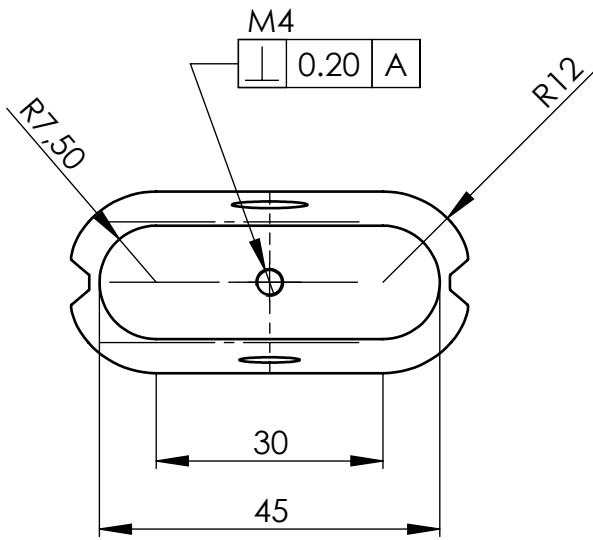


Nota:
 - Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m
 - Perfiles empleados: Acero L (25x25x3 mm) y acero T (40x5 mm)
 - Todos los agujeros son pasantes

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Observaciones	Título		Plano nº:	1.06.01
Material: Acero S235	Soporte mesa planitud		Hoja nº:	13
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo
1:5			Comprobado por:	Tribunal evaluador
			Fecha:	23/10/2018
			Fecha:	23/11/2018





Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones

Material: PLA

Título

Apoyo soporte mesa planitud

Plano nº: 1.06.02

Hoja nº: 14

Escala

Un. dim mm

Dibujado por:

Daniel Gallardo

Fecha: 23/10/2018

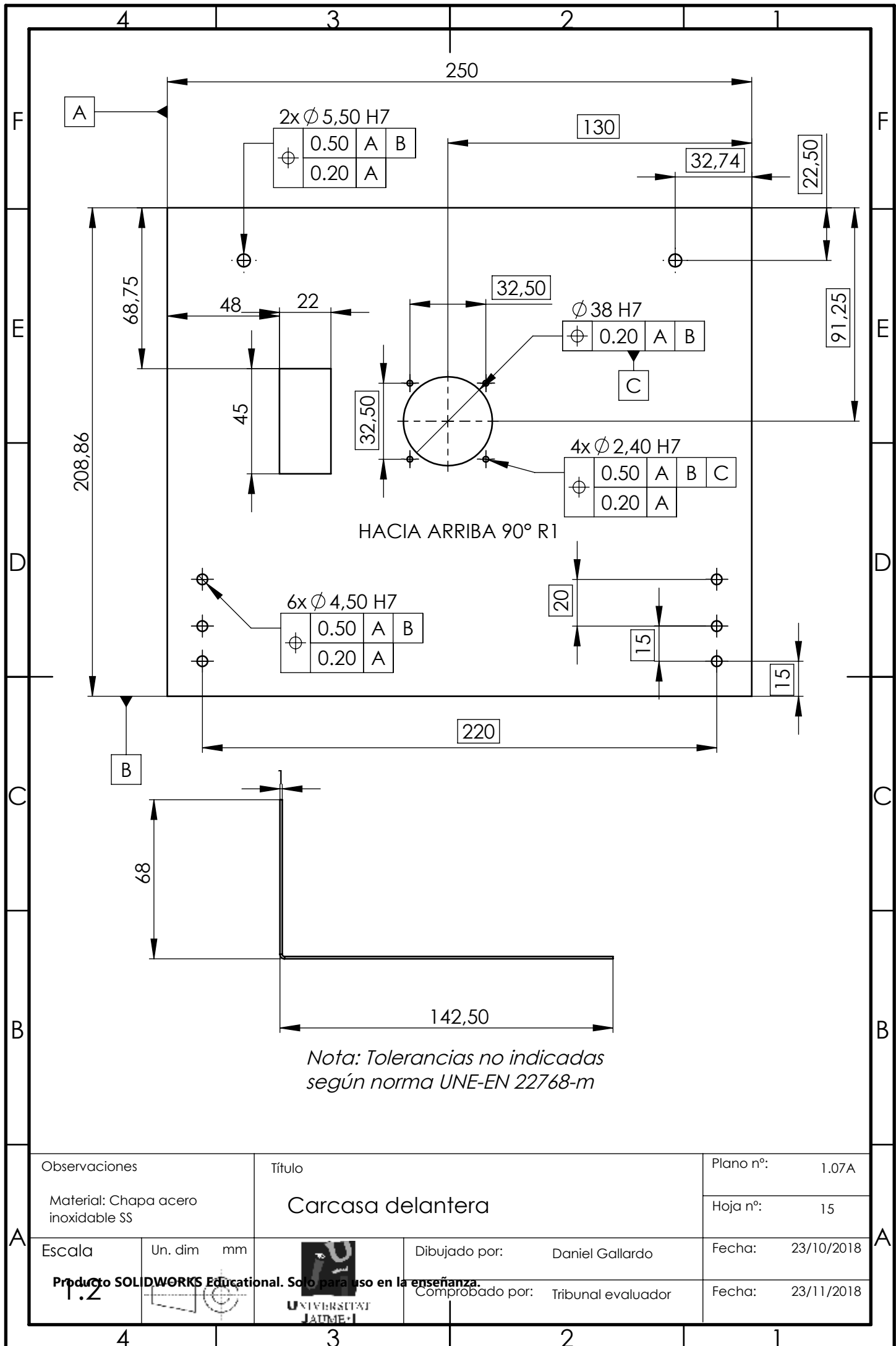
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Comprobado por:

Tribunal evaluador

Fecha: 23/11/2018





Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones

Material: Chapa acero inoxidable SS

Escala

Un. dim mm

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

1:2

Un. dim mm

Título

Carcasa delantera



Dibujado por:

Daniel Gallardo

Comprobado por:

Tribunal evaluador

Plano nº:

1.07A

Hoja nº:

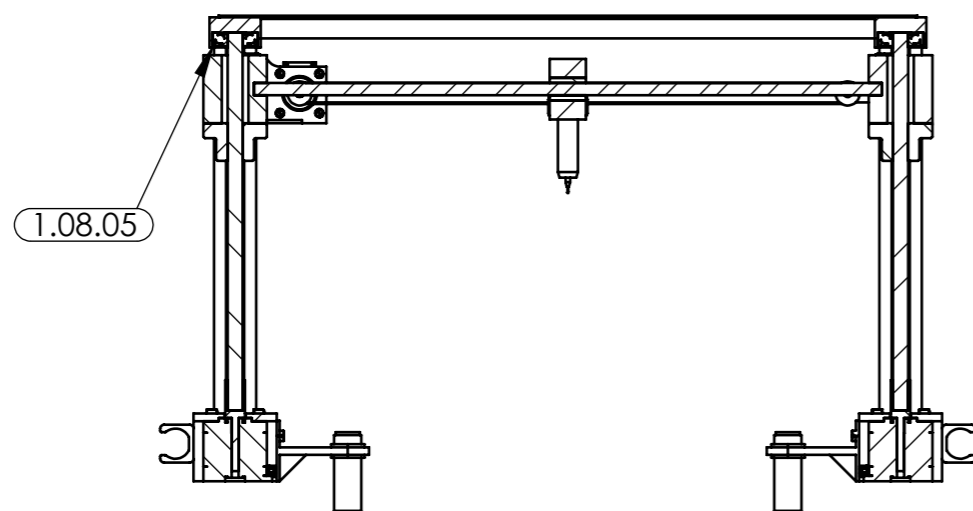
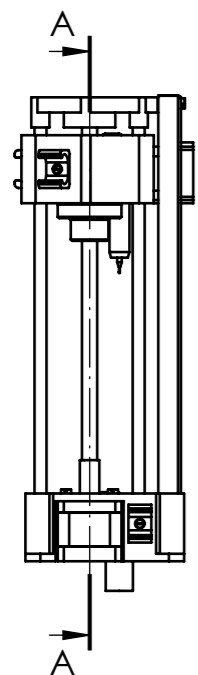
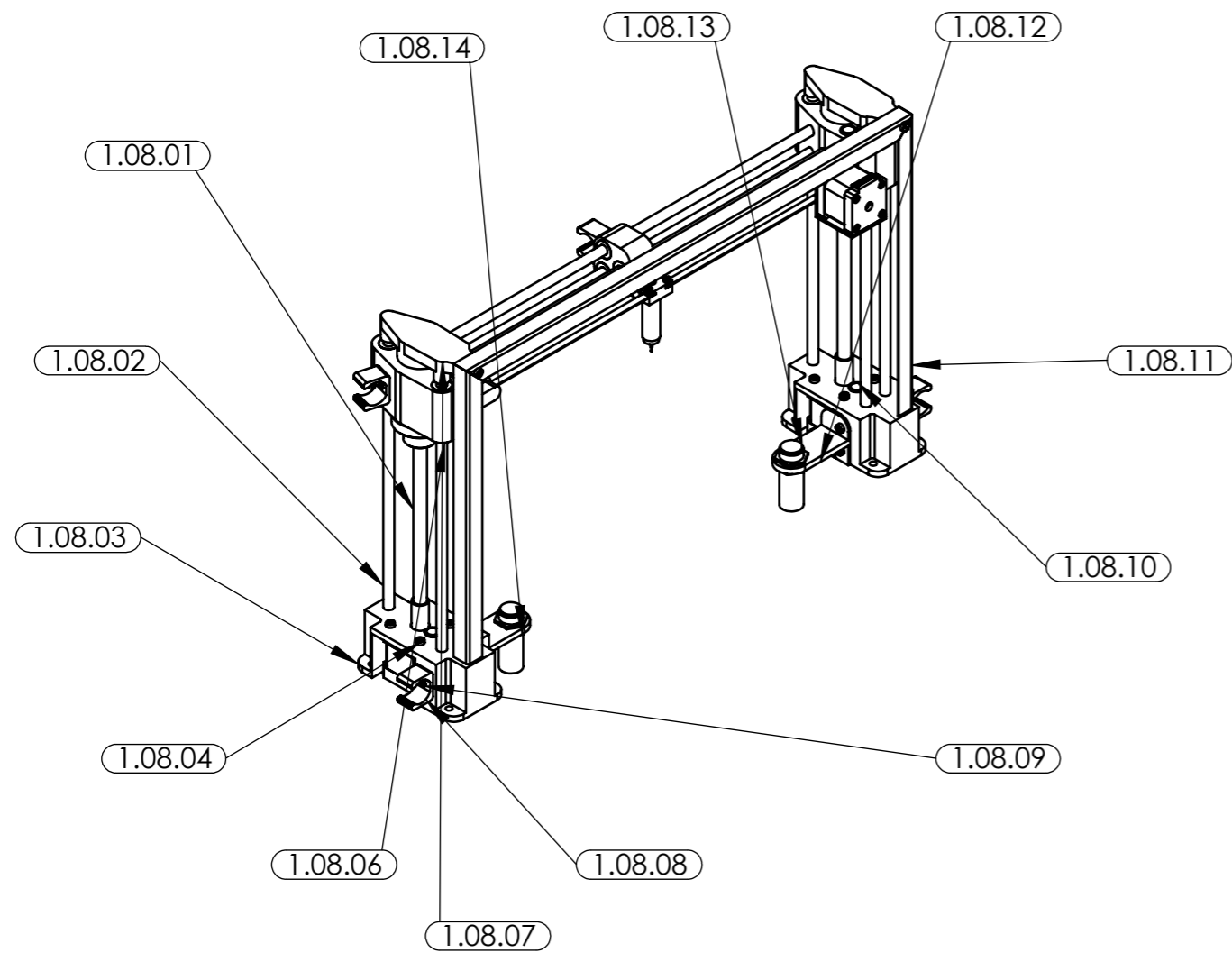
15

