

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño e implementación de un prototipo funcional para Focus-Stacking y digitalizado 3D

Julio de 2017

Juan María Piñera Parrilla

David Blanco Fernández

[Firma]

[Firma]

AGRADECIMIENTOS

A D. David Blanco Fernández, a D. Juan Díaz González, a D. Juan Carlos Álvarez Álvarez y a D. Agustín Castaño Rivero, por el apoyo ofrecido durante la realización de este proyecto.

A todos los profesores del Máster en Mecatrónica.

A Izertis S.L. por la financiación para construcción del prototipo.

A mi familia y amigos.

RESUMEN

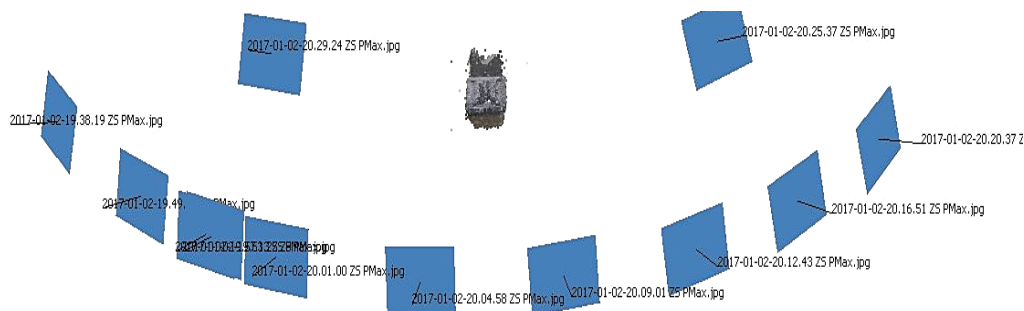
El diseño e implementación del prototipo desarrollado en este trabajo fin del máster intenta resolver los problemas que acarrea la realización de fotografía de gran aumento o macrofotografía, siendo la pérdida de profundidad de campo el principal obstáculo en este tipo de imágenes, la técnica de Focus-Stacking consigue suplir la pérdida de profundidad de campo mediante la toma sucesiva de imágenes en diferentes planos focales obteniendo una imagen completamente enfocada mediante composición de las zonas enfocadas de las diferentes imágenes tomadas.



Con el fin de que la ejecución de esta técnica sea sencilla, se ha incorporado en el prototipo tanto la cámara como la mesa del movimiento lineal para desplazarla, por separado se ha desarrollado el posicionador del objeto y un software que maneja el conjunto, realizándose todo el proceso a través de la pantalla del ordenador sin necesidad de que el operario interfiera físicamente en la operación.



El posicionamiento preciso del objeto con el prototipo da la posibilidad de juntar la técnica del focus Stacking con el digitalizado 3D mediante fotogrametría. La fotogrametría consiste en la reconstrucción tridimensional de un objeto a partir de fotografías realizadas desde distintos ángulos. Por lo tanto, cada fotografía empleada para el digitalizado 3D será una pila de imágenes con el fin de conseguir una imagen enfocada (focus Stacking).



PALABRAS CLAVE

3D Position Control Stage, Photogrammetry, Focus Stacking, Extended Depth of Field, Points Cloud, Mesh

ÍNDICE GENERAL

1.	ANTECEDENTES	5
1.1.	DIGITALIZADO 3D	5
1.1.1.	<i>Contacto discreto con activación manual</i>	5
1.1.2.	<i>Contacto discreto con activación por touch-trigger</i>	5
1.1.3.	<i>Contacto continuo</i>	6
1.1.4.	<i>Sin contacto – Triangulación láser</i>	7
1.1.5.	<i>Fotogrametría:</i>	7
1.2.	CAPTURA DE IMÁGENES Y FOCUS STACKING	9
1.2.1.	<i>Nitidez, difracción y apertura efectiva de diafragma</i>	9
1.2.2.	<i>Profundidad de campo</i>	11
1.2.3.	<i>Apilamiento de imágenes (Focus Stacking)</i>	13
1.2.4.	<i>Toma de imágenes originales</i>	13
1.2.5.	<i>Procesado de imágenes</i>	13
1.2.6.	<i>Círculo de confusión</i>	14
1.3.	SOLUCIONES COMERCIALES	14
1.4.	SOLUCIONES PARTICULARES	15
2.	DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO	17
2.1.	VERSIÓN 1 POSICIONADOR	17
2.2.	VERSIÓN 2 POSICIONADOR	18
2.3.	VERSIÓN 3 POSICIONADOR	20
2.3.1.	<i>Justificación teórica</i>	20
2.3.2.	<i>Diseño mecánico</i>	21
2.4.	VERSIÓN 1 CARRIL DE ENFOQUE.....	26
2.5.	VERSIÓN 2 CARRIL DE ENFOQUE.....	27
2.6.	VERSIÓN 3 CARRIL DE ENFOQUE.....	28
3.	DISEÑO ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO	30
3.1.	VERSIÓN 1 SEPARADA EN DOS ARDUINOS UNO	30
3.2.	VERSIÓN 2 ARDUINO MEGA Y RAMPS 1.4	32
3.3.	VERSIÓN 3 PLACA PROPIA BASADA EN ATMEGA1280	33
3.3.1.	<i>Esquemático</i>	33
3.3.2.	<i>PCB</i>	36
3.3.3.	<i>Montaje y resultado:</i>	36
4.	FABRICACION DEL PROTOTIPO	37
4.1.	REPLICADO EN RESINA.....	37
4.1.1.	<i>Colada simple por gravedad</i>	37
4.1.2.	<i>Colada por gravedad y vacío</i>	38
4.1.3.	<i>Colada con vacío y gravedad</i>	39
4.1.4.	<i>Colada simple con vacío y presión</i>	40
4.2.	MECANIZADO	42
4.3.	CORTE POR LASER.....	43
4.4.	COMPONENTES COMERCIALES	44
4.4.1.	<i>Mecánica</i>	44
4.4.2.	<i>Electrónica</i>	46
5.	CAMARA.....	49

6. SOFTWARE	50
6.1. PARÁMETROS (SETTINGS)	50
6.2. CONTROL DE RAIL (RAIL CONTROL)	53
6.4. LIVE VIEW CONTROL	55
6.5. CONTROL DEL PROCESO DE CAPTURA DE IMÁGENES (PROCESS CONTROL)	56
7. PROCESO DE DIGITILIZADO	57
8. PRESUPUESTO	60
9. MODELO DE NEGOCIO	62
10. CONCLUSIONES	63
11. BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO 1: ESTUDIO DEL POSICONADOR CONCENTRICO RRR (ZYZ)	67
ANEXO 2: PLANOS	71

Tabla de ilustraciones:

Ilustración 1 Contacto discreto con activación manual.....	5
Ilustración 2 TOUCH-TRIGGER	6
Ilustración 3 Touch-Trigger activación por fuerza de contacto	6
Ilustración 4 Contacto continuo	6
Ilustración 5 Triangulación laser	7
Ilustración 6 Proceso de fotogrametría.....	8
Ilustración 7 Detalle comparativo entre dos tomas realizadas a f1.8 izq. y f32 derecha.	10
Ilustración 8 Efecto de la difracción en función de la apertura del diafragma.....	10
Ilustración 9 Disco de Airy	10
Ilustración 10 Profundidad de campo VS Apertura numérica	12
Ilustración 11 StackShot.....	14
Ilustración 12 WEMACRO RAIL.....	15
Ilustración 13 Velbon Macro Stage.....	15
Ilustración 14 Ejemplo de montaje para realizar Focus Stacking (Villarrubia, Villarrubia and perfil, 2017).....	16
Ilustración 15 Ejemplo de montaje para realizar Focus Stacking (Morenatti, 2017).....	16
Ilustración 16 Primer prototipo funcional	17
Ilustración 17 Electrónica para el primer prototipo.	18
Ilustración 18 Segundo prototipo funcional	18
Ilustración 19 Interfaz gráfica del segundo prototipo funcional	19
Ilustración 20 Modelo 3D y esquema de muñeca de Euler	20
Ilustración 21 Montaje eje de rotación superior	21
Ilustración 22 Montaje goniómetro	21
Ilustración 23 Montaje goniómetro 2	22
Ilustración 24 Montaje conjunto de la muñeca de Euler	22
Ilustración 25 Montaje de la estructura fundamental del posicionador	23
Ilustración 26 Montaje del posicionador	24
Ilustración 27 Montaje completo de posicionador	25
Ilustración 28 Proxxon KT70	26
Ilustración 29 Carril de enfoque con Proxxon KT70	26
Ilustración 30 Carril de enfoque manual comercial	27
Ilustración 31 Carril de enfoque comercial motorizado.....	27
Ilustración 32 Montaje tuerca anti-backlash	28
Ilustración 33 Montaje carril de enfoque	28
Ilustración 34 Montaje completo carril de enfoque	29
Ilustración 35 estándar Arca Swiss	29
Ilustración 36 Interior carril de enfoque y Arca Swiss.....	29
Ilustración 37 Electrónica propia del primer prototipo	30
Ilustración 38 Control de Steppers con placa CNC.....	30
Ilustración 39 Placa de control de motores de continua.....	32
Ilustración 40 Esquema de pines de la Ramps 1.4	32
Ilustración 41 Plaquita individual para uso de un motor de pasos	32
Ilustración 42 Esquemático alimentación	33
Ilustración 43 Esquemático comunicación serie	33
Ilustración 44 Esquemático pines auxiliares de comunicación	34
Ilustración 45 Esquemático conexión sensores	34
Ilustración 46 Conexión driver DRV8825	35
Ilustración 47 Esquemático conexión de todos los drivers	35
Ilustración 48 Esquemático completo	35
Ilustración 49 PCB	36
Ilustración 50 Placa construida	36

Ilustración 51 Pieza con burbujas resultado de colada simple.....	37
Ilustración 52 Campana de vacío	38
Ilustración 53 Piezas en la campana de vacío y resultado con microburbujas	38
Ilustración 54 Resultado con defectos de detalle	39
Ilustración 55 Cámara de presión.....	40
Ilustración 56 Réplicas finales	41
Ilustración 57 Calderín de presión	41
Ilustración 58 Mecanizado en fresadora de chapa Arca Swiss	42
Ilustración 59 Resultado final Arca Swiss	42
Ilustración 60 Modelo 3d y resultado de las chapas de cierre	43
Ilustración 61 Compensación del haz laser	43
Ilustración 62 Máquina de corte por láser	44
Ilustración 63 Cojinete lineal LM8UU	44
Ilustración 64 Tuerca Anti-backlash	44
Ilustración 65 Guías lineales IGUS.....	45
Ilustración 66 Grapa comercial Arca Swiss	45
Ilustración 67 DRV8825	46
Ilustración 68 Nema 11	46
Ilustración 69 Potenciómetro	46
Ilustración 70 Microstepper	47
Ilustración 71 Resultado final del carril de enfoque	47
Ilustración 72 Resultado posicionador.....	47
Ilustración 73 Resultado final del conjunto	48
Ilustración 74 Cámara ELP.....	49
Ilustración 75 Sensor IMX179.....	49
Ilustración 76 Interfaz gráfica del programa.....	50
Ilustración 77 Botones de puerto serie.....	51
Ilustración 78 Botones de gestión de base de datos	51
Ilustración 79 Gestión de lentes	51
Ilustración 80 Gestión de sensores.....	52
Ilustración 81 Gestión de datos del carril de enfoque.....	52
Ilustración 82 Foco cercano	53
Ilustración 83 Foco lejano.....	53
Ilustración 84 Información de Focus Stacking	54
Ilustración 85 Filtros e Histograma.....	54
Ilustración 86 Propiedades de cámara.....	54
Ilustración 87 Ejemplo de medición de distancias.....	55
Ilustración 88 Ventana de Live View	55
Ilustración 89 Gestión de proceso de toma de imágenes	56
Ilustración 90 Explicación del proceso plano	57
Ilustración 91 Explicación del proceso con varias altura.....	57
Ilustración 92 Focus Stacking	58
Ilustración 93 Fotos finales resultado del Focus Stacking orientadas	59
Ilustración 94 Izq. Nuve de puntos Der. Maya de triángulos STL	59

1. ANTECEDENTES

1.1. Digitalizado 3d

El propósito del digitalizado 3D consiste en crear una nube de puntos, de la superficie de un objeto, a partir de diferentes ejemplares geométricos. Mediante el proceso de reconstrucción, estos puntos se pueden usar para reproducir la forma del objeto.

Los escáneres 3D no son iguales a las cámaras. Tienen un campo de visión en forma de cono al igual que ellas, pero, los escáneres 3D acumulan información acerca de su geometría, mientras que, una cámara acumula información del color. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la ubicación en el espacio tridimensional de cada punto observado.

En muchas situaciones, con un solo escaneo lo más seguro es que no sea suficiente para elaborar un modelo completo de la pieza, por ello, en muchos casos se necesitan varias tomas, desde diferentes orientaciones para captar toda la información. Siguiendo un procedimiento denominado alineación, hay que alterar las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo, es decir, los escaneos han de ser incorporados a un sistema común de referencia.

Se define el flujo de captura de un modelo 3D, como aquel que va de las tomas individuales a un modelo totalmente unificado.

Existen varias tecnologías usadas para el digitalizado 3D, las cuales se resumen a continuación, explicando brevemente su funcionamiento, siendo la última tecnología, fotogrametría, en la que se hará más hincapié puesto que es la tecnología usada en el proyecto.

1.1.1. CONTACTO DISCRETO CON ACTIVACIÓN MANUAL

Un individuo empuja el sensor sobre la superficie del objeto, para así de esta manera, activar una señal que descarga el registro de la situación de los elementos de medición de la cadena cinemática.



Ilustración 1 Contacto discreto con activación manual

1.1.2. CONTACTO DISCRETO CON ACTIVACIÓN POR TOUCH-TRIGGER

A diferencia de la tecnología anterior, en este caso no necesitamos a un individuo dirigiendo el sensor sobre la superficie, dado que aquí el sistema es capaz de realizarlo de forma automática.



Ilustración 2 TOUCH-TRIGGER

Como por ejemplo en los sistemas de contacto cinemático, el desplazamiento físico de dos elementos en contacto provoca un cambio en la resistencia eléctrica de su unión.

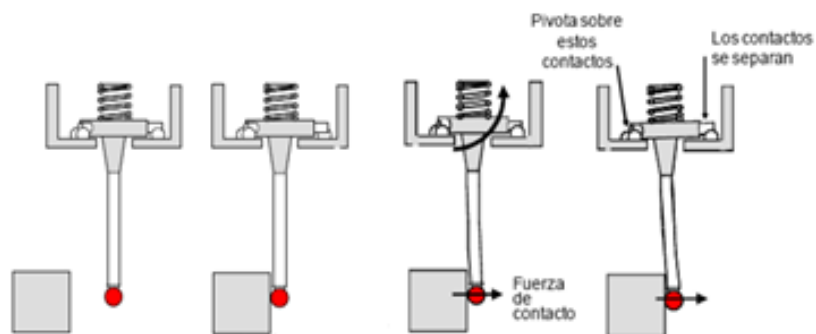


Ilustración 3 Touch-Trigger activación por fuerza de contacto

1.1.3. CONTACTO CONTINUO

El sistema es capaz de mantener un contacto continuado entre el sensor y la superficie.



Ilustración 4 Contacto continuo

1.1.4. SIN CONTACTO – TRIANGULACIÓN LÁSER

Sobre el área del objeto, se registra una imagen de la proyección de un haz láser mediante un sensor CCD. La triangulación nos permite calcular la situación de los puntos de la proyección, siendo conocidos los parámetros geométricos implicados.

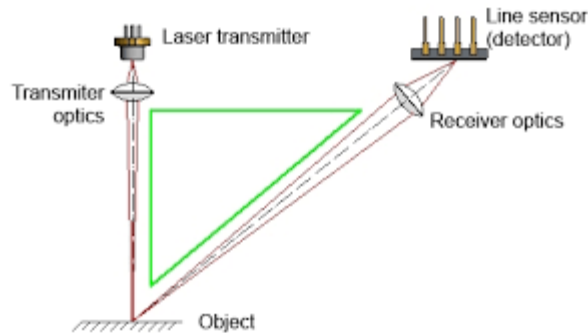


Ilustración 5 Triangulación laser

1.1.5. FOTOGRAMETRÍA:

La fotogrametría es la ciencia o técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, o de una fotografía y el modelo digital del objeto correspondiente al lugar representado, el cual ha de ser realizado anteriormente por intersección de dos o más fotografías.

La palabra fotogrametría se deriva del vocablo "fotograma" (de "phos", "photós", luz, y "gramma", trazado, dibujo), como algo listo, disponible (una foto), y "metrón", medir.

Por lo que resulta que el concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos". (*Topoequipos.com, 2017*)

Si trabajamos con una fotografía podemos obtener una primera información de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona de solape, podremos tener información tridimensional, es decir visión estereoscópica. (La visión estereoscópica de los individuos facilita, de manera natural, la apreciación de profundidades y distancias).

La fotogrametría es una técnica que hace posible obtener las características geométricas de modelos 3D creando dichos modelos mediante imágenes 2D de los objetos, mediante el establecimiento, por la geometría proyectiva, del uso de relaciones matemáticas.

Al capturarse varias fotografías de un objeto, se puede llegar, mediante sofisticados algoritmos de cálculo, a identificar una serie de puntos comunes en dichas fotografías y llegar así a conocer los parámetros de orientación, posición y tamaño, consiguiendo de esta manera, una disposición mallada, que define con mucha exactitud su imagen tridimensional. Seguidamente, para conseguir una imagen 3D del objeto real, se agregan a esta forma modelada, la textura y los colores obtenidos en la imagen.