Fecha:

23/10/2018

Fecha:

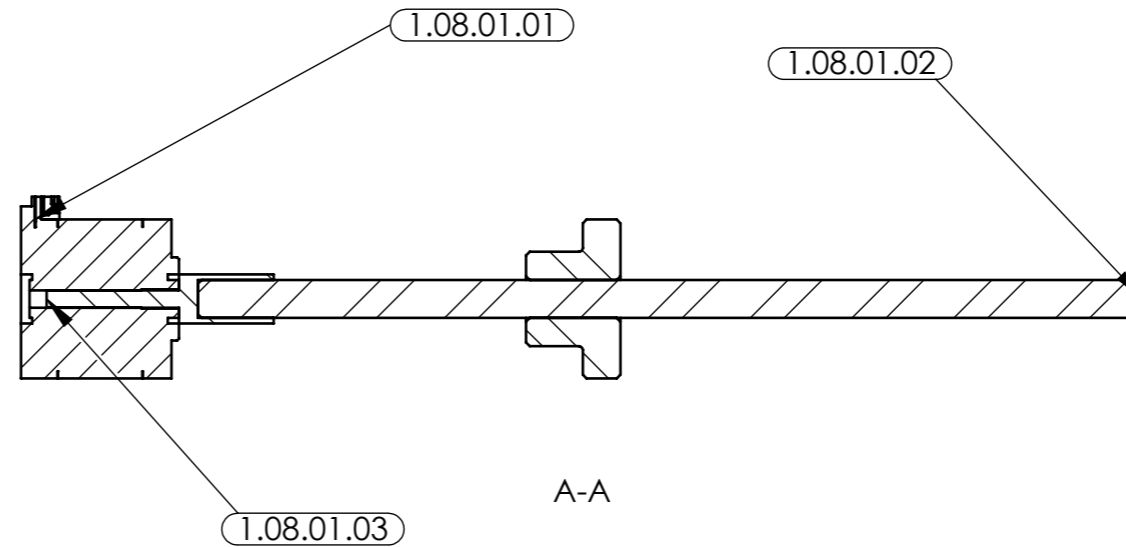
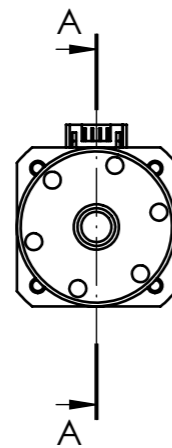
23/11/2018



1.08.14	Tuerca sensor difuso	4
1.08.13	Sensor difuso PNP	2
1.08.12	Sujeción sensor difuso puente	2
1.08.11	Estructura rígida	1
1.08.10	Sensor de fuerza resistivo	2
1.08.09	DIN EN ISO 2009 - M3 x 8 - 8N	2
1.08.08	Sujeción portacables	2
1.08.07	Soporte superior husillo y varilla	2
1.08.06	Subconjunto guía palpador	1
1.08.05	DIN 628 - 7200B - 8,SI,NC,8_68	2
1.08.04	DIN EN ISO 1207 - M4 x 6 - 6N	14
1.08.03	Sujeción motorY-guías-varilla	2
1.08.02	Varilla lisa 8mm acero 306 Createc	6
1.08.01	Subconjunto elevación	2

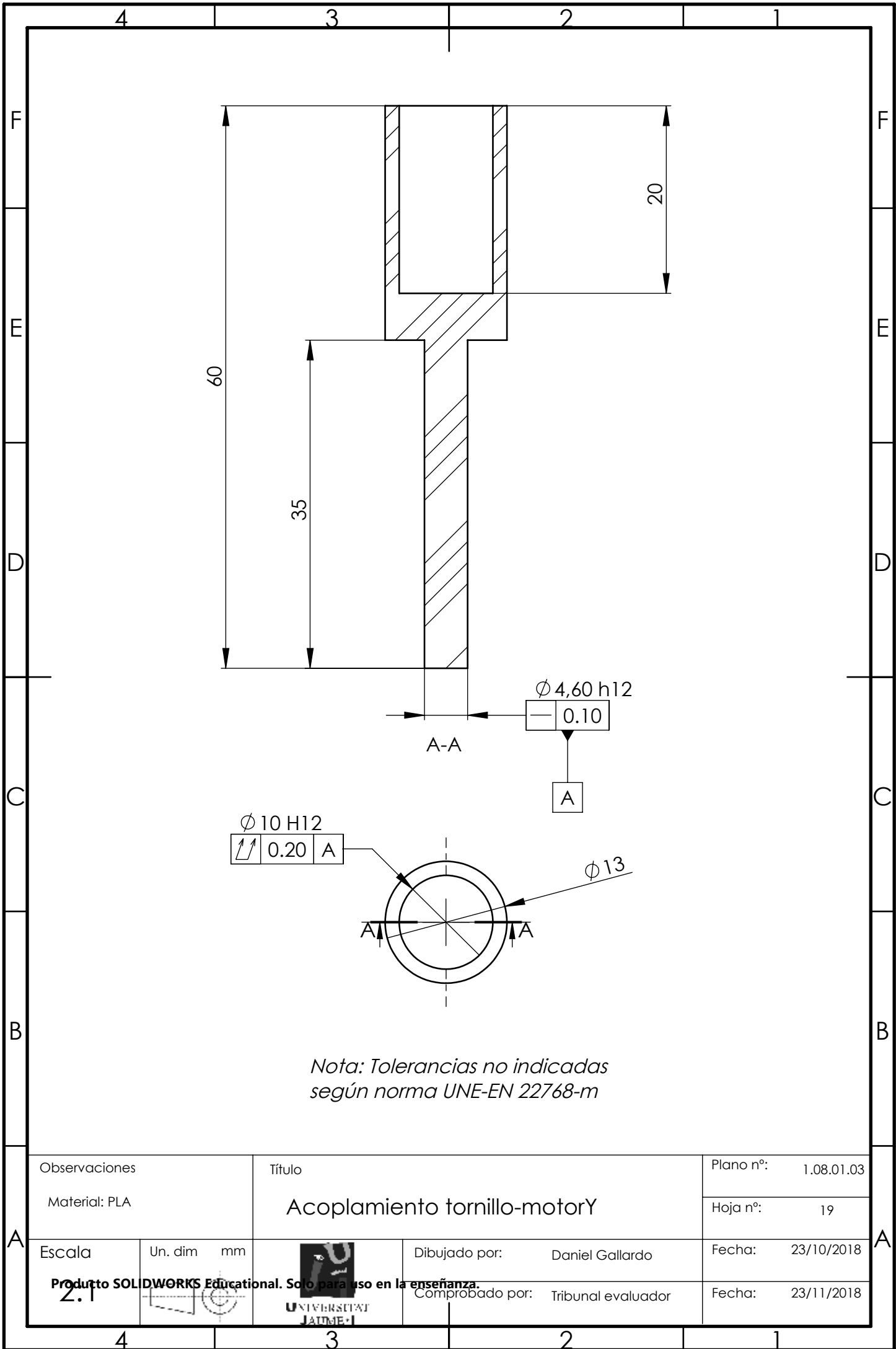
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título	Plano n.º: 1.08
	Subconjunto puente móvil	Hoja n.º: 17
Escala	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
1:5		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.