Diseño e implementación de un prototipo funcional para Focus-Stacking y digitalizado 3D

La captura de imágenes puede realizarse mediante cámaras digitales de diferentes calidades e incluso con cámaras de smartphones, estando éstas últimas al alcance de cualquier individuo.

Proceso de trabajo:

1. Captura: La captura se basa en la toma, en diferentes ángulos, de múltiples fotografías rotando alrededor del objeto, estando éste estático.
2. Procesado: Es el proceso por el cual se consigue reconstruir la posición, orientación, forma y tamaño de los objetos a partir de la toma de la serie de fotografías del modelo, llegando a obtener una imagen tridimensional del mismo. Se procesa la imagen y se genera un archivo.
3. Post-procesado: Estos archivos anteriores pueden ser posteriormente tratados digitalmente para su modelado, edición y animación. (*Edificación, 2017*)

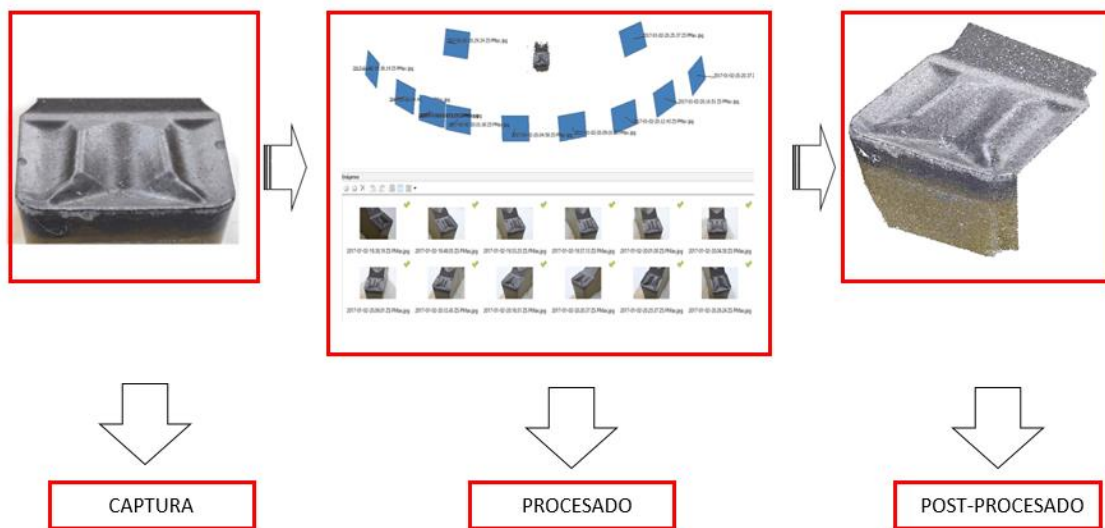


Ilustración 6 Proceso de fotogrametría

Existen tres tipos de fotogrametría:

1. Fotogrametría analógica: Es la disciplina que nos permite obtener, mediante la aplicación de modelos matemáticos, coordenadas u otra información métrica, a partir de medidas realizadas sobre las fotografías de un objeto. Fue la primera parte de la fotogrametría en desarrollarse.
2. Fotogrametría analítica: Es la disciplina que nos permite aplicar dichos modelos matemáticos a los diferentes objetos físicos. Fue la segunda parte en desarrollarse.
3. Fotogrametría digital: Es la disciplina que nos permite sustituir la imagen analógica por la imagen digital gracias a la aparición de los ordenadores y gracias a ello, se empiezan a utilizar programas informáticos. En la actualidad la fotogrametría digital convive con la analítica.

1.2. Captura de imágenes y Focus Stacking

Mediante la fotogrametría es posible obtener una nube de puntos tridimensional a partir de imágenes fotográficas bidimensionales del sujeto que se quiere digitalizar. Uno de los pilares del procesamiento informático de las tomas es la nitidez y detalle con el que se representa dicho sujeto, así como la adecuada profundidad de campo de cada toma.

Cuando dicho sujeto tiene un tamaño muy pequeño, realizar fotografías con una profundidad de campo adecuada que abarque toda su extensión a foco puede resultar complicado o imposible, incluso a costa de sacrificar parcialmente la nitidez a causa de la difracción de la luz.

Dentro de las técnicas de extensión de la profundidad de campo, el apilado de imágenes ha demostrado unos resultados de alta calidad a costa de multiplicar el número de tomas realizadas y el consumo de tiempo de procesado de las mismas.

Otra dificultad añadida es el control de la posición del sujeto durante todo el proceso de captura fotográfica. Colocarlo adecuadamente para intentar que llene el encuadre disponible con la estabilidad necesaria para evitar la trepidación de la imagen, así como movilizarlo con precisión para automatizar todo el proceso, son los objetivos principales que han inspirado este proyecto.

1.2.1. NITIDEZ, DIFRACCIÓN Y ABERTURA EFECTIVA DE DIAFRAGMA

La nitidez de la toma es una meta necesaria para ofrecer al software de fotogrametría la mayor información posible para la generación de la nube de puntos. Dicha nitidez depende de múltiples factores como la estabilidad de la cámara, la velocidad de obturación (objetos en movimiento), calidad de la lente, de la profundidad de campo (PDC) y de la abertura de diafragma.

En la fotografía convencional es normal modificar la abertura del diafragma para controlar la profundidad de campo de las tomas. A medida que cerramos el diafragma la PDC aumenta y conseguimos aumentar el área enfocada. Sin embargo, debemos tener en cuenta tres factores limitantes.

El primero es el hecho de que aumentar la PDC no implica mejorar la nitidez general ya que cada lente tiene una abertura de diafragma a la que ofrece su nitidez óptima, el conocido como “punto dulce”. Para esta apertura determinada, se obtiene la mejor definición posible para el área enfocada.

Desde el punto de vista teórico, según la fórmula de Ernst Abbe, la resolución obtenida es inversamente proporcional a la apertura de diafragma utilizada. Sin embargo, en la aplicación práctica es conocido que gran parte de las aberraciones ópticas de las lentes se corrigen diafragmando. Se estima que el mentado “punto dulce” se suele encontrar 1 o 2 puntos de diafragma por debajo de su abertura máxima.

$$Resolución = \frac{\lambda}{2 \times n \times \sin \alpha} \quad (1)$$

$\sin \alpha$ = semiapertura del objetivo

n = índice de refracción del medio entre la muestra y el objetivo

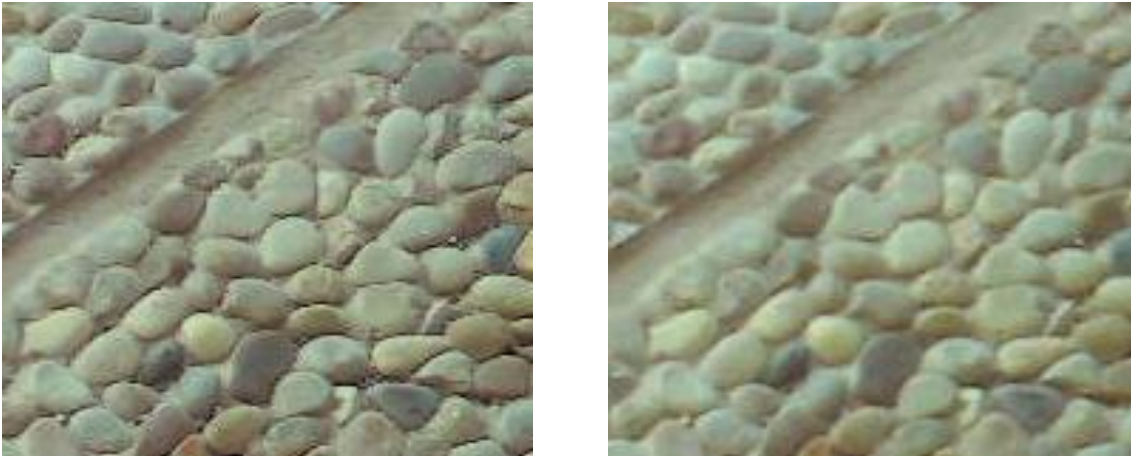


Ilustración 7 Detalle comparativo entre dos tomas realizadas a f1.8 izq. y f32 derecha.

El segundo viene determinado por el fenómeno de difracción de la luz. Es un fenómeno físico que consiste en la desviación de la luz cuando esta choca con un obstáculo (el diafragma). Cuando el diafragma está abierto los rayos de luz entran de forma limpia, pero a medida que vamos cerrando diafragma estos rayos de luz se desvían distorsionando y mermando la resolución de la imagen que capta el sensor.

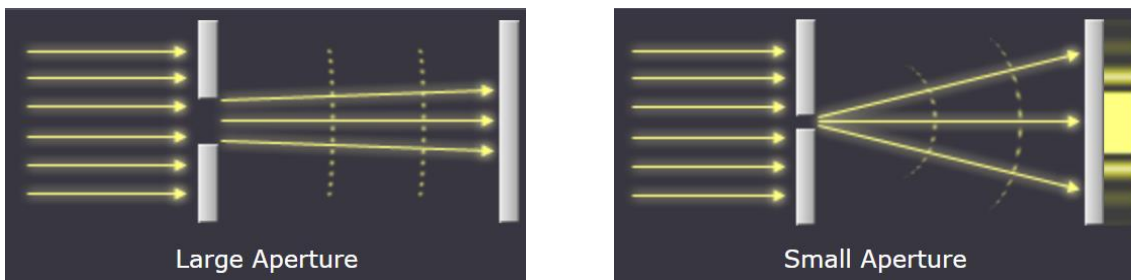


Ilustración 8 Efecto de la difracción en función de la apertura del diafragma

La reducción de la abertura del diafragma sigue un patrón conocido como Disco de Airy en memoria del físico inglés George Biddell Airy que lo describió. Cuando la parte central del disco supera el tamaño del pixel del sensor, la definición de las imágenes empieza a decrecer progresivamente. Su tamaño se puede calcular mediante la fórmula:



Ilustración 9 Disco de Airy

$$\text{Diametro Disco}(\mu\text{m}) = 2,44 \times \lambda(\mu\text{m}) \times f(\#) \quad (2)$$

Es importante aclarar que en nuestro caso tratamos con una fuente de luz no monocromática por lo que el valor de λ estaría entre 0,4 y 0,7 afectando más al rango de los rojos que tendrían inherentemente más diámetro mínimo de disco.

El tercer factor es la Abertura Efectiva. Cuando superamos la relación 1:1 entre el tamaño del sujeto fotografiado y el sensor que recoge la imagen, es necesario corregir el valor de apertura de diafragma según la siguiente fórmula:

$$\text{Abertura Efectiva o } fe(\#) = f(\#) \times (\text{magnificación} + 1) \quad (3)$$

Esto quiere decir que si, por ejemplo, posicionamos la lente a f8, pero estamos trabajando a 4 aumentos, el valor real de diafragma será $8 \times (4+1) = f40$, un valor mucho más comprometido cara a los problemas de la difracción.

1.2.2. PROFUNDIDAD DE CAMPO

Por profundidad de campo o PDC se entiende tradicionalmente en óptica, y en fotografía en particular, la zona que comprende desde el punto más cercano y el más lejano de nuestro campo que sea aceptable en cuanto a nitidez, una vez formada su imagen en el mismo plano de enfoque. Cuanto más cerca se encuentre el motivo que se desea fotografiar, menor será la profundidad de campo y teniendo en cuenta que las distancias de trabajo de las lentes de alto aumento son entre cortas y muy cortas (incluso menores de 1 cm), podemos entender que las PDC con las que se trabaja en macrofotografía son siempre pequeñas.

Hay que tener en cuenta, además, que la magnificación a que trabajamos tiene un efecto directo en el cálculo final de esta distancia.

Podemos calcular la PDF a partir de la fórmula propuesta por Lester Lefkowitz:

$$PDC = 2 \times CoC \times f(\#) \times \frac{(M + 1)}{M^2} \quad (4)$$

CoC = círculo de confusión
f(#) = apertura focal efectiva
M = magnificación

En el caso de utilizar lentes de microscopía hay que tomar en cuenta que su apertura de diafragma es fija y viene dada por el número NA. Podemos calcular su PDC según la fórmula:

$$d_{tot} = \frac{\lambda \cdot n}{NA^2} + \frac{n}{M \cdot NA} e \quad (5)$$

d_{tot} = profundidad de campo total
 λ = longitud de onda de la fuente de iluminación (μm)
 n = índice de refracción del medio (aire 1)
NA = apertura numérica del objetivo
M = ampliación a la que trabajamos
e = menor distancia que puede resolver el sensor (tamaño del pixel x2).

En la microscopía son deseables las lentes con altas aperturas numéricas ya que son más luminosas y permiten capturar la mayor cantidad de luz posible cuando se están fotografiando muestras pequeñas a mucho aumento. Cuanto mayor sea la apertura numérica (equivalente a un bajo número f) menor será la profundidad de campo de la toma.

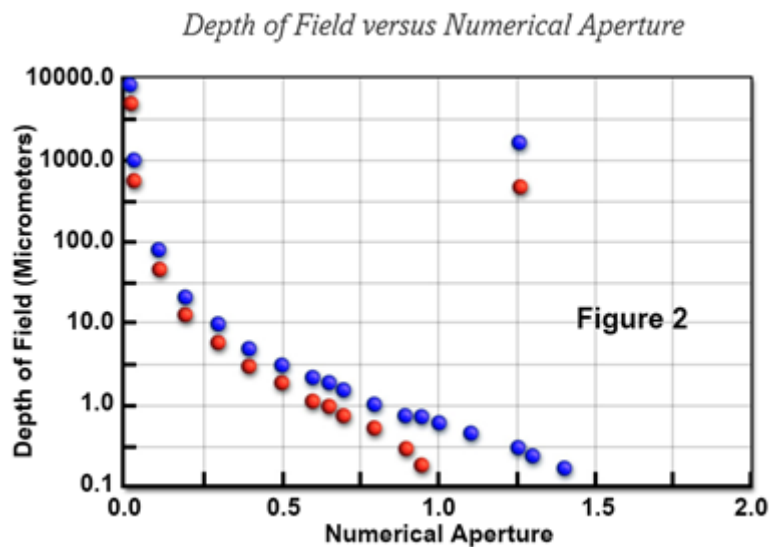


Ilustración 10 Profundidad de campo VS Apertura numérica

Las ópticas de mayor ampliación producen una menor profundidad de campo para la misma apertura numérica. Un objetivo de 100 aumentos (100x) con una apertura numérica de 0.95, tiene una profundidad de campo de 0,19 μm aproximadamente. Según estos cálculos, la siguiente tabla nos da una idea de las magnitudes que estamos manejando para datos reales de algunas lentes utilizadas en el mercado:

Tabla 1 Relaciones de magnitudes y aumentos

Magnification	Numerical Aperture	Depth of Field (μm)
4x	0.10	55.5
10x	0.25	8.5
20x	0.40	5.8
40x	0.65	1.0
60x	0.85	0.40
100x	0.95	0.19

Si sumamos esta realidad a todo lo argumentado respecto a la abertura de diafragma, podemos deducir que, si además interesa utilizar la lente con una abertura de diafragma amplia para evitar en lo posible la difracción y aprovechar toda la nitidez posible, vamos a trabajar necesariamente con PDC muy pequeñas. Las imágenes resultantes preservarán mejor la nitidez de la zona a foco, pero difícilmente ésta va a cubrir completamente nuestro sujeto.

Ante esta problemática entran en escena las técnicas digitales de procesamiento de la imagen para extender la profundidad de campo, en particular, el apilado de foco o focus stacking.

1.2.3. APILAMIENTO DE IMÁGENES (FOCUS STACKING)

El apilamiento de enfoque (focus stacking) es una técnica de procesamiento digital de la imagen consistente en agrupar múltiples imágenes que hayan sido tomadas desde varias distancias focales progresivas para crear una imagen resultante que tenga más profundidad de campo que cualquiera de las imágenes individuales. El resultado es una extensión de la profundidad de campo que permite ver un sujeto completamente enfocado en una misma imagen. Es una técnica muy usada tanto en macrofotografía como en la microscopía óptica para generar imágenes bidimensionales representativas del sujeto estudiado dado que las imágenes originales tienen una profundidad de campo escasa.

El apilamiento de enfoque ofrece gran flexibilidad en la construcción de la imagen final. Se pueden generar imágenes finales con varias profundidades de enfoque diferentes durante la edición de imágenes originales y de maneras diferentes según el propósito de dicha imagen final (científico o artístico).

La técnica permite la generación de imágenes que serían imposibles de obtener físicamente con el equipo de imagen estándar dadas las limitaciones de la óptica.

1.2.4. TOMA DE IMÁGENES ORIGINALES

Para crear un apilamiento de enfoque, se toma una secuencia de imágenes del mismo sujeto donde cada una de ellas va teniendo una profundidad de campo diferente. Esta técnica con la que son realizadas las imágenes en varios planos focales progresivos se denomina horquillado de enfoque (focus bracketing).

En cada una de las imágenes resultantes se obtiene un área diferente de la composición que está enfocada. Ninguna de las imágenes de forma individual logra tener enfocado el sujeto entero, pero conjuntamente todas de ellas contienen los datos requeridos para generar una nueva imagen que contenga toda parte del sujeto que se desea obtener enfocada en la imagen final.

El cambio de plano focal se puede realizar de dos formas. La primera es modificando los parámetros de enfoque de la lente (ajustando objetivo) y se puede realizar de forma manual moviendo en anillo de enfoque o de forma automatizada en caso de lentes con sistema de enfoque motorizado. La segunda consiste en modificar progresivamente la posición relativa cámara-objeto. Mediante un sistema calibrado se realizan avances bien de cámara o de sujeto de forma controlada a medida que se van realizando las tomas fotográficas. Esta última es la única técnica practicable en caso de sistemas ópticos de plano focal fijo como por ejemplo las lentes de microscopía óptica. Se estima que hasta 1:1 se podrían realizar las tomas moviendo el enfoque, pero según se requieren más aumentos, es imprescindible hacerlo moviendo el conjunto completo o mover la muestra en un eje paralelo al eje de la óptica.

Lógicamente, el proceso implica la realización de un número elevado de fotografías dado que la PDC de cada una es pequeña dependiendo del tamaño de PDC final que se quiera cubrir. A esto hay que añadir que es necesario solapar cada toma con la contigua al menos un 20% para que el software realice su trabajo eficazmente.

1.2.5. PROCESADO DE IMÁGENES

Para el post-procesado digital de las imágenes, es necesario realizar previamente un correcto alineado de las imágenes si ha habido cambios en el encuadre durante la toma de imágenes originales. Puede realizarse de forma manual o mediante algoritmos de alineación de imágenes informáticos.

La fusión digital de las imágenes también puede realizarse de forma manual o mediante software específicos. En el método manual se realizaría una selección de las zonas enfocadas de cada imagen y la fusión de todas ellas en una la imagen final. Existe diversas soluciones de software en el mercado, incluso algunas alternativas de uso libre. Todos ellos detectan las regiones enfocadas

de una imagen con el uso de herramientas analíticas (como detector de bordes o el método Fourier). El programa de software pega las regiones enfocadas y mezcla los bordes de ellas para generar la imagen final.

1.2.6. CÍRCULO DE CONFUSIÓN

El término círculo de confusión se creó en la óptica para establecer una definición objetiva de lo que es la nitidez focal. El círculo de confusión define qué tamaño es aceptable y considerado como un punto cuando un punto de la realidad no está perfectamente enfocado. Cuando el círculo de confusión no es percibido por el ojo humano como un punto se dice que esa región de la imagen está fuera de la profundidad de foco, o no tiene una nitidez aceptable.

La industria de la fotografía ha establecido que un círculo de confusión aceptable es aquel punto que ampliado en una foto impresa de tamaño 20 x 25 cm vista desde una distancia de 61 cm no puede ser percibido por el ojo humano. Se reconoce internacionalmente que círculo de confusión no debe ser mayor de 0,25 mm de diámetro.

En fotografía, los "círculos de confusión" son los puntos más pequeños colocados uno junto al otro que son posibles distinguir sobre un negativo, o más generalmente, en el soporte de una cámara fotográfica. El diámetro (E) de estos círculos se denomina diámetro de confusión.

1.3. Soluciones comerciales

A continuación, se enumeran algunos ejemplos de soluciones comerciales para la realización de focus Stacking. Como se puede apreciar este tipo de soluciones no contemplan el posicionamiento del objeto, sino que simplemente son una misa de movimiento lineal para desplazar la cámara y realizar las fotografías siendo esto un proceso en mayor o menor medida automatizado.

- COGNISYS STACKSHOT MACRO RAIL PACKAGE



Ilustración 11 StackShot

- WEMACRO RAIL



Ilustración 12 WEMACRO RAIL

- VELBON SUPER MAG SLIDER

Velbon Macro Stage



<http://extreme-macro.co.uk>

Ilustración 13 Velbon Macro Stage

1.4. Soluciones particulares

Las personas que utilizan estas técnicas de manera profesional se ven obligadas a montar instrumentos de posicionamiento basados en ejes de giros de precisión modulares, tanto lineales como angulares, lo que encarece susceptiblemente este tipo de constructos. Ejemplos de estos pueden ser los mostrados en las siguientes imágenes:

Diseño e implementación de un prototipo funcional para Focus-Stacking y digitalizado 3D

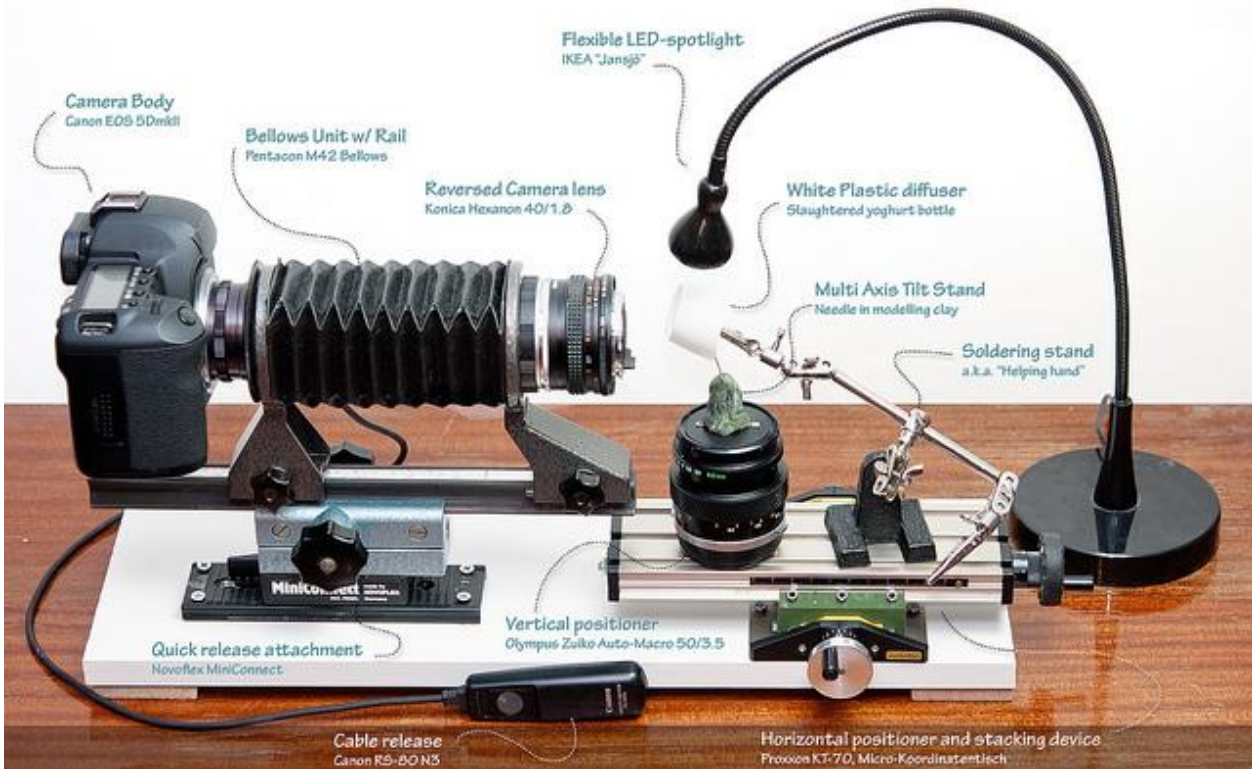


Ilustración 14 Ejemplo de montaje para realizar Focus Stacking (Villarrubia, Villarrubia and perfil, 2017)

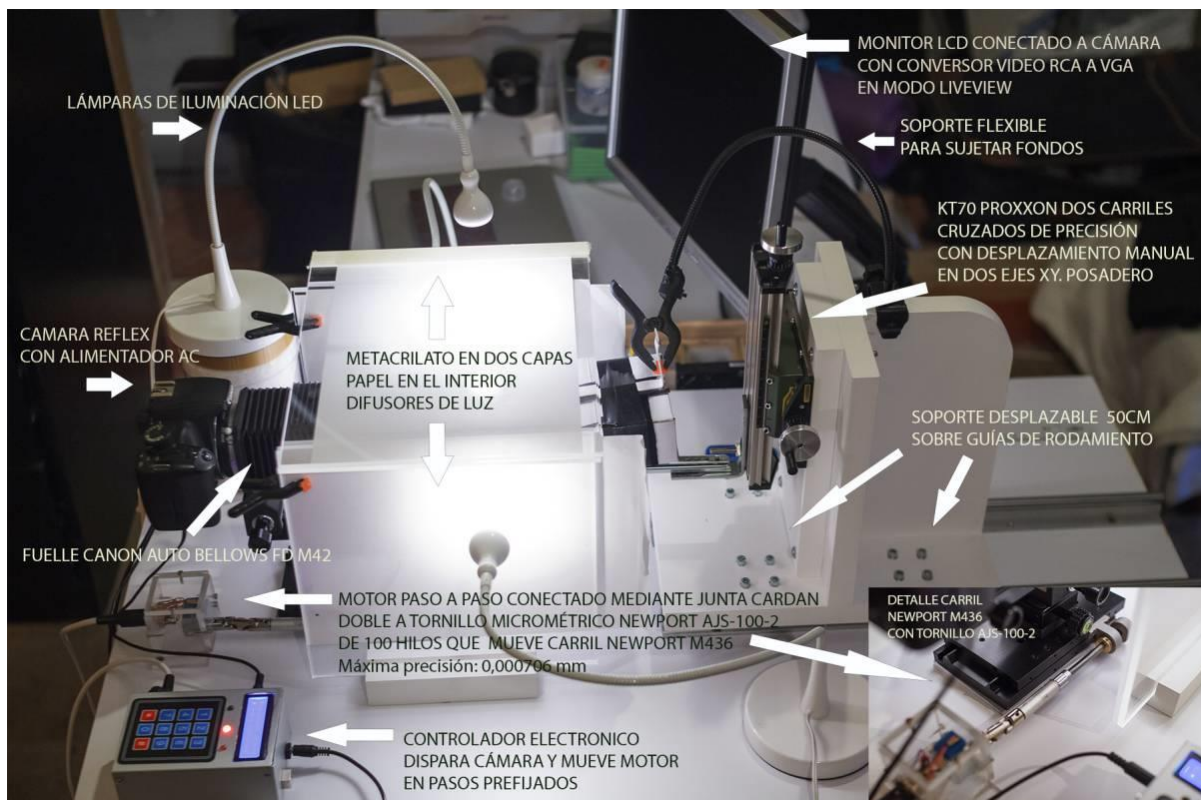


Ilustración 15 Ejemplo de montaje para realizar Focus Stacking (Morenatti, 2017)

Aun así, con este tipo de montajes la repetibilidad del proceso queda en entredicho ya que la posición del objeto a fotografiar se sigue realizando manualmente teniendo control únicamente de la posición en los ejes lineales principales X, Y y Z.

2. DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO

El diseño está enfocado a suplir los defectos y las partes no bordadas por las soluciones tanto comerciales como particulares que existen hasta el momento para la puesta en práctica de la técnica tanto de focus Stacking como de digitalizado 3D fotogrametría. Durante un año y medio de desarrollo del proyecto el prototipo ha sufrido diferentes cambios conceptuales, de forma y fabricación, a continuación, se explicará la evolución del prototipo desde el inicio hasta el estado actual del mismo.

2.1. Versión 1 Posicionador

En primera instancia lo que se buscaba era la orientación completa del objeto en el espacio, como principio básico de funcionamiento se utilizó un giróscopo, los movimientos del giróscopo se controlan mediante motores de corriente continua con una reductora 1:1000 el lazo abierto, de esta forma se conseguía un movimiento incremental del objeto.



Ilustración 16 Primer prototipo funcional

Para el manejo de esta primera versión se desarrolló una tarjeta de expansión para un Arduino uno, ésta constaba de un joystick con pulsador para mover e intercambiar los ejes de giro y un pulsador para intercambiar entre tres velocidades preestablecidas de giro. El funcionamiento de este extrusor manual era complicado ya que había que atender a la pantalla del ordenador y al mando de funcionamiento simultáneamente, por eso se implementaron los controles equivalentes a esta electrónica en un software propio, pudiendo así manejarse de ambas maneras.

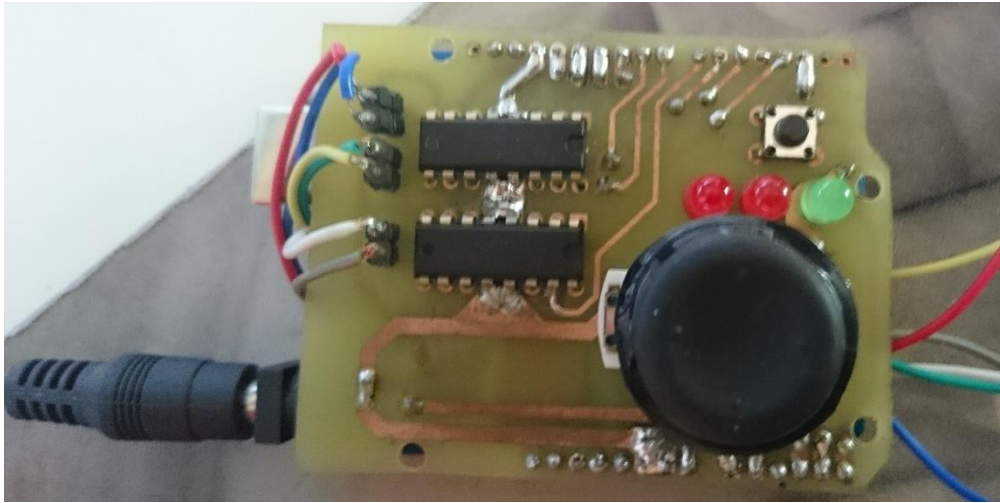


Ilustración 17 Electrónica para el primer prototipo.

Este prototipo presentaba diversos problemas tanto de diseño como de fabricación:

- Holguras debidas a la fabricación por impresión 3D de bajo coste.
- Al realizar los giros los cables de los motores se enroscaban y arrancaban las soldaduras.
- Al tratarse de circunstancias completas, en la mayor parte de las posiciones, el propio dispositivo tapaba el objeto.
- Al igual que en el caso anterior las teleconferencias completas dificultan la correcta iluminación del objeto.
- Con el uso, se advierte de la necesidad del movimiento lineal del objeto en un plano perpendicular a la cámara.

2.2. Versión 2 Posicionador

Para el segundo modelo, se añadió el eje del movimiento vertical, se eliminó la mitad superior de la milla al exterior y se introdujeron elementos metálicos comerciales con el fin de minimizar las holguras en el prototipo.

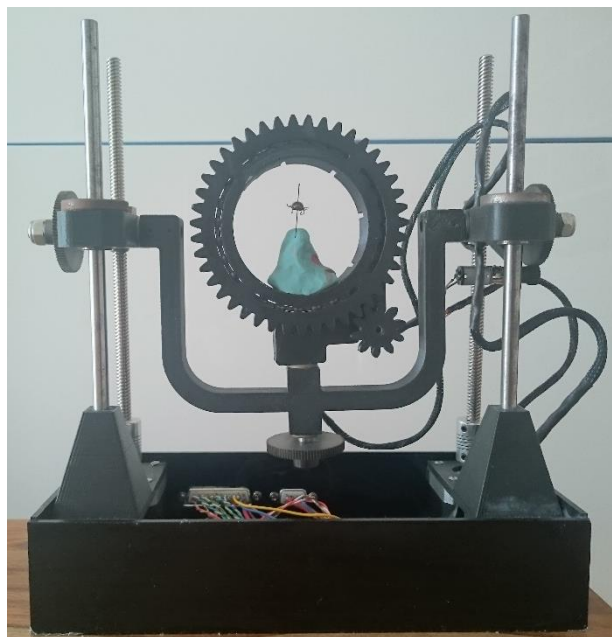


Ilustración 18 Segundo prototipo funcional

En cuanto a la electrónica se eliminó el manejo manual, pasando a ser un dispositivo completamente controlado por ordenador y basado en un Arduino Mega con shields de manejo de motores.