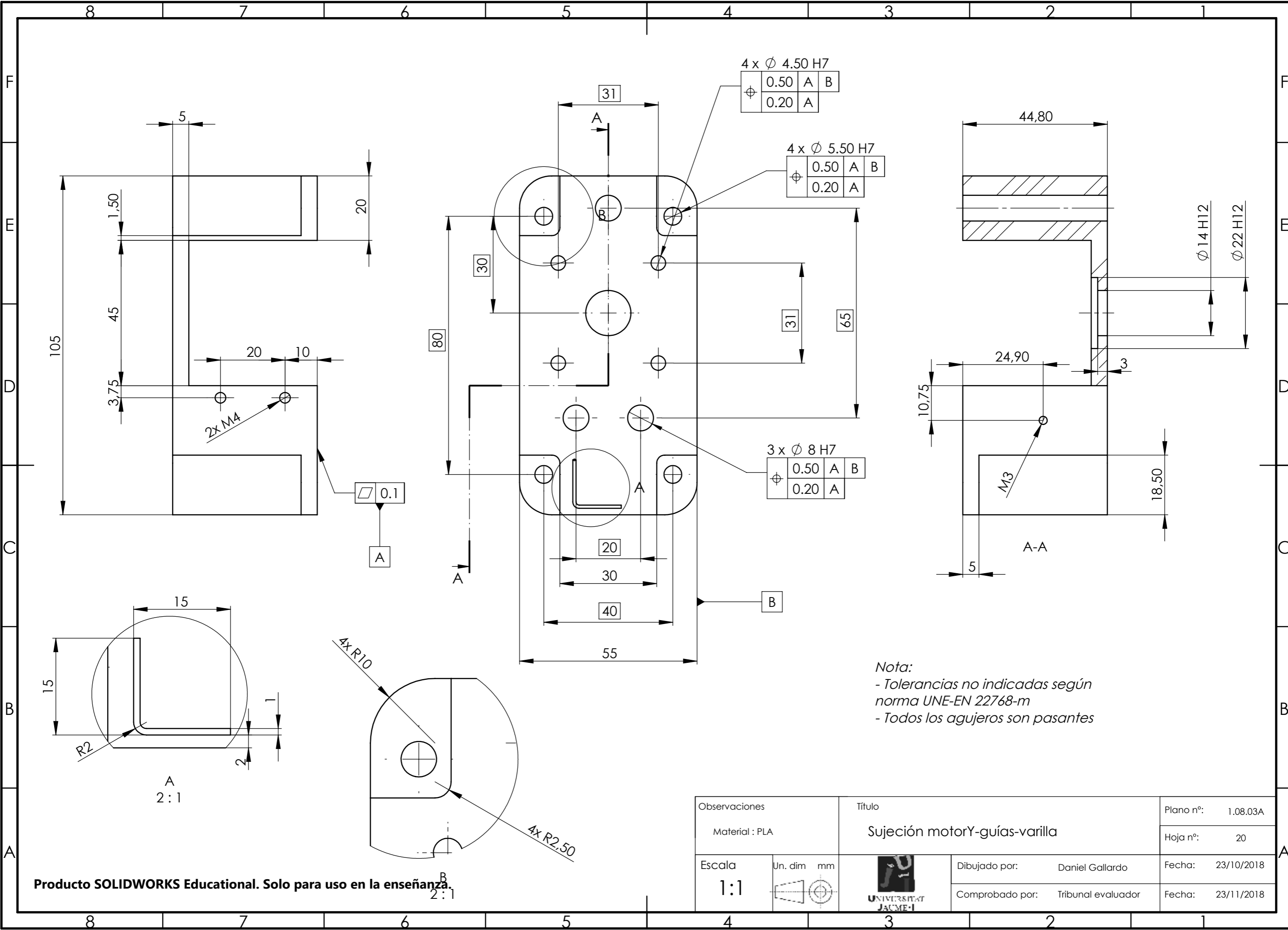
1.08.01.03	Acoplamiento tornillo-motorY	1
1.08.01.02	Husillo trapezoidal 10x2 Conti	1
1.08.01.01	LE17HD2P4200-BR51A-001	1
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título Subconjunto elevación	Plano nº: 1.08.01
		Hoja nº: 18
Escala 1:2	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/10/2018
		Fecha: 23/11/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.01.03
Material: PLA		Acoplamiento tornillo-motor Y		Hoja nº:	19
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
2.1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					23/10/2018
					23/11/2018



4 x \varnothing 4.50 H7

\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

4 x \varnothing 5.50 H7

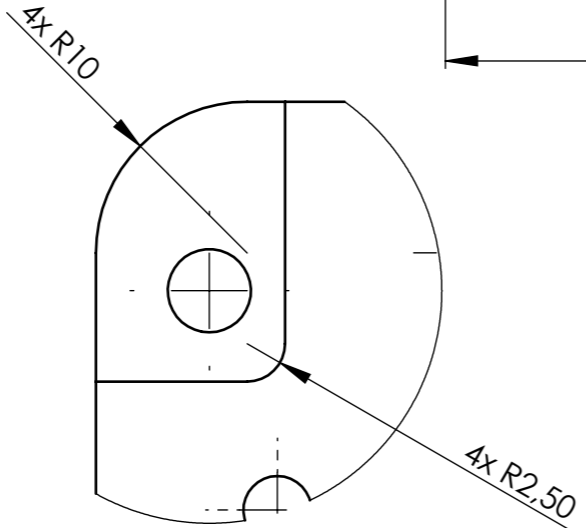
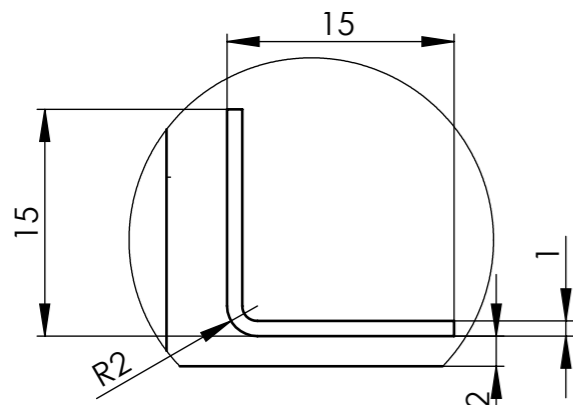
\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