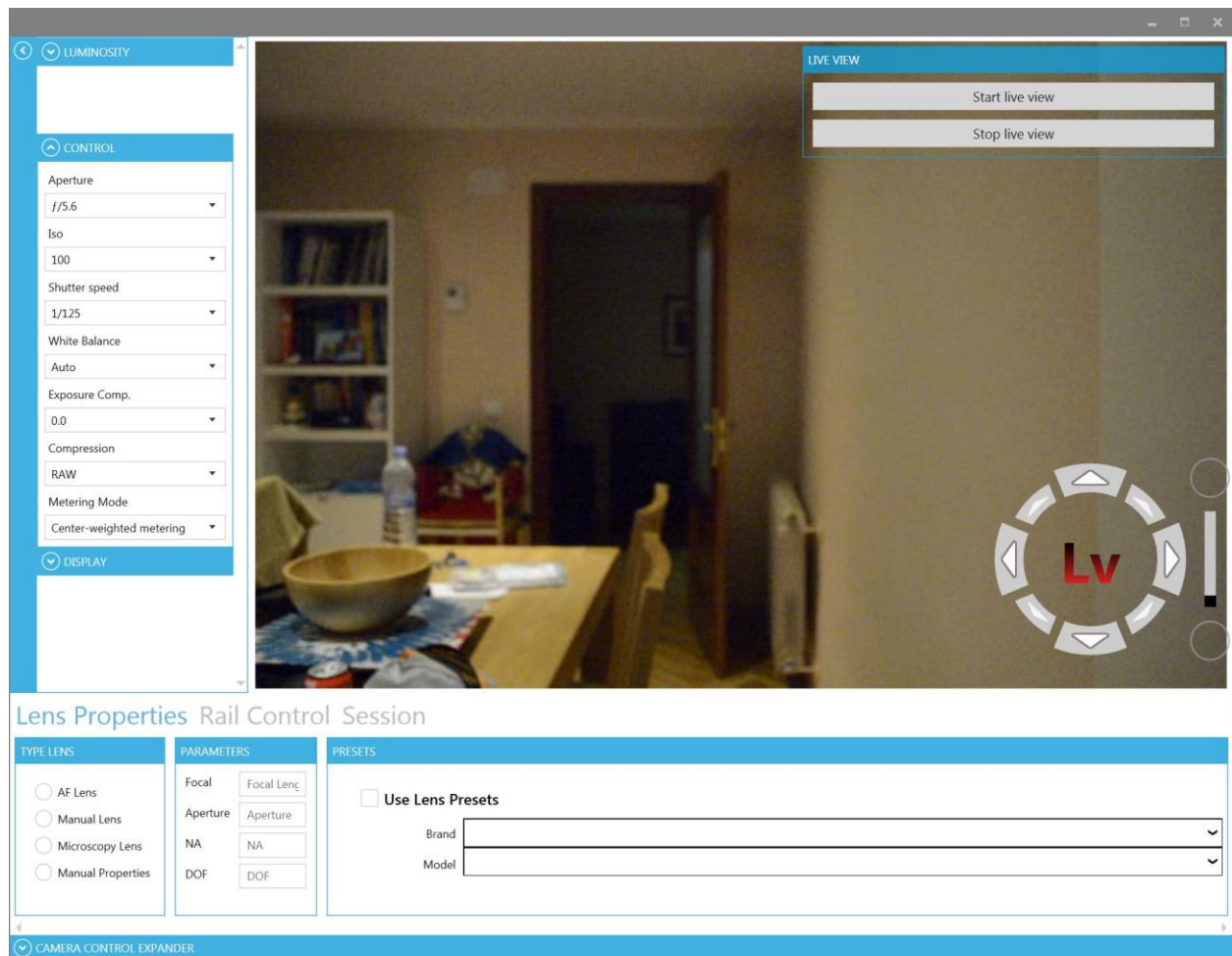


Ilustración 19 Interfaz gráfica del segundo prototipo funcional

El software permite el manejo del aparato y de la cámara simultáneamente de tal forma que se puede sincronizar los movimientos para realizar focus Stacking con el disparo de cámara.

Este prototipo supuso una gran mejora en el funcionamiento con respecto al anterior, pero acaecía del mismo problema con la iluminación al mantenerse el anillo central completo, por otro lado, parte de los dispositivos mecánicos añadían mucho peso y coste innecesarios.

2.3. Versión 3 Posicionador

La tercera versión de este prototipo se ha diseñado pensando en la industrialización del mismo, por lo que tiene una estructura más simplificada y más partes comerciales que los otros dos anteriores, esta manera se consigue una máquina más sólida y fiable que las expuestas hasta el momento.

2.3.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Para esta última versión se ha modificado la forma y el modo de funcionamiento del posicionador, intentando resolver de esta manera resolver los problemas que acarrea van los anteriores, se ha cambiado la estructura de un giróscopo a una muñeca de Euler con todos los ejes de rotación concéntricos situando de esta manera la pieza en el centro de todos ellos.

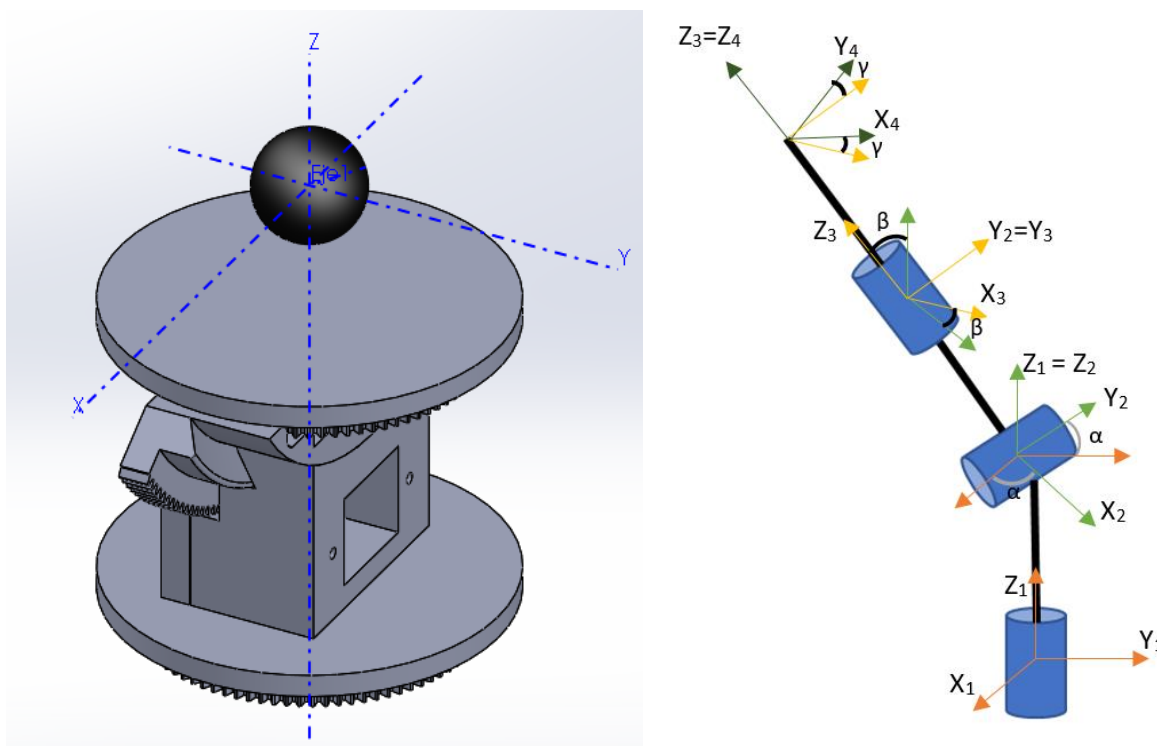


Ilustración 20 Modelo 3D y esquema de muñeca de Euler

Como se observa en la figura anterior la muñeca de Euler estaba formada por tres movimientos de rotación, el primero con respecto al eje Z, el segundo con respecto al eje Y y el tercero con respecto al eje Z una vez realizado sus dos giros anteriores, con esta composición de movimientos se puede alcanzar cualquier posición en el espacio, como se observa la imagen de la izquierda, el segundo giro con respecto al eje Y se realiza con un goniómetro incompleto, esto reduce nuestro espacio de trabajo pero desaparece la problemática en la iluminación y en el acceso a la cámara. El estudio de el movimiento de la muñeca de Euler se encuentra en el anexo 1, siendo este un estudio completo de la matemática aplicada para nuestro caso concreto de aplicación.

2.3.2. DISEÑO MECÁNICO

1- Plato de rotación superior

La base de montajes de este plato es la chapa de aluminio central, sobre la cual va alojada un cojinete dentro del cual derrotó al plato y por el otro lado sujeta el motor que impulsa el conjunto.

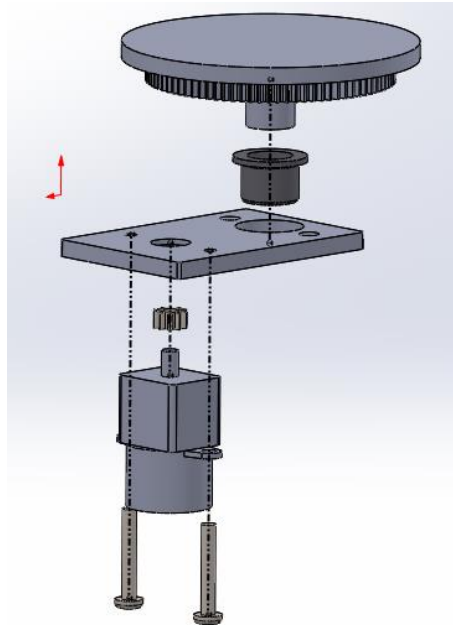


Ilustración 21 Montaje eje de rotación superior

2- Goniómetro

Esta parte está formada por tres piezas fundamentales, el patín sobre el que va montado el plato de rotación superior, y otras dos piezas que forman la guía sobre la que gira goniómetro, esta guía está dividida por motivos de fabricación, para ser realizable por moldeo. La lira también contiene el alojamiento para el motor que el accionar del goniómetro.

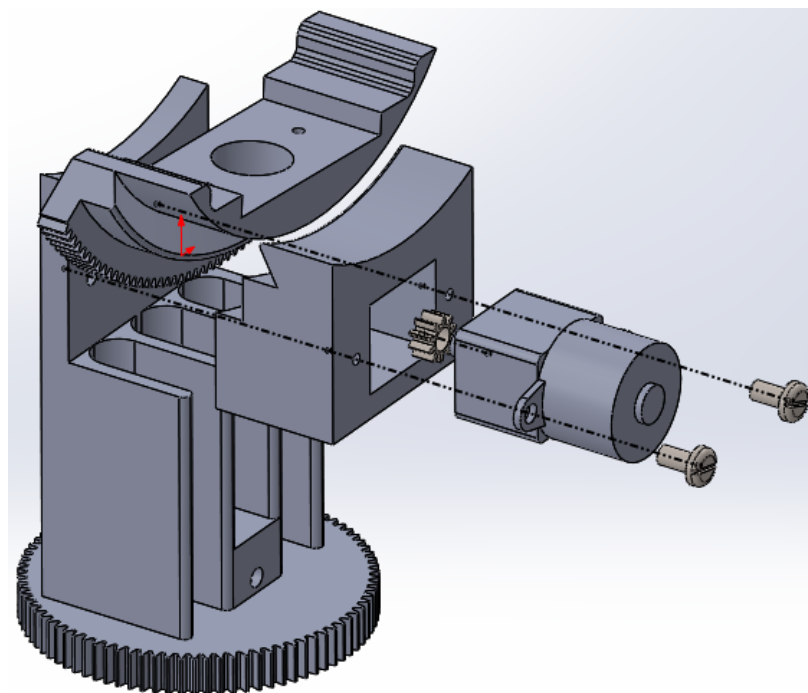


Ilustración 22 Montaje goniómetro

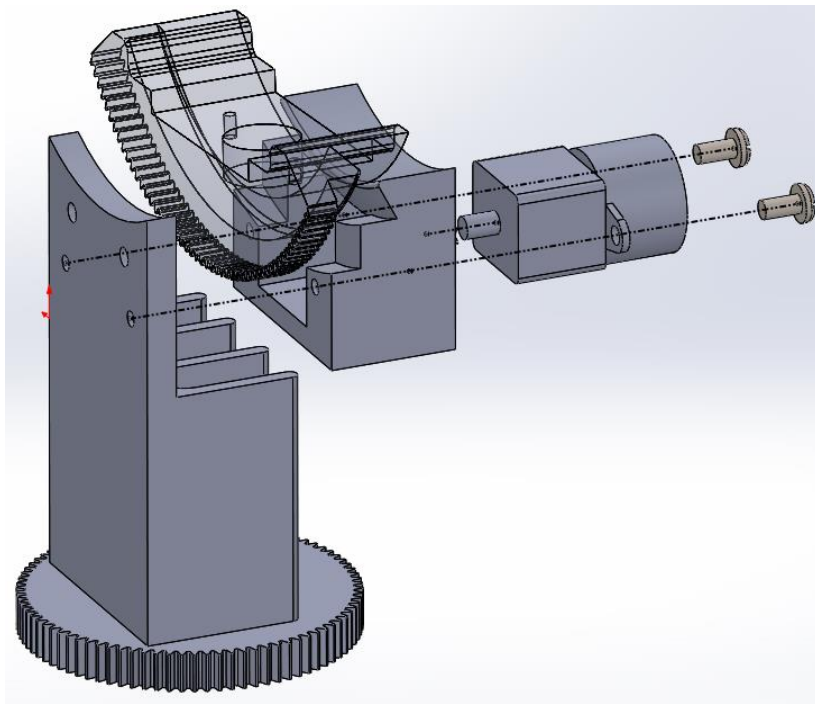


Ilustración 23 Montaje goniómetro 2

La pieza del cierre realiza también la función de separador para que cuando el dispositivo se encuentra en posición abierta sobresalga por encima de la caja, en su base contiene también un engranaje para realizar la rotación de todo el conjunto.

Todo lo anterior va montado sobre el patín de la guía horizontal, como eje de rotación del conjunto anterior se utiliza el eje de un potenciómetro, que va a servir para saber la posición exacta de este eje de rotación, sobre este patín también va anclado el motor que acciona todo el conjunto.

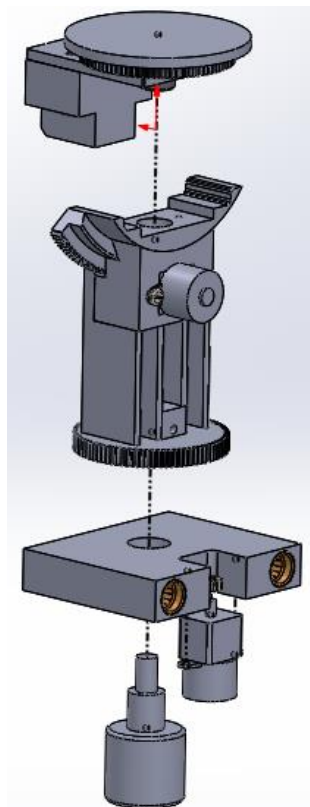


Ilustración 24 Montaje conjunto de la muñeca de Euler

Hasta aquí es el montaje de la muñeca de Euler, por otro lado este subconjunto se puede mover en el plano perpendicular al de disparo de la cámara, el movimiento horizontal se realiza con un piñón cremallera, cuyo motor va colocado en el partido horizontal. El movimiento vertical se realiza con dos guías lineales cada una con su husillo y su motor, situadas a ambos lados de la ría horizontal.

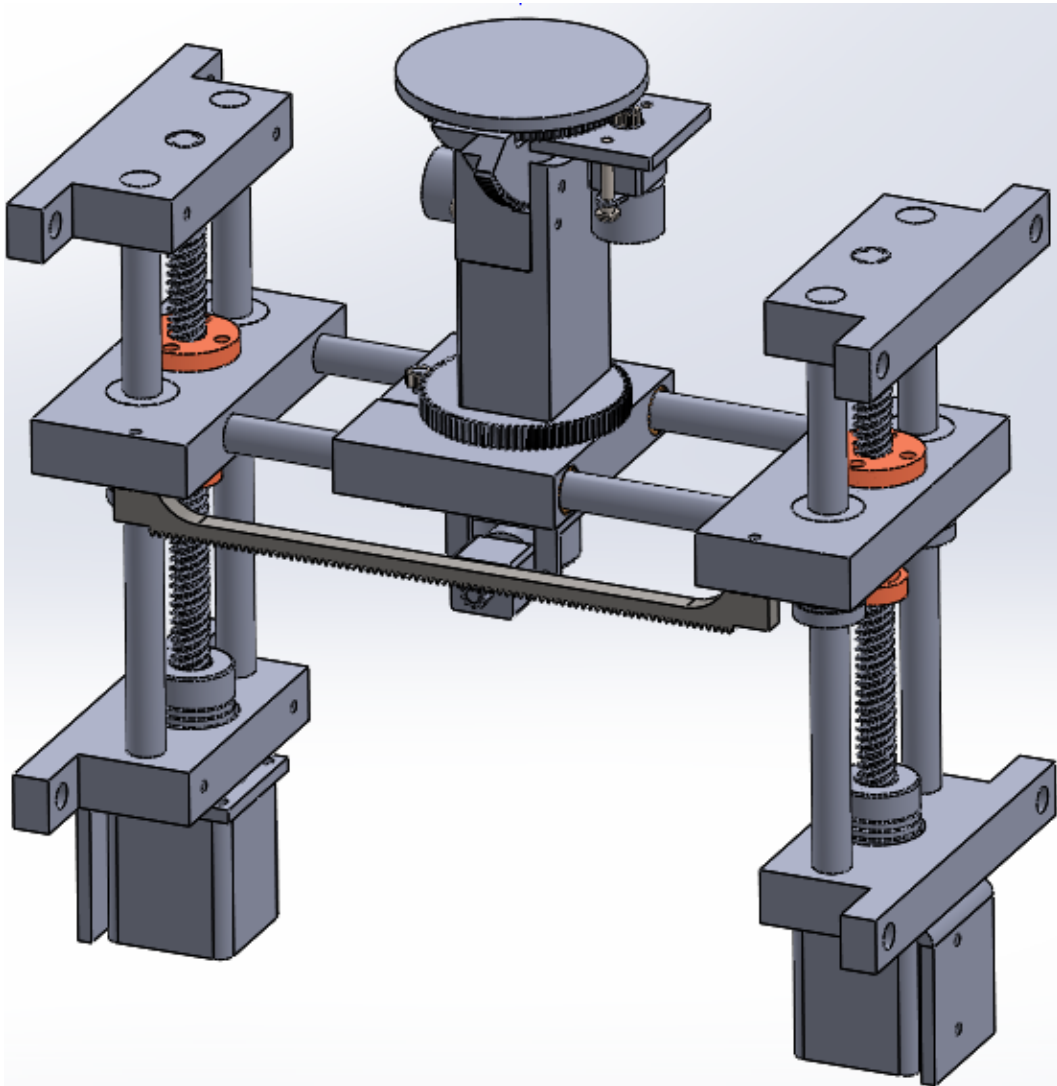


Ilustración 25 Montaje de la estructura fundamental del posicionador

Todo el conjunto se monta dentro de un trozo de tubo de aluminio el cual hace de soporte estructural y a la vez de carcasa.

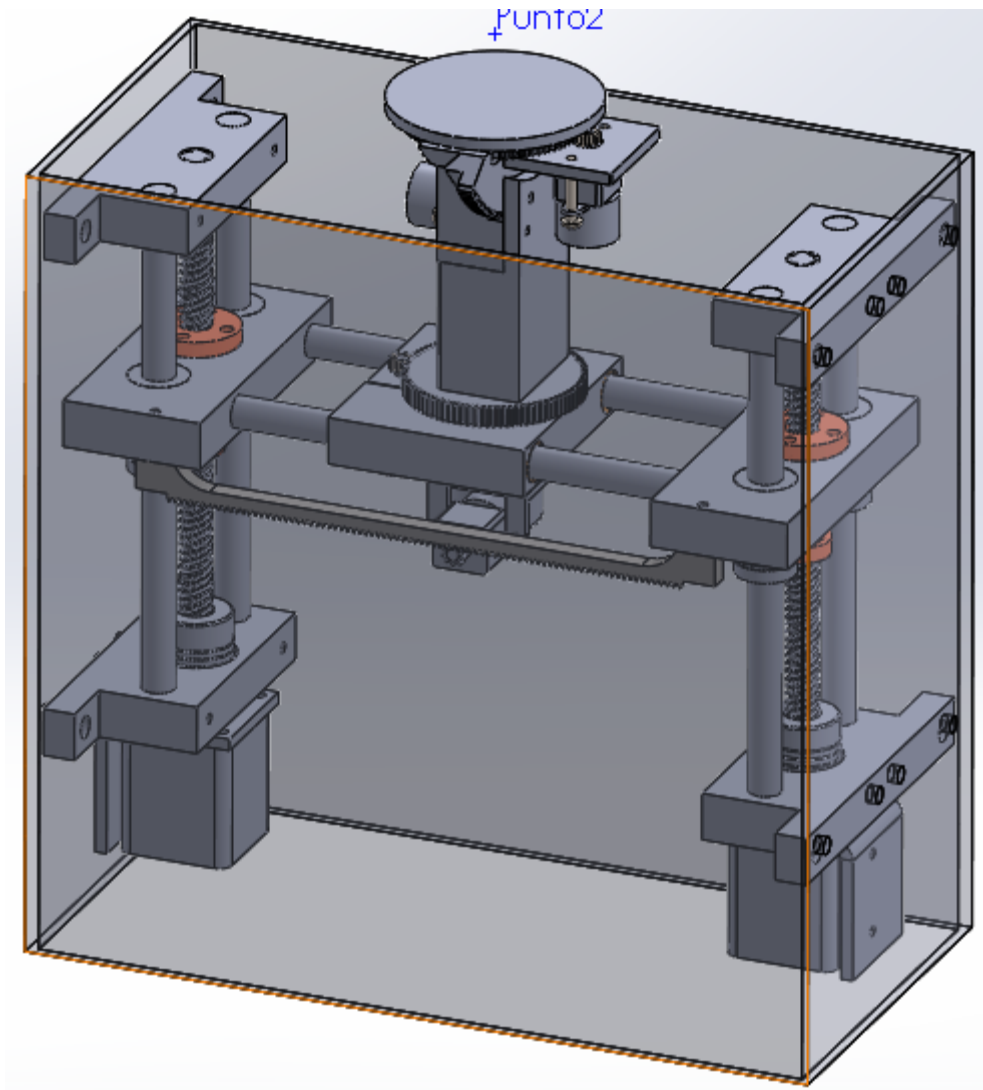


Ilustración 26 Montaje del posicionador

Con el fin de reducir la suciedad y a su vez tapar el interior, se han construido unas chapas que realiza la función de cierre interior, quedando así únicamente a la vista la muñeca de euler y el patín horizontal.

También se ha desarrollado un cierre inferior el cual va a servir de soporte para la electrónica y como cierre del dispositivo.

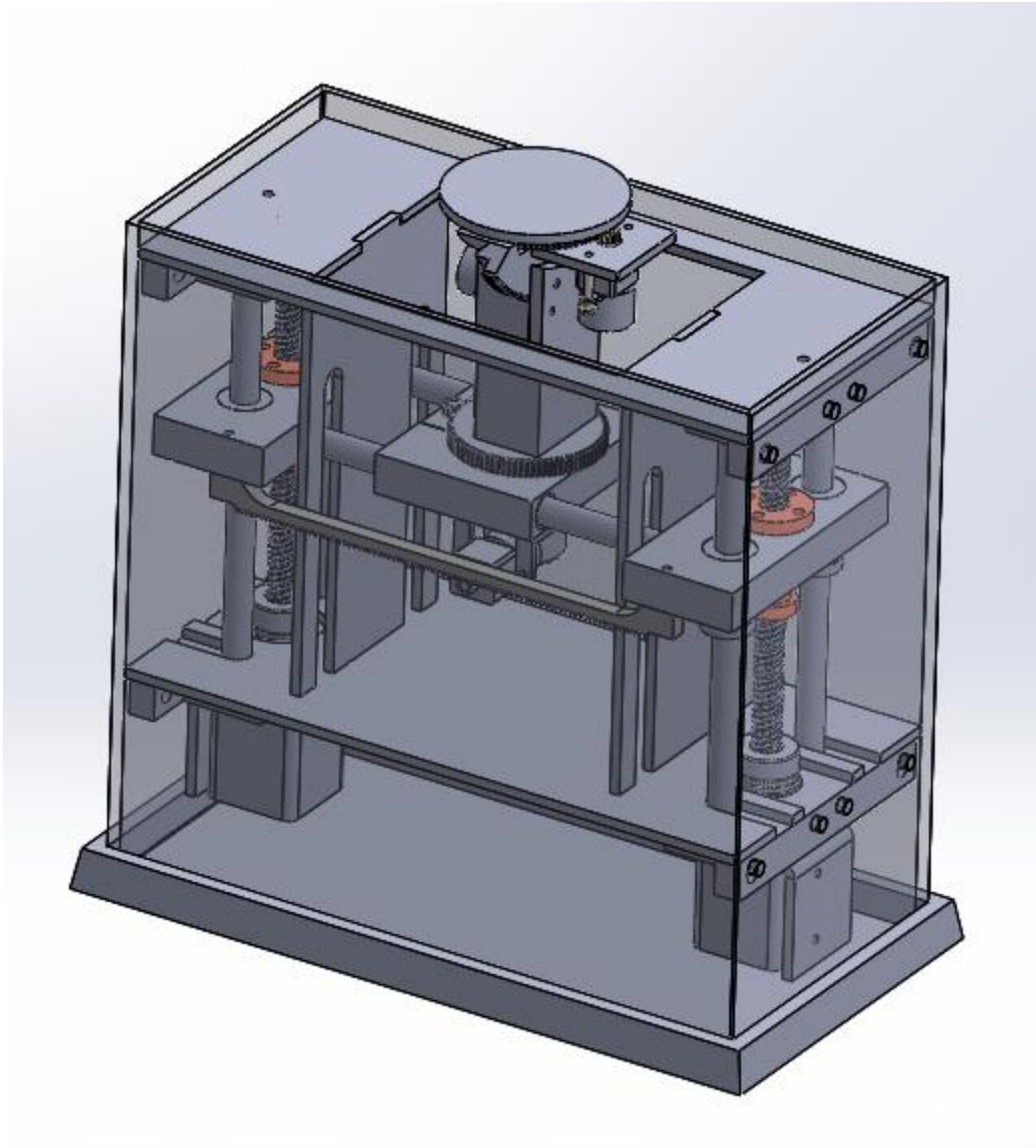


Ilustración 27 Montaje completo de posicionador

2.4. Versión 1 Carril de enfoque

El primer carril de enfoque que se utilizó este proyecto fue la mesa Proxxon KT70

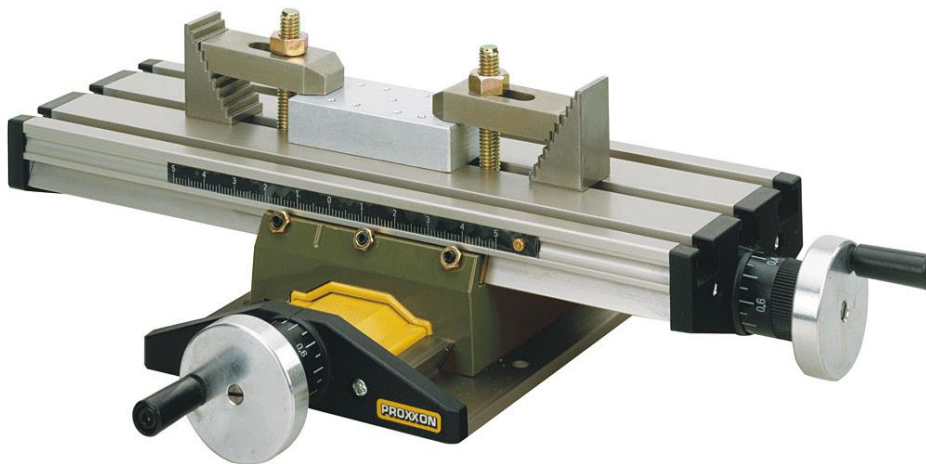


Ilustración 28 Proxxon KT70

A esta mesa se le compraron unos motores en ambos ejes colocados mediante unos separadores y unos acoplamientos, de esta manera, se convirtió una mesa de coordenadas para un fin de mecanizado, en un carril de enfoque automatizado de doble eje como se muestra la siguiente imagen.



Ilustración 29 Carril de enfoque con Proxxon KT70

2.5. Versión 2 Carril de enfoque

Con el fin de realizar una versión de este carril de enfoque más pequeño, ajustado el tamaño de la cámara que se utiliza para este proyecto, se motorizó un carril de enfoque manual de bajo coste y tamaño pequeño



Ilustración 30 Carril de enfoque manual comercial

Este carril está formado por un perfil de los niños tuvieron con forma de doble cola de milano, el cual va guiado en un patín de plástico que tiene un tornillo para ajustar la holgura, por otro lado, tiene una rueda con un piñón que acciona una cremallera de dentado helicoidal. Para colocar el motor se eliminó la rueda y se hizo un acoplamiento del eje al piñón que actúa sobre la cremallera.



Ilustración 31 Carril de enfoque comercial motorizado

Esta segunda versión no tuvo éxito debido a las holguras de los patines y al par necesario que deberían hacer los motores para mover la guía.

2.6. Versión 3 Carril de enfoque

Para la tercera versión, se ha optado por construir por completo el carril, el carril consta por de husillo trapezoidal de ocho milímetros con una tuerca anti-backlash, un guía lineal, un acoplamiento y un motor que acciona el conjunto.

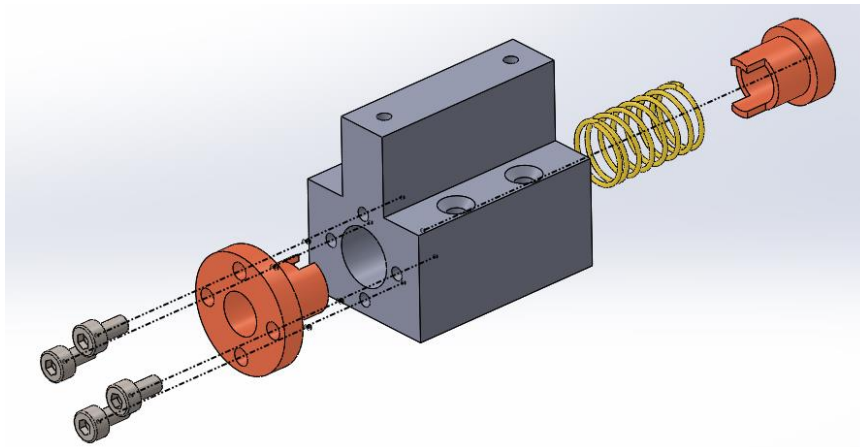


Ilustración 32 Montaje tuerca anti-backlash

La tuerca anti-backlash va sujeta con unos tornillos a una pieza de aluminio que hace de nexo entre el husillo y el patín de la guía lineal.

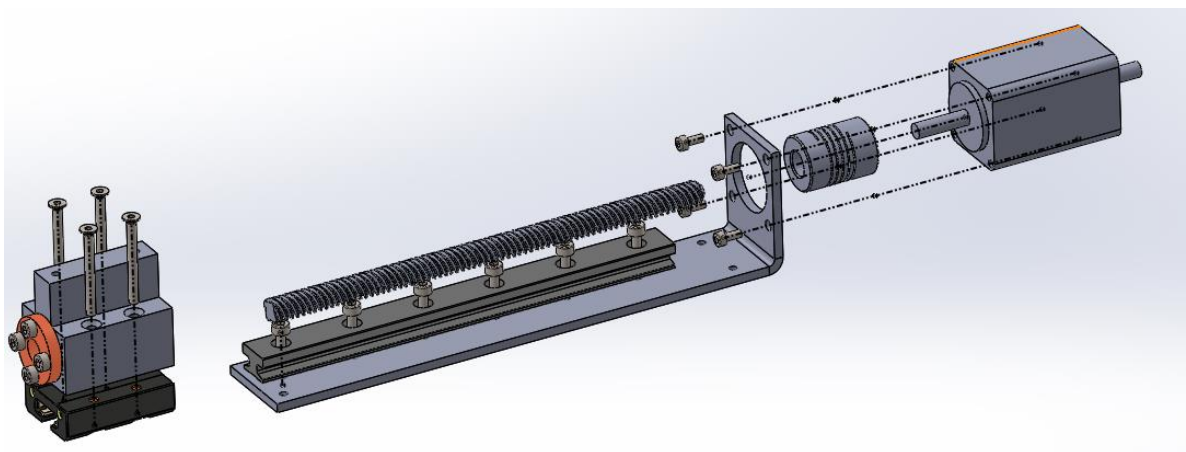


Ilustración 33 Montaje carril de enfoque

Todo el conjunto va montado sobre una chapa de aluminio plegada, de tal manera que se pueda montar por separado y a posteriori introducirlo en la carcasa de cierre.

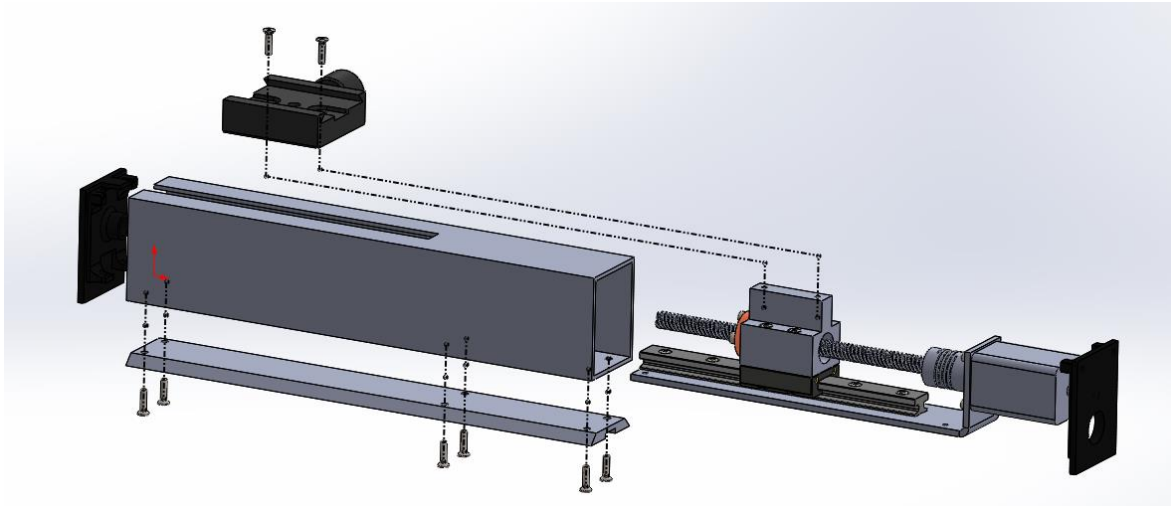


Ilustración 34 Montaje completo carril de enfoque

La carcasa está formada por un tubo de aluminio, una chapa inferior y dos tapas que cierran el tubo, la chapa inferior cumple con el estándar de fotografía Arca Swiss.

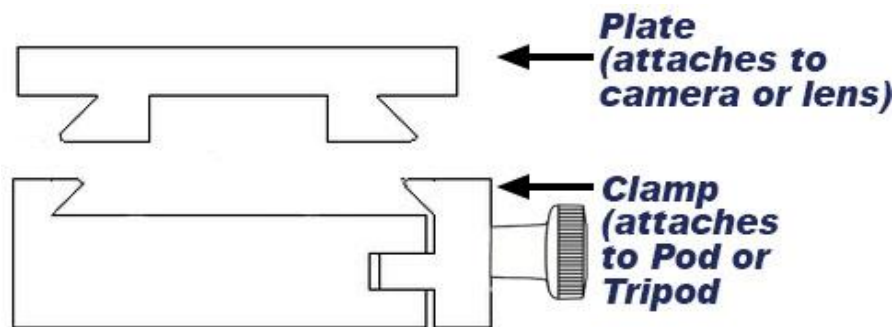


Ilustración 35 estándar Arca Swiss

Se coloca una grapa Arca Swiss en la parte superior de la pieza de aluminio que va acoplada al patín de la guía, así obtenemos un carril de enfoque completamente compatible con el estándar de fotografía más utilizado en la actualidad.