3 x \varnothing 8 H7

\varnothing	0.50	A	B
	0.20	A	

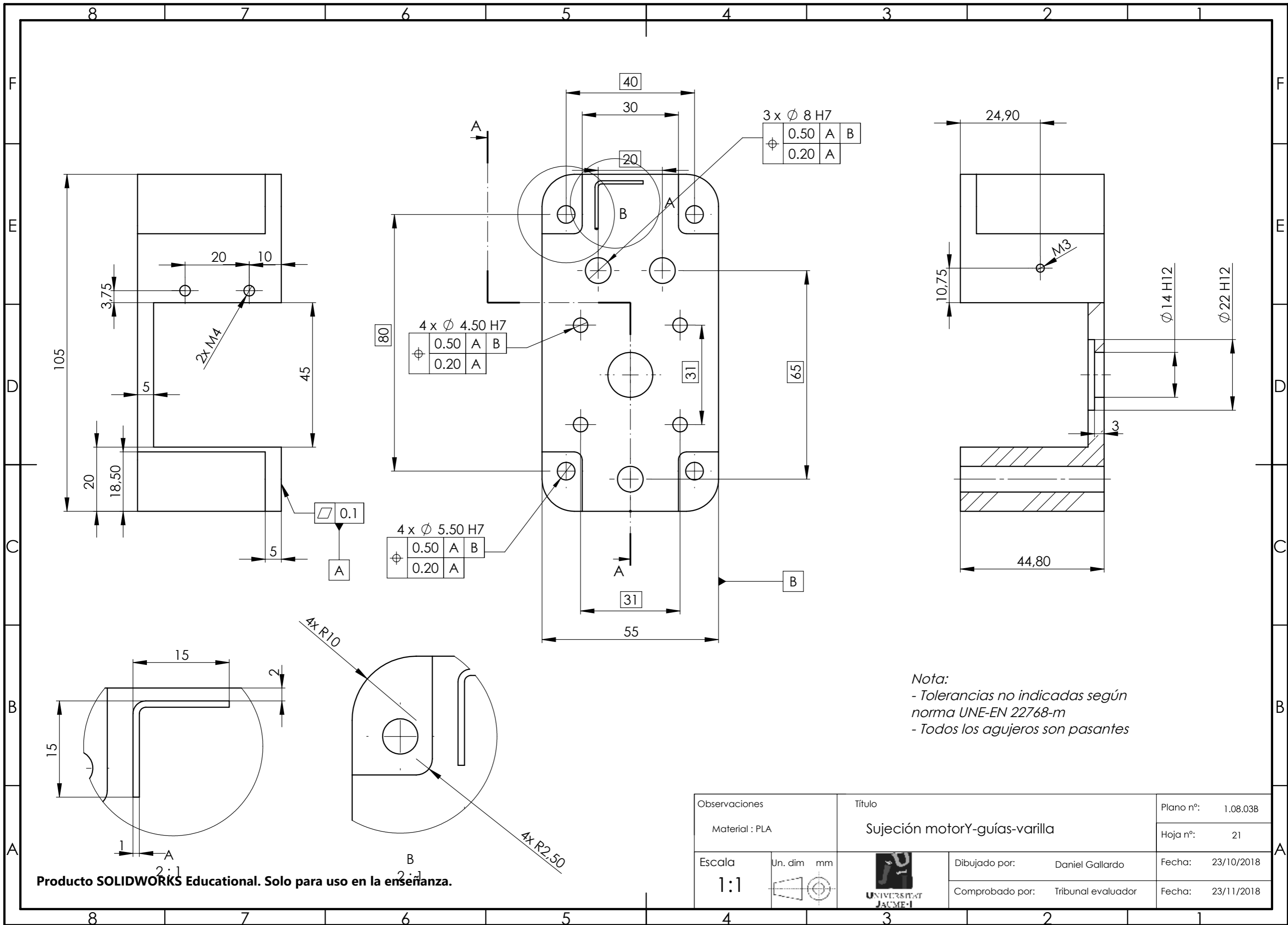
\square	0.1
-----------	-----

Nota:
 - Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m
 - Todos los agujeros son pasantes



Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.03A
Material : PLA		Sujeción motorY-guías-varilla		Hoja nº:	20
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
1:1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					23/10/2018
					23/11/2018



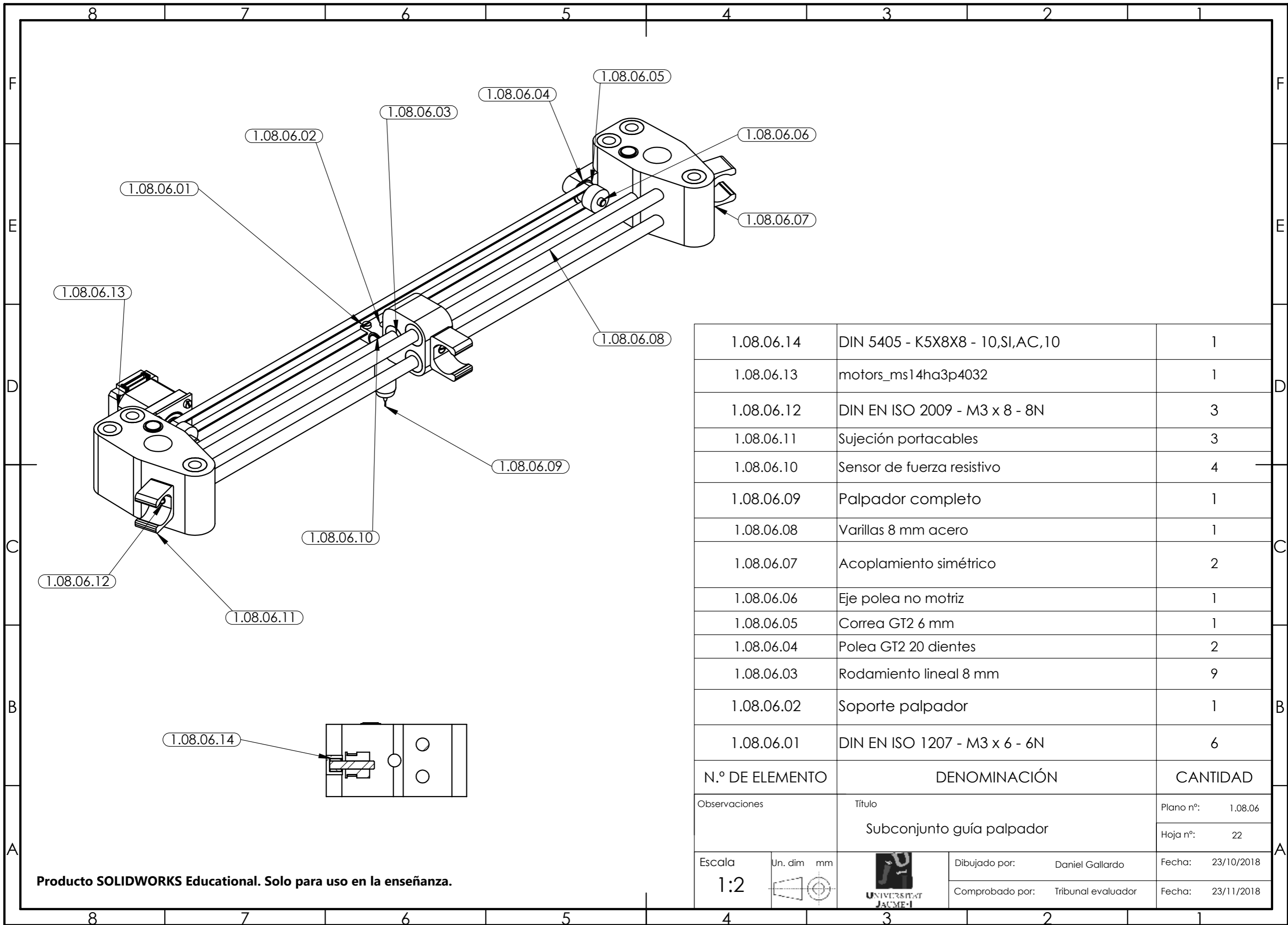


Nota:
 - Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m
 - Todos los agujeros son pasantes