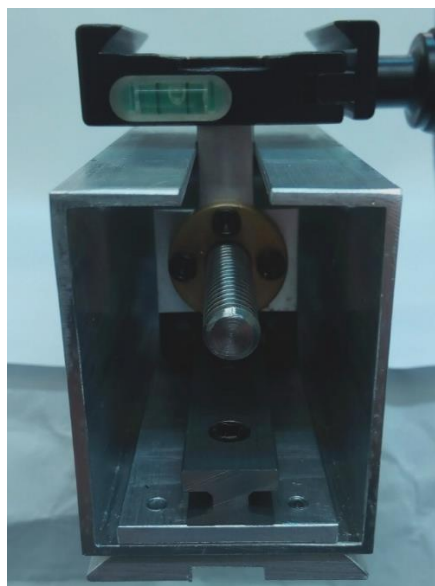


Ilustración 36 Interior carril de enfoque y Arca Swiss

3. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO

La electrónica desarrollada se ha basado en Arduino desde el principio, utilizando tarjetas de expansión tanto comerciales como con diseño propio hasta acabar en un diseño propio de PCB completamente compatible con Arduino.

3.1. Versión 1 Separada en dos Arduinos Uno

Junto con las primeras versiones tanto de posicionador como de carril, se desarrolló una electrónica separada en dos arduinos, el primero de ellos con una tarjeta de expansión propia para manejar los motores de corriente continua del posicionador, esta placa contiene un joystick. con pulsador, que sirve para mover los ejes de rotación, el pulsador del joystick sirve para intercambiar de eje al girar, teniendo dos modos uno para la los dos giros exteriores y otro para la rotación interior, indicándose el modo con el led verde. Por otro lado, tiene un pulsador que sirve para cambiar las velocidades de giro, teniendo 4 preestablecidas de mayor a menor velocidad, la velocidad elegida se muestra con los leds rojos en combinaciones binarias.



Ilustración 37 Electrónica propia del primer prototipo

El otro arduino funciona con una placa para CNC a la que se le pueden poner unos drivers para el manejo de motores paso a paso y que controla los dos ejes del carril de enfoque.

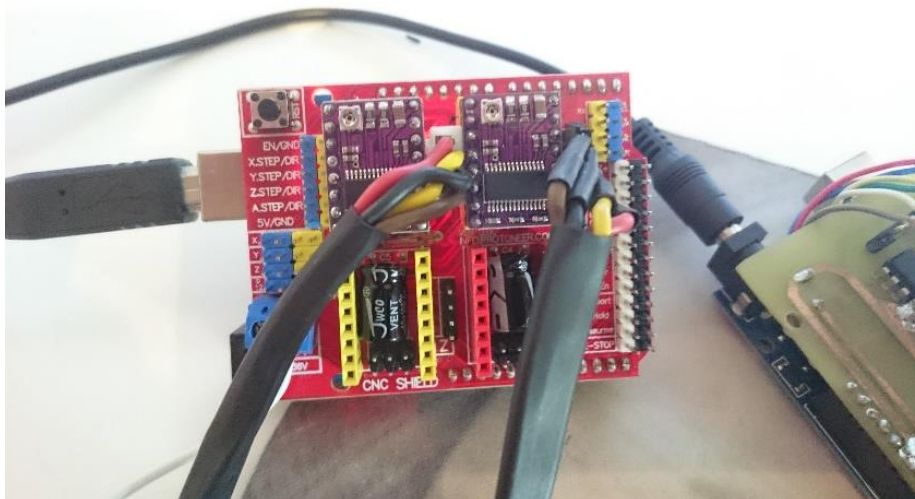
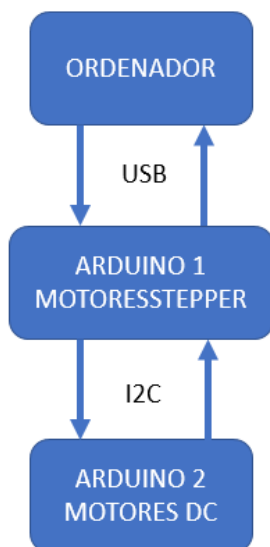


Ilustración 38 Control de Steppers con placa CNC

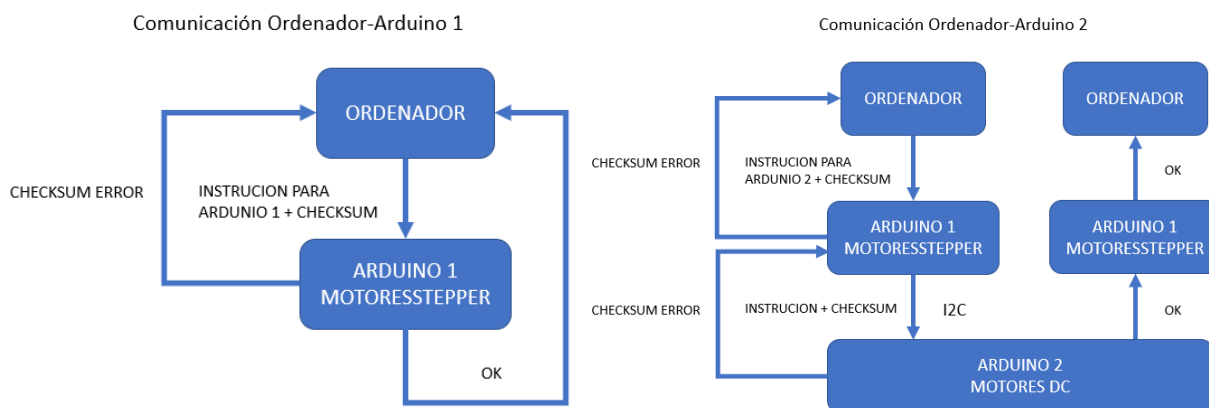
El protocolo de comunicaciones es el siguiente, el ordenador se comunica mediante Arduino por USB, el microcontrolador no maneja este protocolo, así que es necesario un cambio de USB a UART para poder realizar la comunicación, cosa que es interna del Arduino.

Ambos arduinos (a partir de ahora Arduino 1 para el que tiene la placa de CNC y Arduino 2 para el que controla los motores de continua), se comunican entre si mediante I2C.



Cuadro 1 Comunicación Ordenador y Arduinos

Durante el periodo de pruebas se percibió que en la comunicación simple se perdían instrucciones, por lo que se implementó un sistema de checksum para comprobar que las instrucciones recibidas eran correctas y avisar al dispositivo que envía el mensaje para que se envíe otra vez y así no perder instrucciones, no obstante, para que no se perdieran gran número de instrucciones la velocidad tiene que ser baja de 9600 Baudios.



Cuadro 2 Tipos de comunicación

Con las pruebas se llegó a la conclusión de que el uso del joystick era innecesario ya que se podía utilizar todo el conjunto desde el ordenador por lo que se optó por eliminar la placa diseñada y utilizar una comercial de manejo de motores de continua.

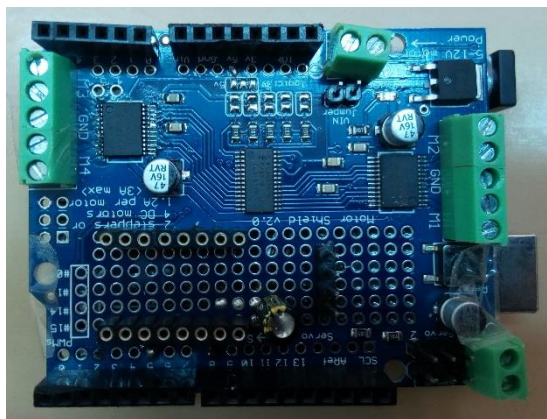


Ilustración 39 Placa de control de motores de continua

3.2. Versión 2 Arduino Mega y Ramps 1.4

Para el último prototipo se utilizó un Arduino Mega con una placa de expansión Ramps 1.4 (Utilizada normalmente como electrónica para las impresoras 3d de bajo coste). Esta placa puede manejar hasta 5 motores de pasos, pero como se necesitan 6, se ha tenido que añadir una placa externa con un driver más y conectarla a los puertos de expansión del Arduino. También se han conectado a la placa los finales de carrera y el potenciómetro para la posición del primer eje de rotación del goniómetro.

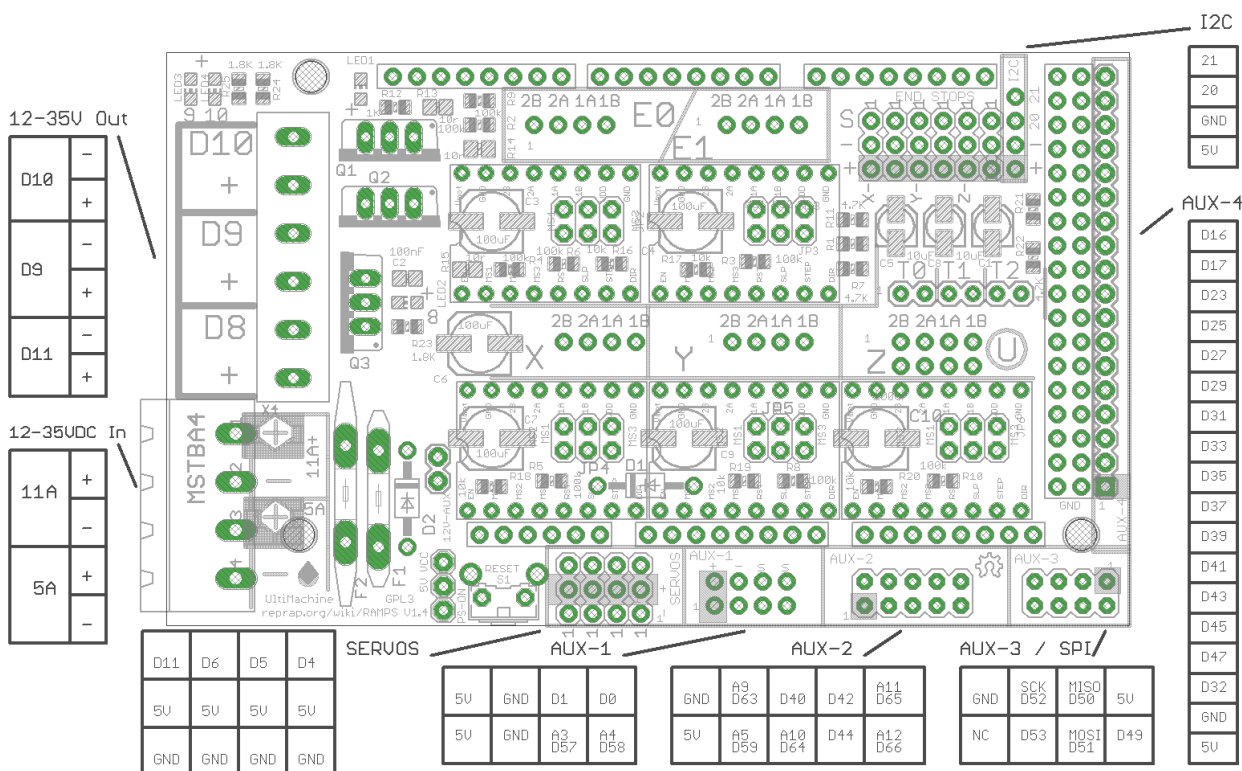


Ilustración 40 Esquema de pines de la Ramps 1.4

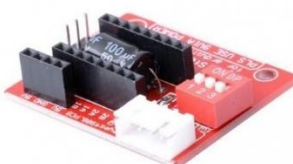


Ilustración 41 Plaquita individual para uso de un motor de pasos

Se utiliza una fuente de 12V que alimenta todos los motores y el Arduino.

En cuanto a los protocolos de comunicación funciona igual que el anterior, pero sin el segundo Arduino de esta manera se ha podido aumentar la velocidad de transmisión de 9600 a 38400 Baudios sin perder instrucciones.

3.3. Versión 3 Placa propia basada en ATmega1280

Basándose en la electrónica anterior, se ha diseñado una placa que realiza las mismas funciones que el conjunto Arduino Mega, Ramps 1.4 y la plaquita de expansión para Steppers. Lo que con lleva es la misma funcionalidad, pero sin ser modular por lo que se consigue un diseño mucho más compacto.

3.3.1. ESQUEMÁTICO

Alimentación

Se utiliza una alimentación general de 12V, que por un lado es la tensión me manejo de los motores y mediante un regulador lineal se convierte a 5V para alimentar la parte lógica del circuito, el microcontrolador, los sensores, las comunicaciones...

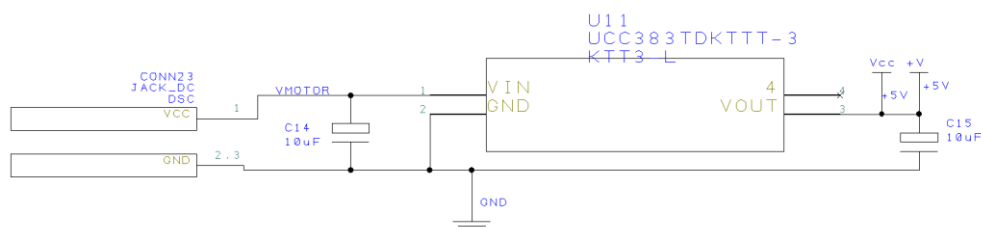


Ilustración 42 Esquemático alimentación

Comunicación

Para mantener la comunicación con el ordenador mediante USB ha sido necesario introducir el chip “CH340G” que sirve de interfaz entre USB y UART que es la comunicación serial principal del ATmega1280. A través de este chip también se puede realizar la programación del microcontrolador, de esta manera queda abierta la posibilidad de realizar actualizaciones del firmware.

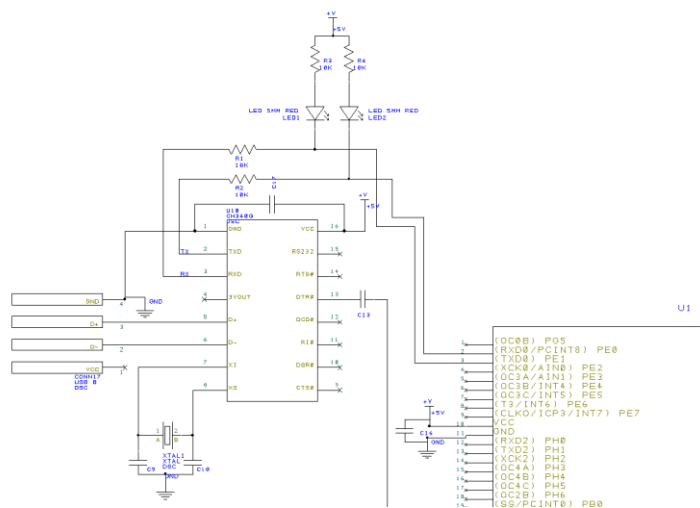


Ilustración 43 Esquemático comunicación serie

Pines auxiliares para comunicación

Con la idea de desarrollar controladores externos al prototipo, se han dejado accesibles en la placa unos pines que dan acceso a los puertos de comunicación UART2 y I2C.

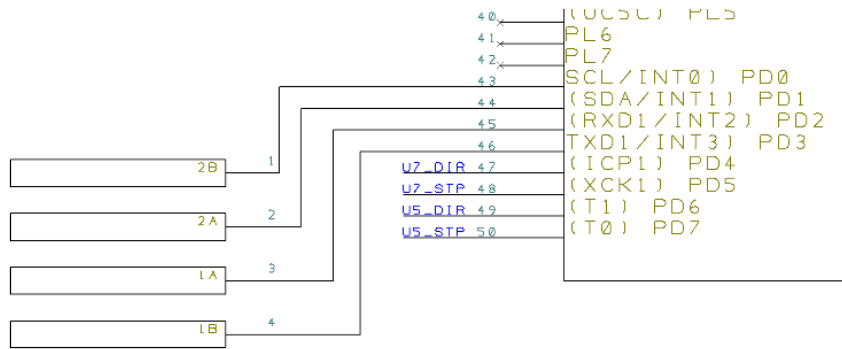


Ilustración 44 Esquemático pines auxiliares de comunicación

Sensores

El prototipo tiene varios sensores, finales de carrera para las guías lineales, éstos hacen la función de referenciar el origen de la máquina y evitan que por errores la maquina se salga de su rango de movimiento impidiendo que sufra daños. Tiene un potenciómetro que funciona como eje de rotación del conjunto de la muñeca de Euler y sirve para conocer la posición del primer eje de rotación de la misma. Para referenciar el goniometro se utiliza un sensor de barrera

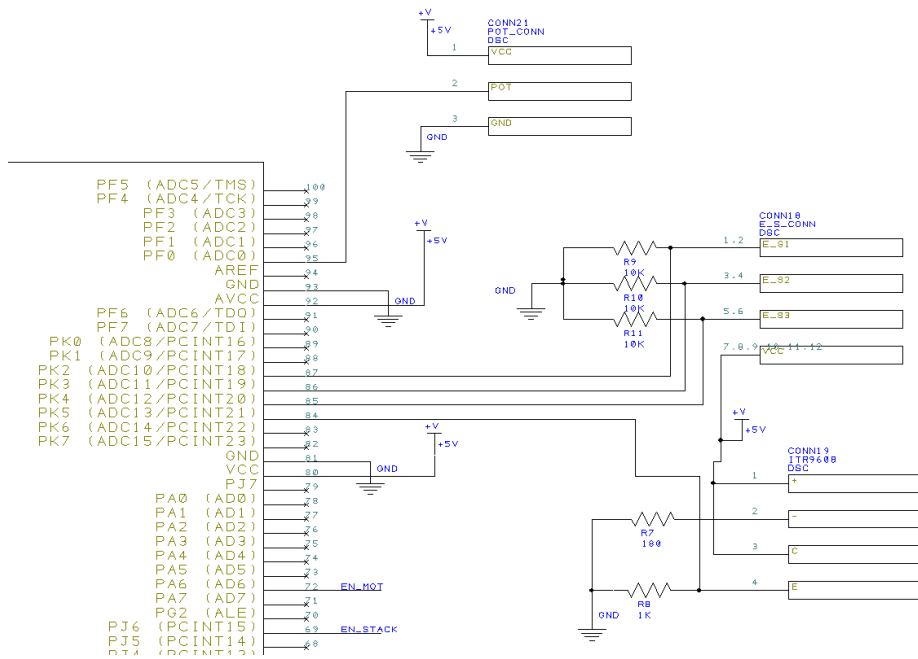


Ilustración 45 Esquemático conexión sensores

Drivers para motores Stepper

Se prepara los componentes y el zócalo para unos drivers comerciales intercambiables, en concreto el DRV8825 los cuales necesitan lo siguiente:

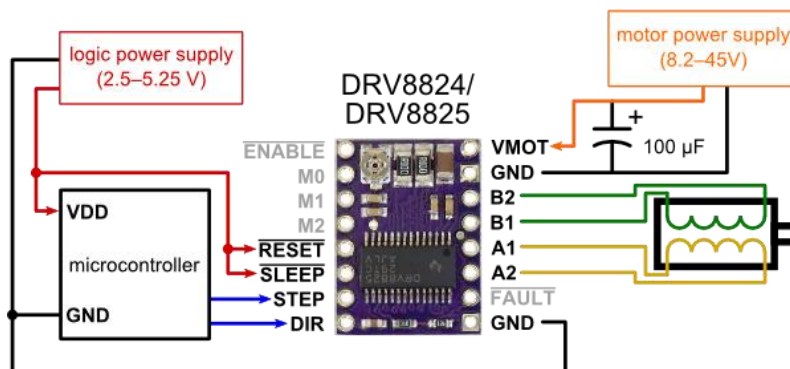


Ilustración 46 Conexión driver DRV8825

Se realizan las conexiones entre el zócalo para estas plaquitas y el microcontrolador

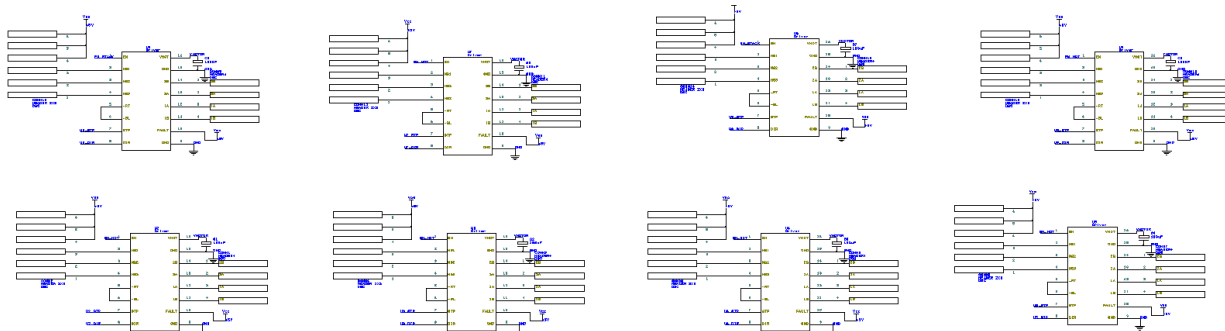


Ilustración 47 Esquemático conexión de todos los drivers

Conjunto

Este es el diseño final del conjunto con todas las conexiones

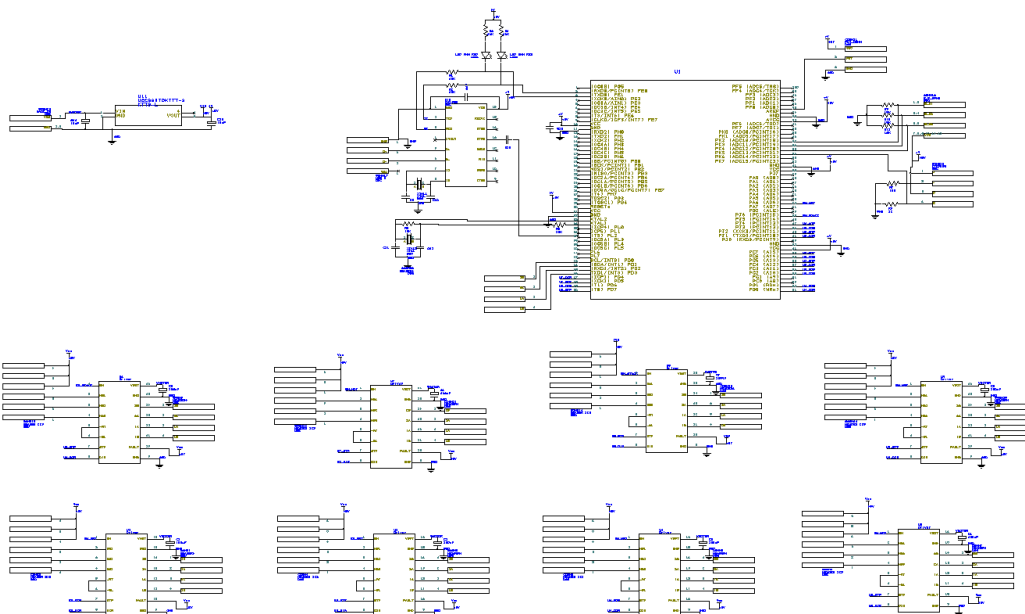


Ilustración 48 Esquemático completo

3.3.2. PCB

Se ha ruteado la PCB para su posterior fabricación:

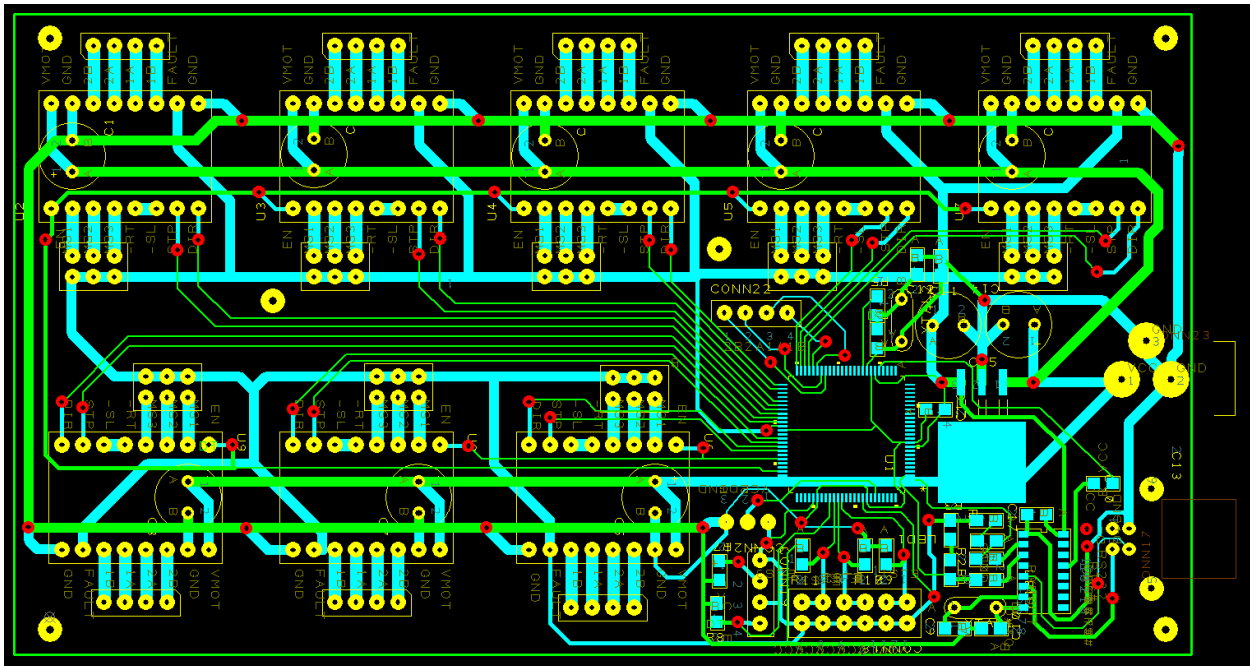


Ilustración 49 PCB

3.3.3. MONTAJE Y RESULTADO:

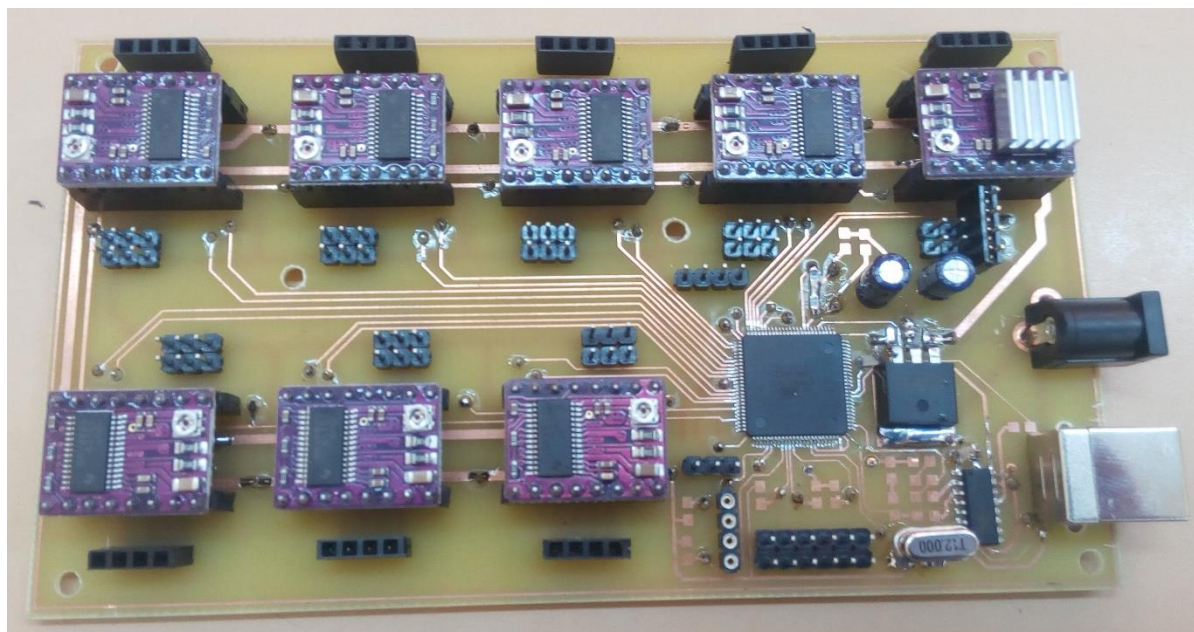


Ilustración 50 Placa construida

4. FABRICACION DEL PROTOTIPO

Como se ha comentado anteriormente, este prototipo ha sido pensado con el fin de poder realizar series pequeñas de unos 10 o 15 aparatos de forma rápida y económica

4.1. Replicado en resina

Esta técnica es muy usada en piezas de modelismo, pero la información existente sobre ella es muy escasa, por lo que partiendo de la base que es la colada simple por gravedad, se han ido realizando diferentes pruebas hasta conseguir el perfeccionamiento de la técnica:

4.1.1. COLADA SIMPLE POR GRAVEDAD

- a) Se coloca la pieza en un recipiente y se sujeta en el fondo (se puede utilizar cinta de doble cara).
- b) En un recipiente se mezcla la silicona con el agente de curado en las proporciones que el fabricante dicte y se revuelve bien la mezcla.
- c) Se vierte la silicona en el recipiente hasta que cubra la pieza a replicar por completo.
- d) Se deja secar la silicona el tiempo que el fabricante dicte.
- e) Una vez pasado ese tiempo se extrae la pieza original quedando el hueco en la silicona.
- f) Se prepara la resina en un recipiente, en mi caso se utilizó una resina de poliuretano de dos componentes que hay que mezclas a partes iguales. Se vierten las dos partes en el recipiente y se mezclan bien.
- g) Se vierte en el molde de silicona y se espera el tiempo dictado por el fabricante.
- h) Por último, se extrae la réplica del molde.

Los resultados de este procedimiento son pobres debido a la acumulación de burbujas



Ilustración 51 Pieza con burbujas resultado de colada simple

Los efectos de las burbujas son más severos con las siliconas rápidas y con las resinas lentas, en cuanto a la silicona si se utiliza una lenta se deja tiempo a que las burbujas salgan a la superficie y se minimiza su efecto, en cambio en la resina, la reacción lenta de la resina produce microburbujas que empeoran la calidad superficial.

4.1.2. COLADA POR GRAVEDAD Y VACÍO

Se construyó una campana de vacío a partir de una bomba de vacío disponible y una campana de metacrilato, como base se usó una chapa de acero inoxidable y se cortó una junta para sellar la campana.

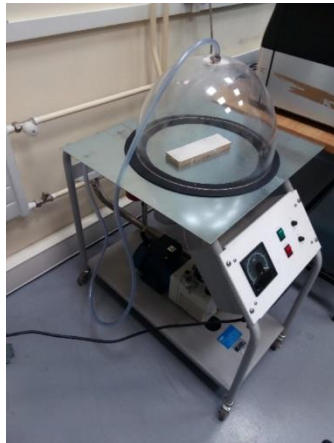


Ilustración 52 Campana de vacío

Procedimiento:

- a) Se coloca la pieza en un recipiente y se sujeta en el fondo (se puede utilizar cinta de doble cara).
- b) En un recipiente se mezcla la silicona con el agente de curado en las proporciones que el fabricante dicte y se revuelve bien la mezcla.
- c) Se vierte la silicona en el recipiente hasta que cubra la pieza a replicar por completo.
- d) Se hace vacío al molde, teniendo en cuenta que al aplicar vacío la silicona sube.
- e) Se deja secar la silicona el tiempo que el fabricante dicte.
- f) Una vez pasado ese tiempo se extrae la pieza original quedando el hueco en la silicona.
- g) Se prepara la resina en un recipiente, en mi caso se utilizó una resina de poliuretano de dos componentes que hay que mezclas a partes iguales. Se vierten las dos partes en el recipiente y se mezclan bien.
- h) Se vierte en el molde de silicona
- i) Se aplica vacío y se espera el tiempo dictado por el fabricante.
- j) Por último, se extrae la réplica del molde.

Este procedimiento extrae las burbujas grandes de la silicona, pero no las pequeñas, en cuanto a la resina no tiene efecto ya que no se acumulan burbujas grandes.

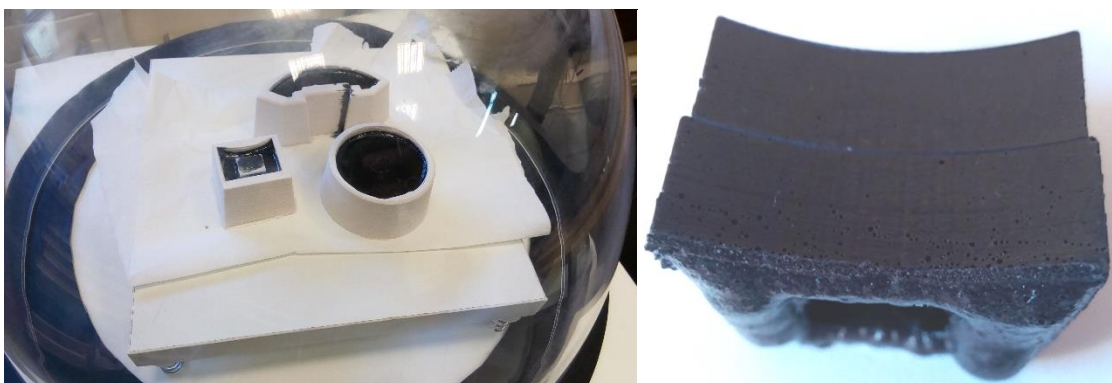


Ilustración 53 Piezas en la campana de vacío y resultado con microburbujas

4.1.3. COLADA CON VACÍO Y GRAVEDAD

- a) Se coloca la pieza en un recipiente y se sujeta en el fondo (se puede utilizar cinta de doble cara).
- b) En un recipiente se mezcla la silicona con el agente de curado en las proporciones que el fabricante dicte y se revuelve bien la mezcla.
- c) Se realiza vacío a la mezcla para sacarle el aire.
- d) Se vierte la silicona en el recipiente hasta que cubra la pieza a replicar por completo, vertiéndola en una esquina de forma suave e intentando no realizar atrapamientos grandes de aire.
- e) Se deja secar la silicona el tiempo que el fabricante dicte.
- f) Una vez pasado ese tiempo se extrae la pieza original quedando el hueco en la silicona.
- g) Se prepara la resina en un recipiente, en mi caso se utilizó una resina de poliuretano de dos componentes que hay que mezclar a partes iguales. Se vierten las dos partes en el recipiente y se mezclan bien.
- h) Se realiza vacío a la mezcla para sacarle el aire.
- i) Se vierte en el molde de silicona
- j) Se aplica vacío y se espera el tiempo dictado por el fabricante.
- k) Por último, se extrae la réplica del molde.

Los resultados obtenidos en la silicona son muy buenos eliminando por completo las burbujas, en cambio no sirve para la resina ya que al extraerle el aire la resina reacciona y se queda dura imposibilitando el vertido, por lo que el método solo es aplicable hasta el punto “e”. En cuanto a la calidad superficial de la pieza es buena excepto que sufre de pérdida de los detalles pequeños.



Ilustración 54 Resultado con defectos de detalle

En la imagen se observa que parte de los dientes están rellenos de material.

4.1.4. COLADA SIMPLE CON VACÍO Y PRESIÓN

Se construyó una cámara de presión con una olla exprés y un inflador, con el cual se mira la presión, se inyecta y se extrae el aire del compresor.