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

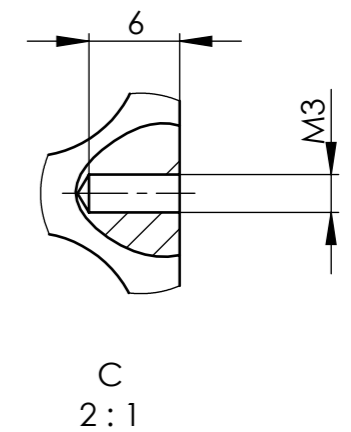
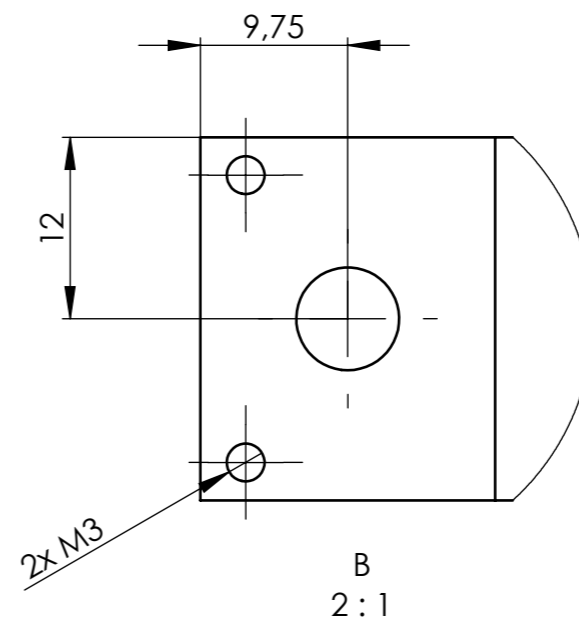
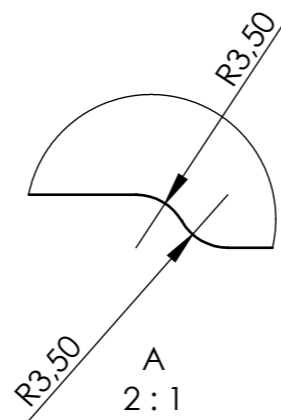
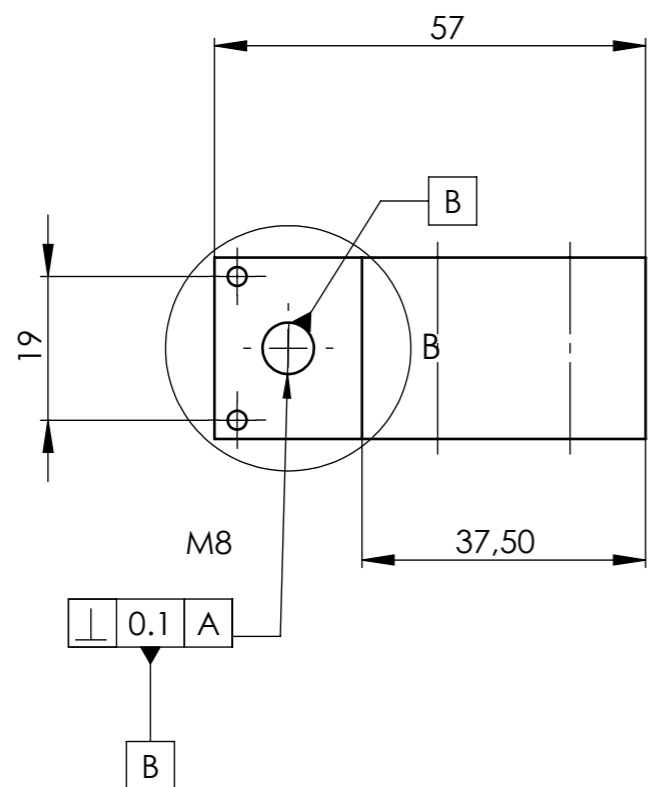
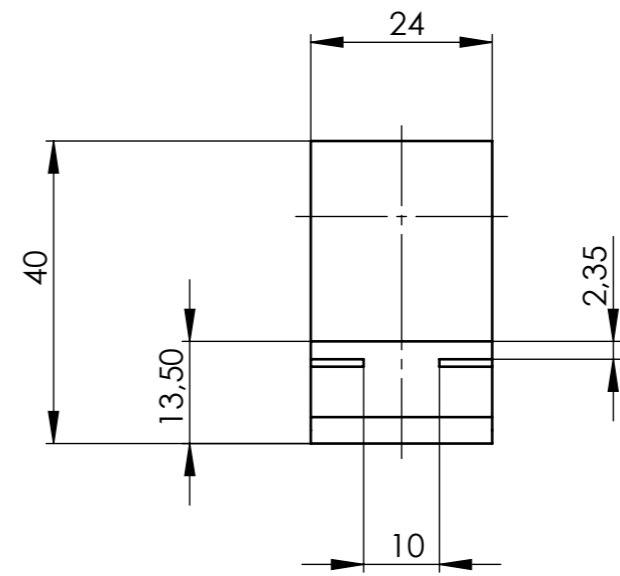
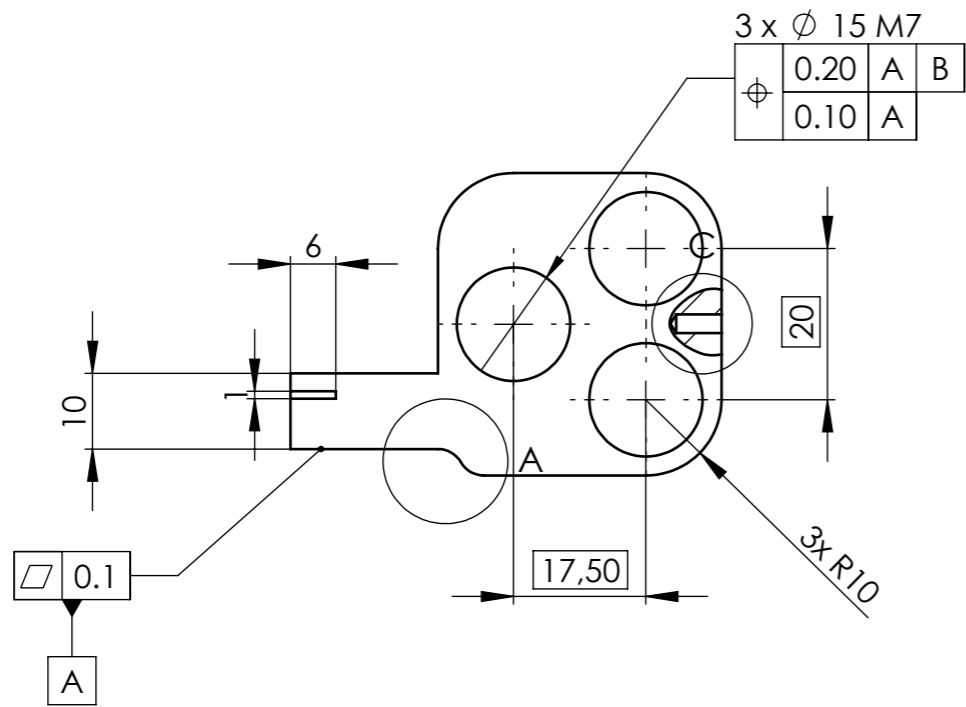
Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.03B
Material : PLA		Sujeción motorY-guías-varilla		Hoja nº:	21
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
1:1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	23/10/2018
				Fecha:	23/11/2018





1.08.06.14	DIN 5405 - K5X8X8 - 10,SI,AC,10	1
1.08.06.13	motors_ms14ha3p4032	1
1.08.06.12	DIN EN ISO 2009 - M3 x 8 - 8N	3
1.08.06.11	Sujeción portacables	3
1.08.06.10	Sensor de fuerza resistivo	4
1.08.06.09	Palpador completo	1
1.08.06.08	Varillas 8 mm acero	1
1.08.06.07	Acoplamiento simétrico	2
1.08.06.06	Eje polea no motriz	1
1.08.06.05	Correa GT2 6 mm	1
1.08.06.04	Polea GT2 20 dientes	2
1.08.06.03	Rodamiento lineal 8 mm	9
1.08.06.02	Soporte palpador	1
1.08.06.01	DIN EN ISO 1207 - M3 x 6 - 6N	6
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
Observaciones	Título	Plano n.º: 1.08.06
	Subconjunto guía palpador	Hoja n.º: 22
Escala	Un. dim mm	Dibujado por: Daniel Gallardo
1:2		Fecha: 23/10/2018
		Comprobado por: Tribunal evaluador
		Fecha: 23/11/2018

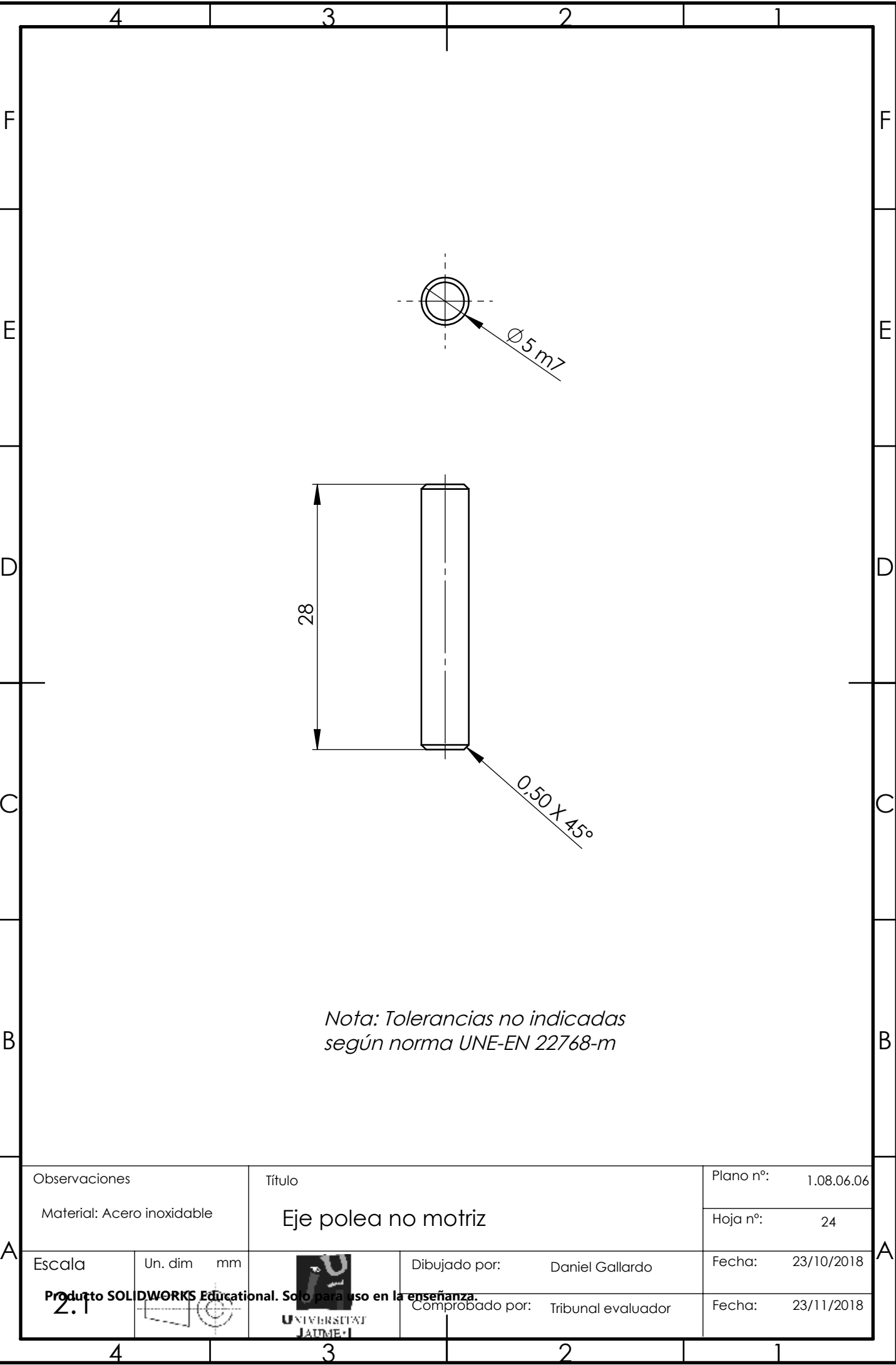
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Nota:
 - Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m
 - Todos los agujeros son pasantes

Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.06.02
Material: PLA		Soporte palpador		Hoja nº:	23
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
1:1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					23/10/2018
					23/11/2018



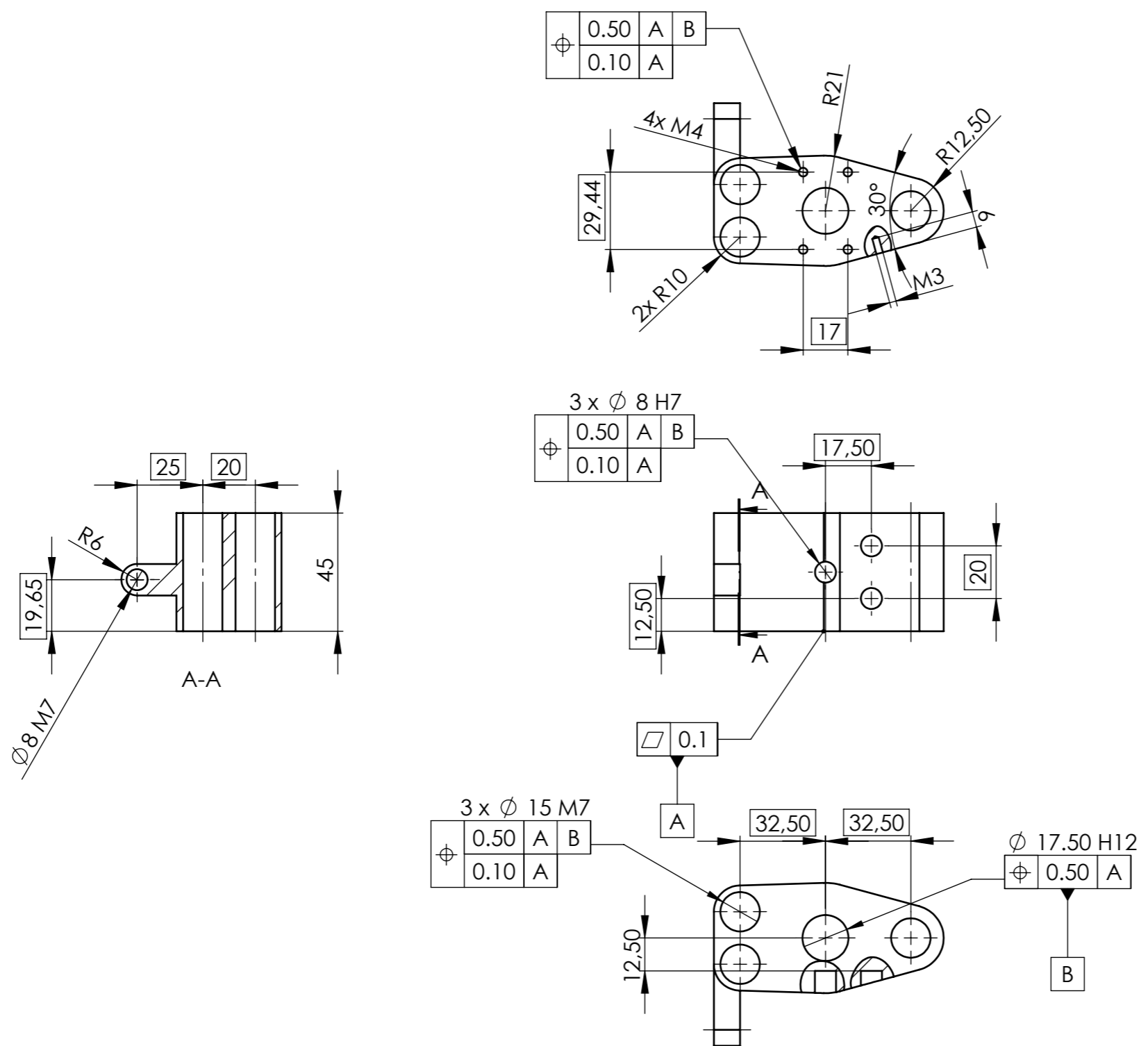


Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.06.06
Material: Acero inoxidable		Eje polea no motriz		Hoja nº:	24
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
2.1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					23/11/2018


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

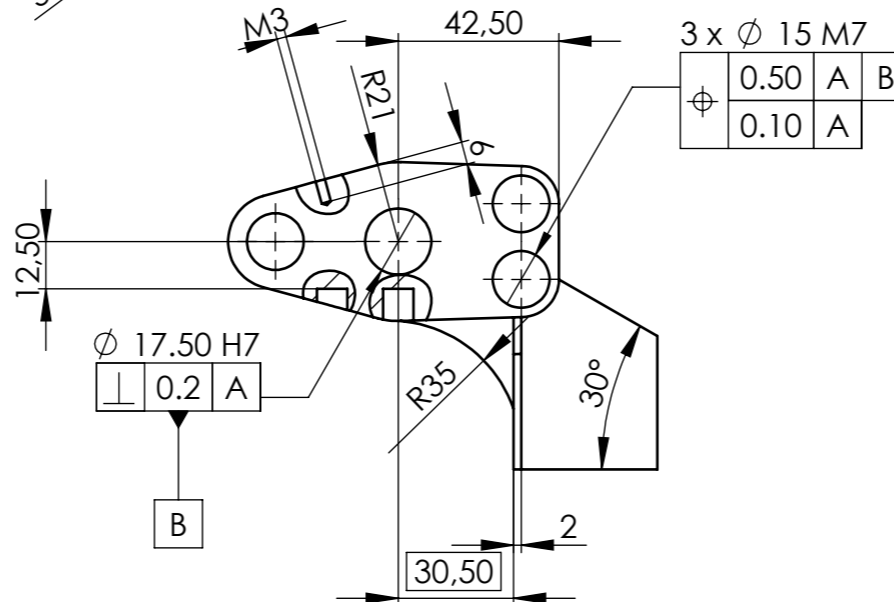
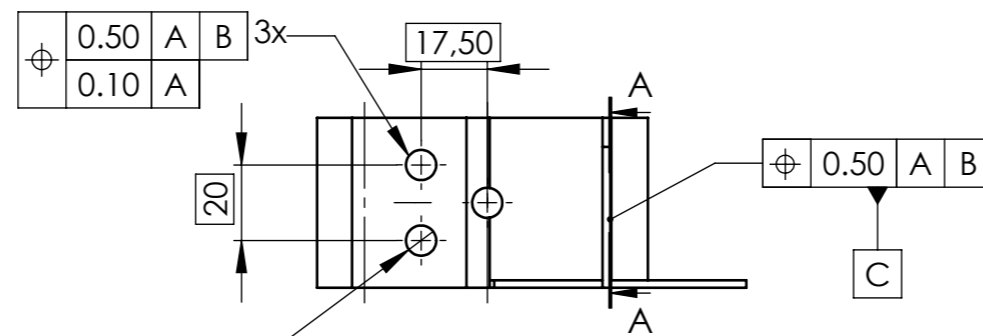
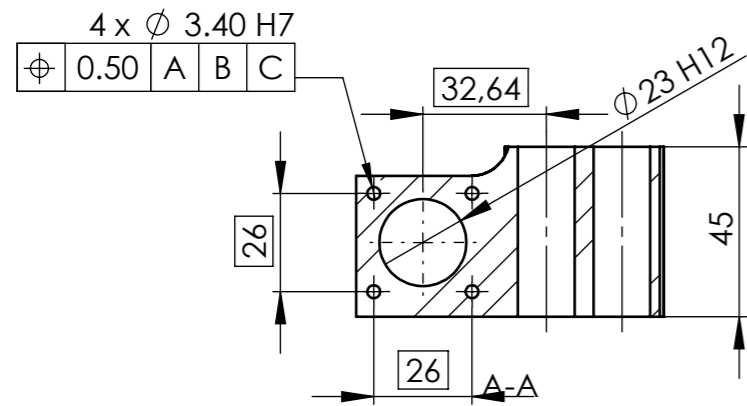
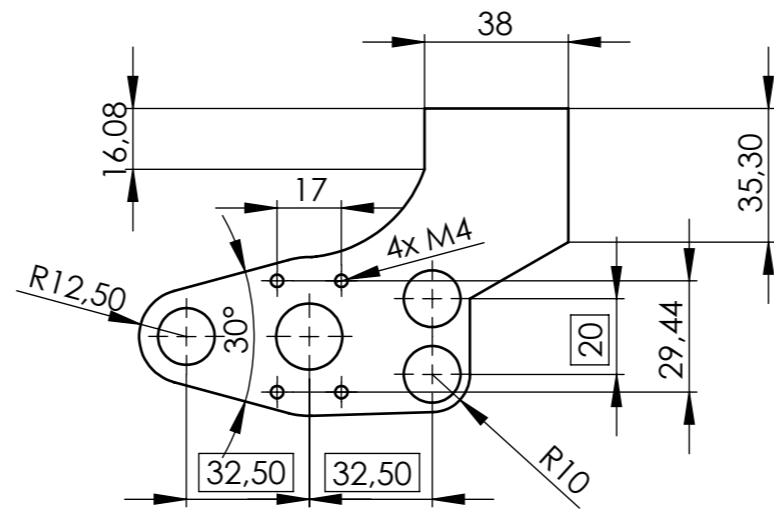





Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

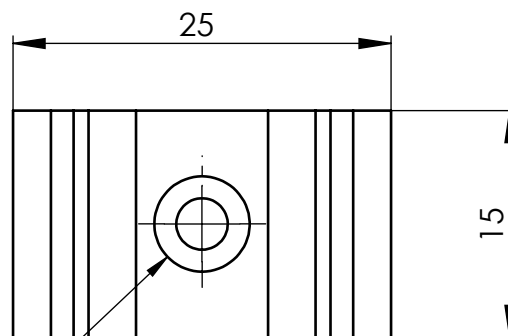
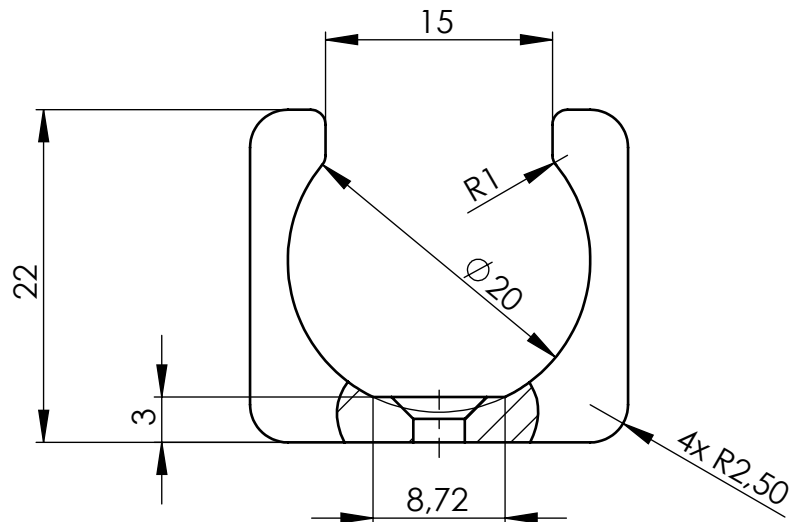
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Observaciones		Título		Plano nº: 1.08.06.07A
Material: PLA		Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY		Hoja nº: 25
Escala	Un. dim		Dibujado por:	Fecha:
1:2	mm		Daniel Gallardo	23/10/2018
			Comprobado por:	Fecha:
			Tribunal evaluador	23/11/2018




Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

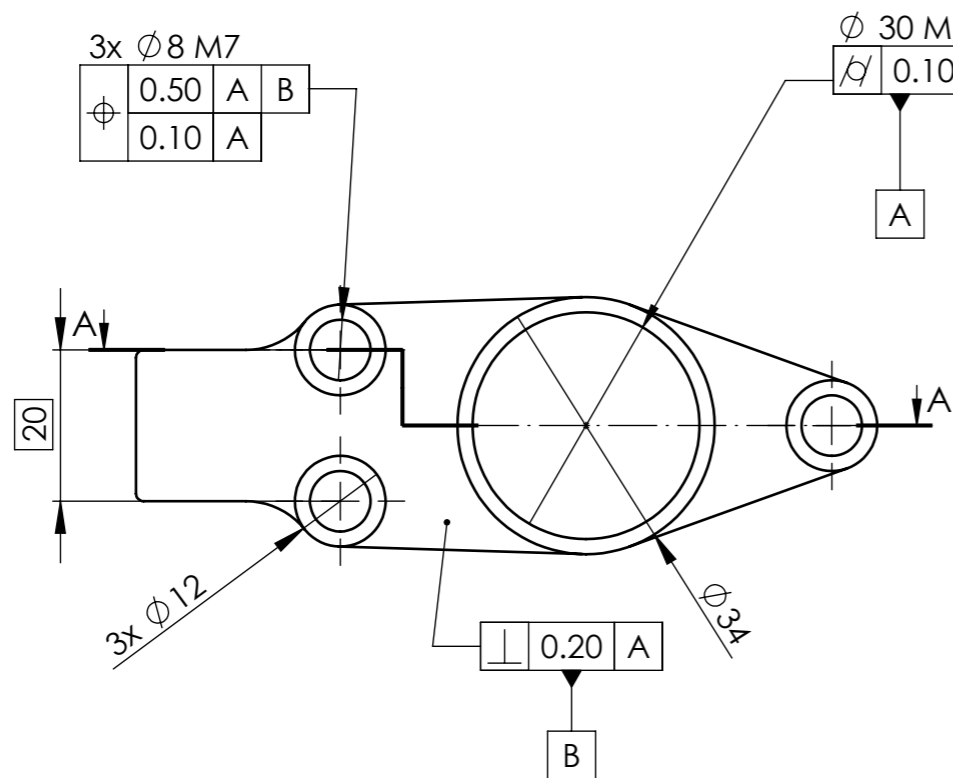
Observaciones		Título		Plano nº: 1.08.06.07B
Material: PLA		Acoplamiento varillasZ-husillo y varillasY		Hoja nº: 26
Escala	Un. dim		Dibujado por:	Daniel Gallardo
1:2	mm		Comprobado por:	Tribunal evaluador
			Fecha:	23/10/2018
			Fecha:	23/11/2018



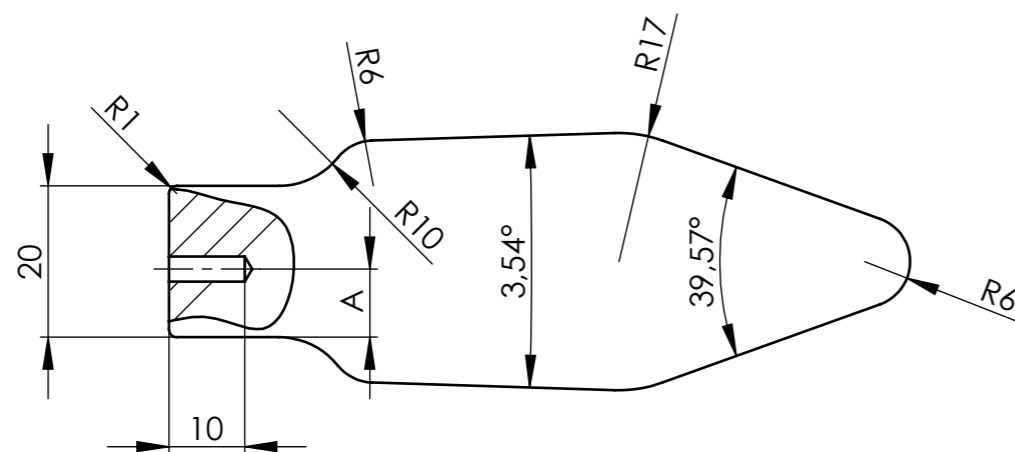
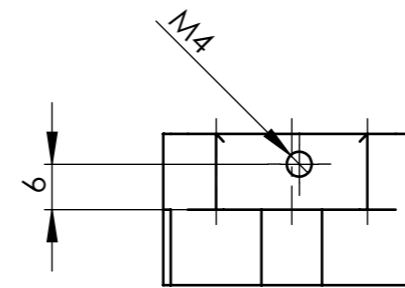
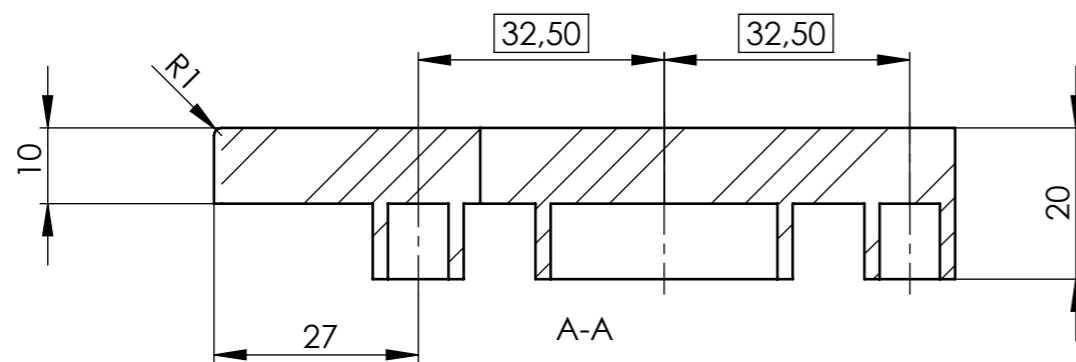
$\checkmark \varnothing 3,40 \text{ H7}$
 $\checkmark \varnothing 6,30 \text{ X } 90^\circ$

Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.06.11
Material: PLA		Sujeción portacables		Hoja nº:	27
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
2.1			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					



Configuración	Valor (A)
Predeterminada	9
Simétrica	11

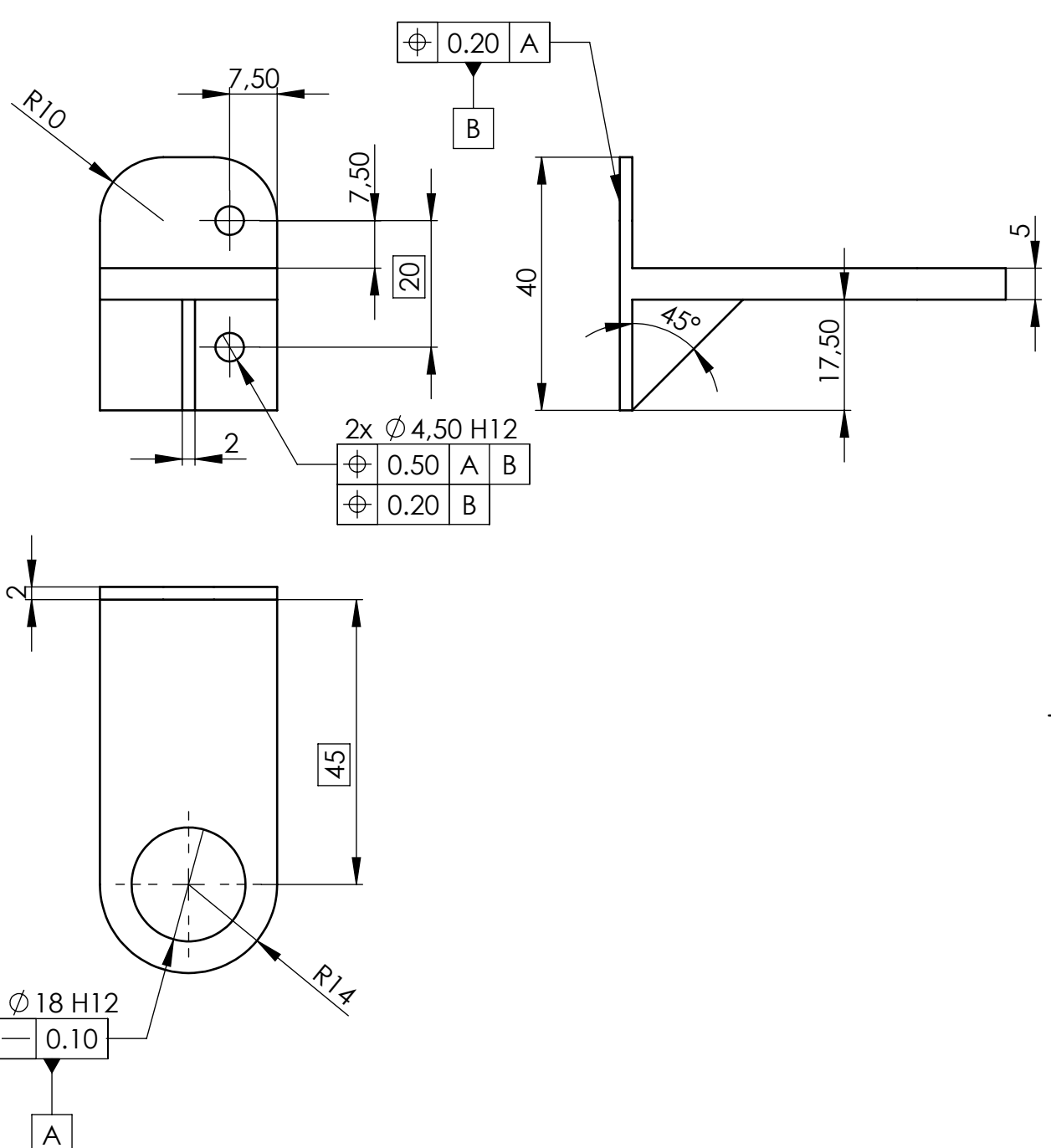


Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Observaciones	Título	Plano nº:	1.08.07
Material: PLA	Soporte superior husillo y varilla	Hoja nº:	28
Escala	Un. dim	Dibujado por:	Fecha:
1:1	mm	Daniel Gallardo	23/10/2018
		Comprobado por:	Fecha:
		Tribunal evaluador	23/11/2018

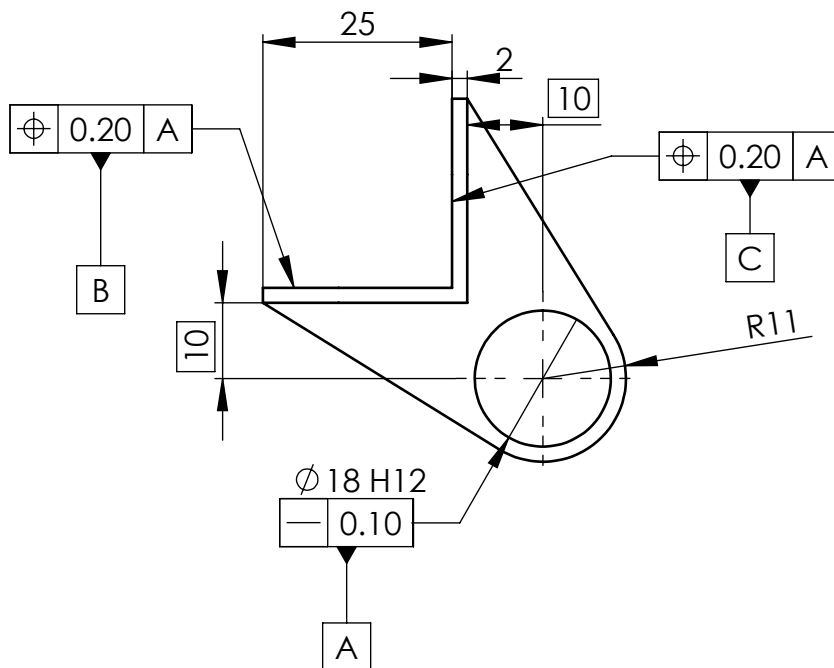
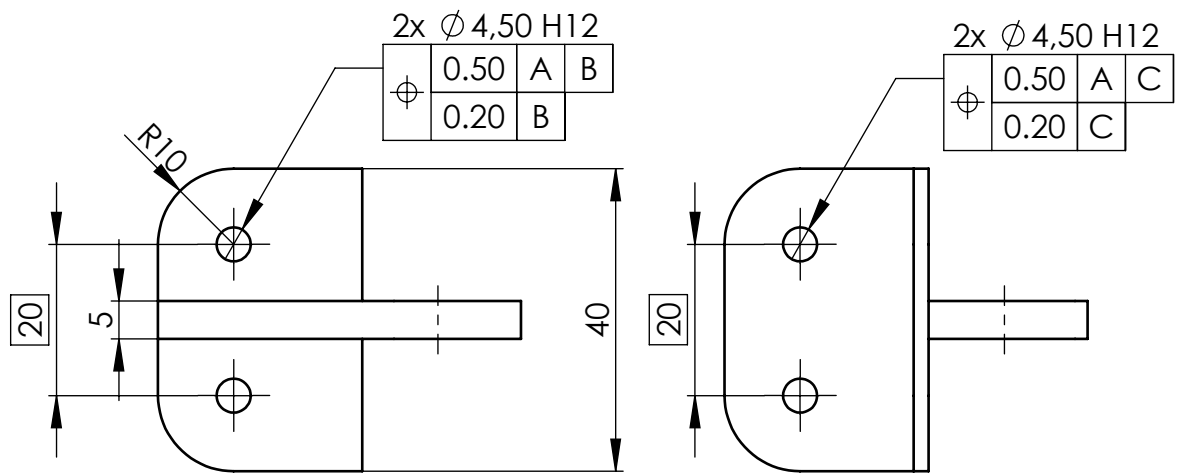




Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones		Título		Plano nº:	1.08.12
Material: PLA		Sujeción sensor difuso puente		Hoja nº:	30
Escala	Un. dim	mm	Dibujado por:	Daniel Gallardo	Fecha:
			Comprobado por:	Tribunal evaluador	Fecha:
					

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Nota: Tolerancias no indicadas según norma UNE-EN 22768-m

Observaciones

Material: PLA

Título

Sujeción sensor difuso base

Plano nº: 1.09

Hoja nº: 31

Escala

Un. dim mm

Dibujado por:

Daniel Gallardo

Fecha: 23/10/2018

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Comprobado por:

Tribunal evaluador

Fecha: 23/11/2018