Ilustración 55 Cámara de presión

Teniendo en cuenta lo aprendido hasta el momento y la información adquirida, se mejora el método anterior.

Procedimiento:

- a) Se coloca la pieza en un recipiente y se sujeta en el fondo (se puede utilizar cinta de doble cara).
- b) En un recipiente se mezcla la silicona con el agente de curado en las proporciones que el fabricante dicte y se revuelve bien la mezcla.
- c) Se realiza vacío a la mezcla para sacarle el aire.
- d) Se vierte la silicona en el recipiente hasta que cubra la pieza a replicar por completo, vertiéndola en una esquina de forma suave e intentando no realizar atrapamientos grandes de aire.
- e) Se introduce el recipiente con la silicona en la cámara de presión a 1 Bar.
- f) Se deja secar dentro la silicona el tiempo que el fabricante dicte.
- g) Una vez pasado ese tiempo se extrae la pieza original quedando el hueco en la silicona.
- h) Se prepara la resina en un recipiente, en mi caso se utilizó una resina de poliuretano de dos componentes que hay que mezclas a partes iguales. Se vierten las dos partes en el recipiente y se mezclan bien.
- i) Se vierte en el molde de silicona y se espera el tiempo dictado por el fabricante.
- j) Se introduce el molde de silicona en la cámara de presión a 1 Bar.
- k) Se espera el tiempo dictado por el fabricante sin sácalo de la cámara de presión.
- l) Por último, se extrae la réplica del molde.

La réplica es casi perfecta, el vacío de la mezcla de silicona extrae las burbujas, el aplicar presión a la silicona hace que ésta reproduzca mejor la forma exterior de la pieza y al aplicar presión sobre la resina vertida las microburbujas se comprimen tanto que pasan a ser inapreciables.

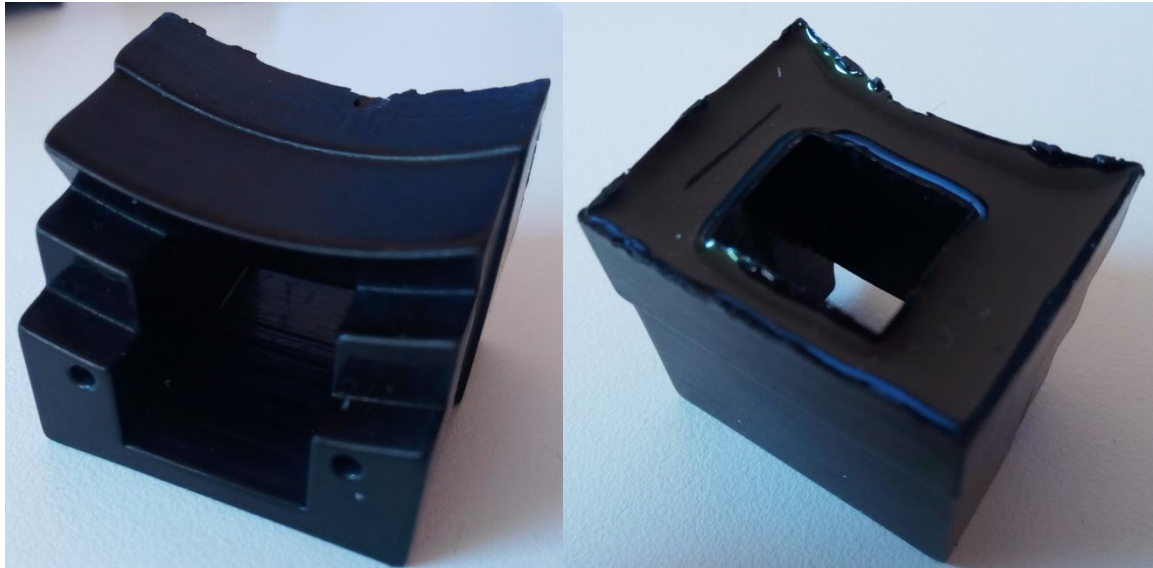


Ilustración 56 Réplicas finales

La calidad superficial de las piezas es perfecta, pero presentan un pequeño problema de escala de entorno al 1%, debido a la reacción química exotérmica de solidificación de la resina al enfriar se produce contracción del material, este defecto no se ha podido solucionar hasta el momento, pero se reduce con la presión, la presión de la olla exprés está limitada a 1 Bar, se ha comprado un calderín de presión que puede llegar a 3.5 Bares, pero aún no se han realizado las pruebas.



Ilustración 57 Calderín de presión

4.2. Mecanizado

Las carcasas tanto del carril de enfoque como del posicionador son tubos cuadrados de aluminio mecanizados en fresadora, para hacer los agujeros para los tornillos de soporte de los componentes internos.



Ilustración 58 Mecanizado en fresadora de chapa Arca Swiss

También se mecanizó el patín de la guía horizontal, la chapa interna del carril de enfoque que sirve de enlace para todos los componentes, el bloque que une la guía lineal con la tuerca del husillo y la chapa de adaptación el estándar Arca Swiss.

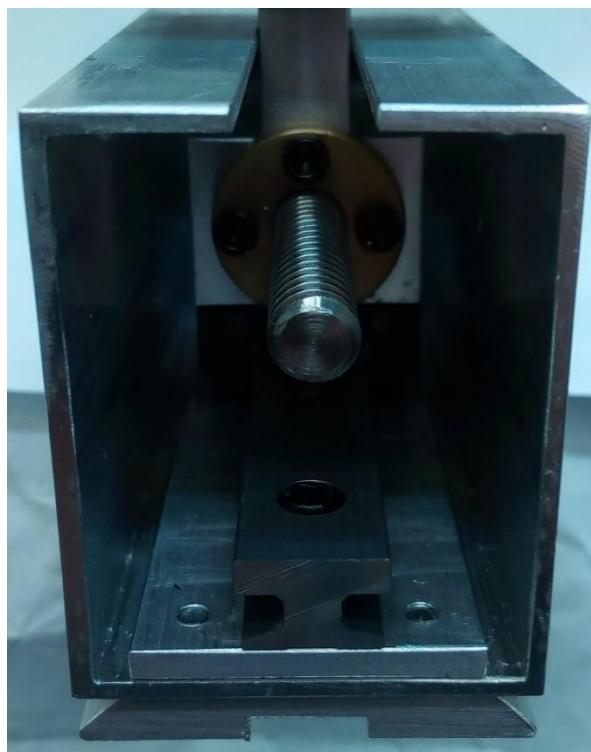


Ilustración 59 Resultado final Arca Swiss

4.3. Corte por laser

Las chapas de cierre interior del posicionador son portadas por láser.

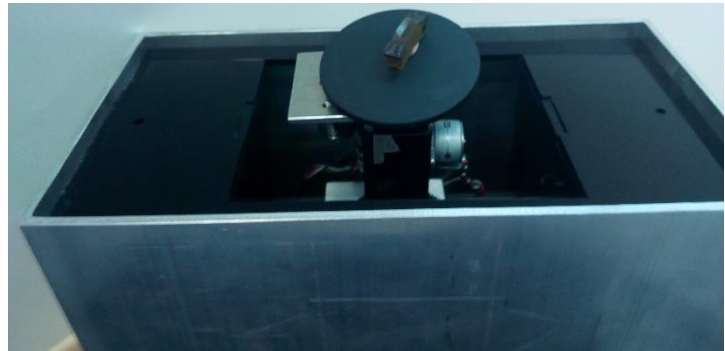
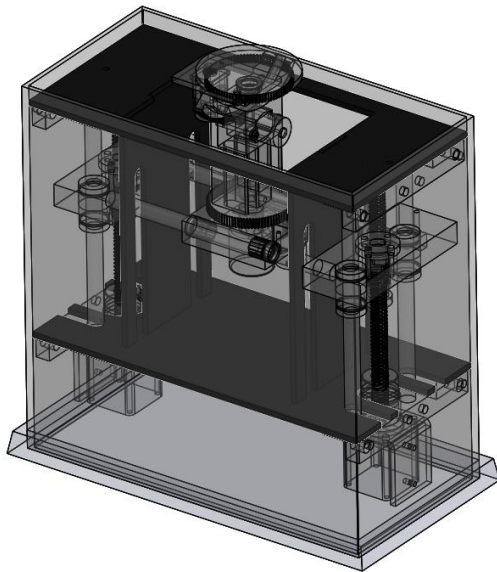


Ilustración 60 Modelo 3d y resultado de las chapas de cierre

El proceso para el corte laser es el siguiente:

- 1- Se diseña la pieza en el CAD y se genera un plano
- 2- Se escala el plano a la misma distancia que el tamaño del haz del láser para que al cortar compense la cantidad de material que corta. La escala exterior hacia afuera y la interior hacia a dentro.
- 3- Se exporta en DXF
- 4- La máquina realiza el corte siguiendo las líneas del DXF.

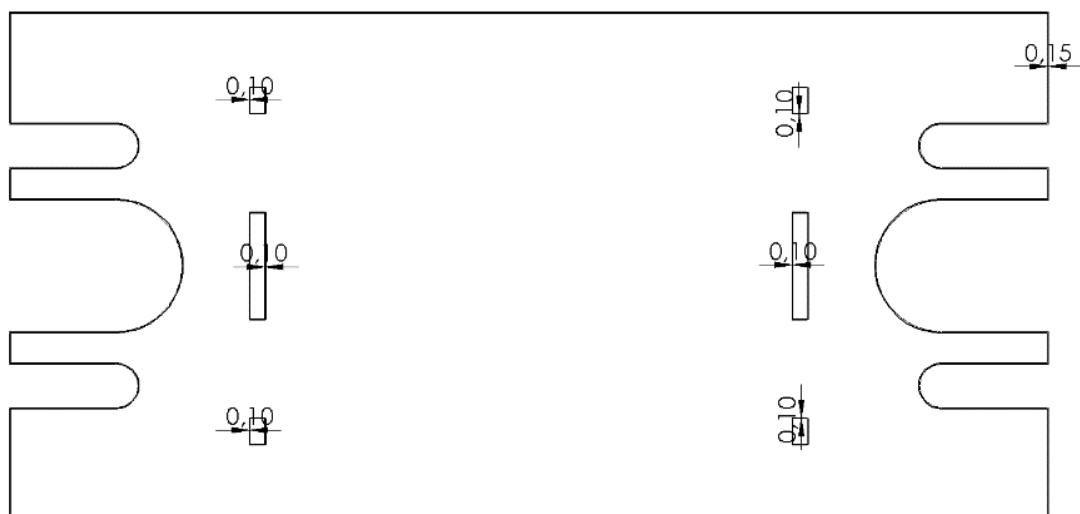


Ilustración 61 Compensación del haz laser



Ilustración 62 Máquina de corte por láser

4.4. Componentes comerciales

Con el fin de reducir costes y simplificar el proceso productivo se han usado gran variedad de componentes comerciales.

4.4.1. MECÁNICA

Para el posicionador se han utilizado los siguientes componentes:

- a) Cojinete lineal de bolas LM8UU

Se utilizan para las guías de movimiento vertical.

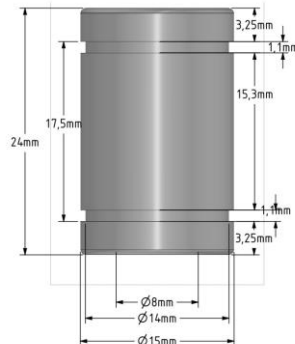


Ilustración 63 Cojinete lineal LM8UU

- b) Husillo TR8x2
- c) Tuerca Anti-backlash

Está formado por dos tuercas que giran solidariamente, y entre ellas se coloca un muelle de compresión tensado, haciendo que el filete de la tuerca siempre esté en contacto con el husillo.



Ilustración 64 Tuerca Anti-backlash

- d) Acoplamiento flexible
- e) Eje de Aluminio 8mm
- f) Tubo de aluminio 200x100x2.5
- g) Tornillería

Para el carril de enfoque se han utilizado:

- a) Husillo TR8x2
- b) Tuerca Anti-backlash
- c) Acoplamiento flexible
- d) Motor de Pasos Nema 11
- e) Guía lineal IGUS TKE_04_12_1_145_2



Guía lineal de perfil bajo drylin® T, versión ajustable, tamaño 12.

Guía lineal en miniatura drylin® T versión ajustable, tamaño 12, máxima precisión en sólo 8 pasos.

En los carros en miniatura TWE-04-12 de tamaño 12, la holgura del cojinete lineal, puede ajustarse fácilmente con la ayuda de un destornillador:

- Holgura del Cojinete ajustable
- libres de lubricante y de mantenimiento
- Altamente resistente a la corrosión gracias a su revestimiento electroforético.
- Funcionamiento silencioso
- Forma de construcción compacto



Ilustración 65 Guías lineales IGUS

- f) Grapa Arca Swiss



Ilustración 66 Grapa comercial Arca Swiss

d) Microstepper con reductora 1:125

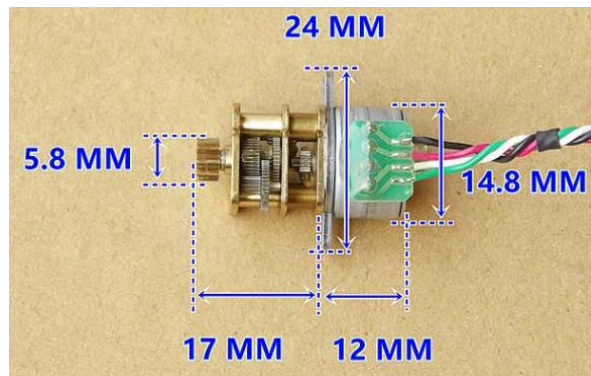


Ilustración 70 Microstepper

4.5. Resultado final

Con todos estos procesos se obtiene el siguiente resultado final:



Ilustración 71 Resultado final del carril de enfoque

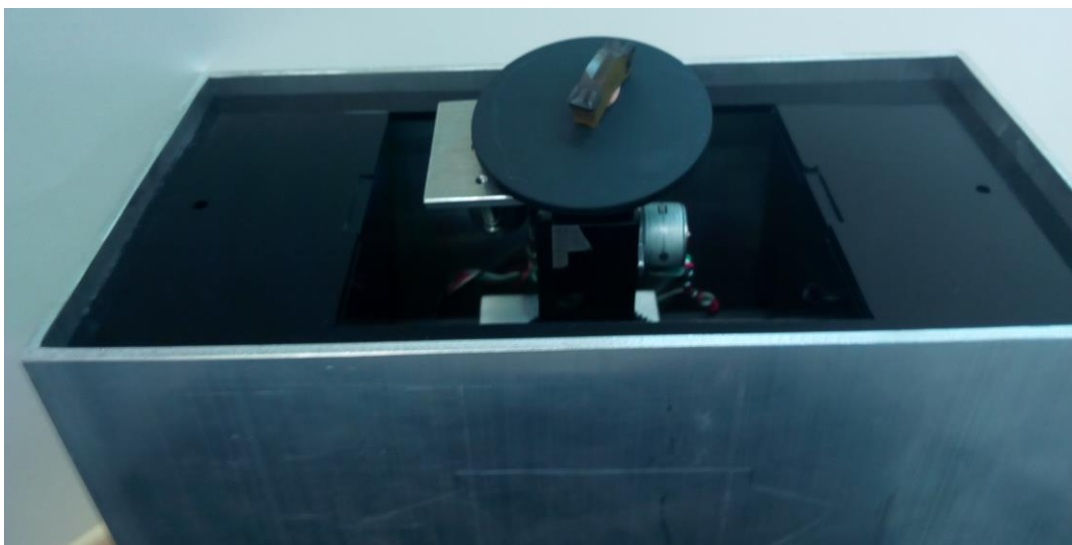


Ilustración 72 Resultado posicionador



Ilustración 73 Resultado final del conjunto

5. CAMARA

La cámara que se ha utilizado es la ELP-USB8MP02G-MFV, tiene 8MP y graba video a una resolución de 4K, se trata de una cámara compacta de objetivos intercambiables con zócalo CS, de esta manera admite desde un gran angular hasta una lente de microscopio.



Ilustración 74 Cámara ELP

La conexión es a través de USB, lo que da la posibilidad de usar gran cantidad de librerías para el manejo de la cámara ya que a efectos prácticos se comporta igual que una webcam.

La cámara contiene un sensor SONY IMX179 que tiene las siguientes características:

SONY

IMX179

Device Structure

- ◆ CMOS image sensor
- ◆ Image size : Diagonal 5.7 mm (Type 1/3.2)
- ◆ Total number of pixels : 3288 (H) × 2512 (V) approx. 8.26M pixels
- ◆ Number of effective pixels : 3280 (H) × 2464 (V) approx. 8.08M pixels
- ◆ Chip size : 6.18 mm (H) × 5.85 mm (V)
- ◆ Unit cell size : 1.4μm (H) × 1.4μm (V)
- ◆ Substrate material : Silicon

Ilustración 75 Sensor IMX179

Se ha utilizado esta cámara debido a la versatilidad y simplicidad de uso, no obstante el sistema es compatible con cámaras desde compactas hasta Reflex Full Frame.

6. SOFTWARE

Se ha realizado un software completo específico para el equipo para permitir:

- Manejar el dispositivo desde el PC,
- Visualizar directamente en pantalla el sujeto que se pretende fotografiar,
- Mensurar el grado de magnificación a la que se está trabajando,
- Realizar los cálculos matemáticos pertinentes para la obtención de la PDC,
- Automatizar el proceso completo de captura de imágenes de cámara y movimientos de la plataforma y del rail.

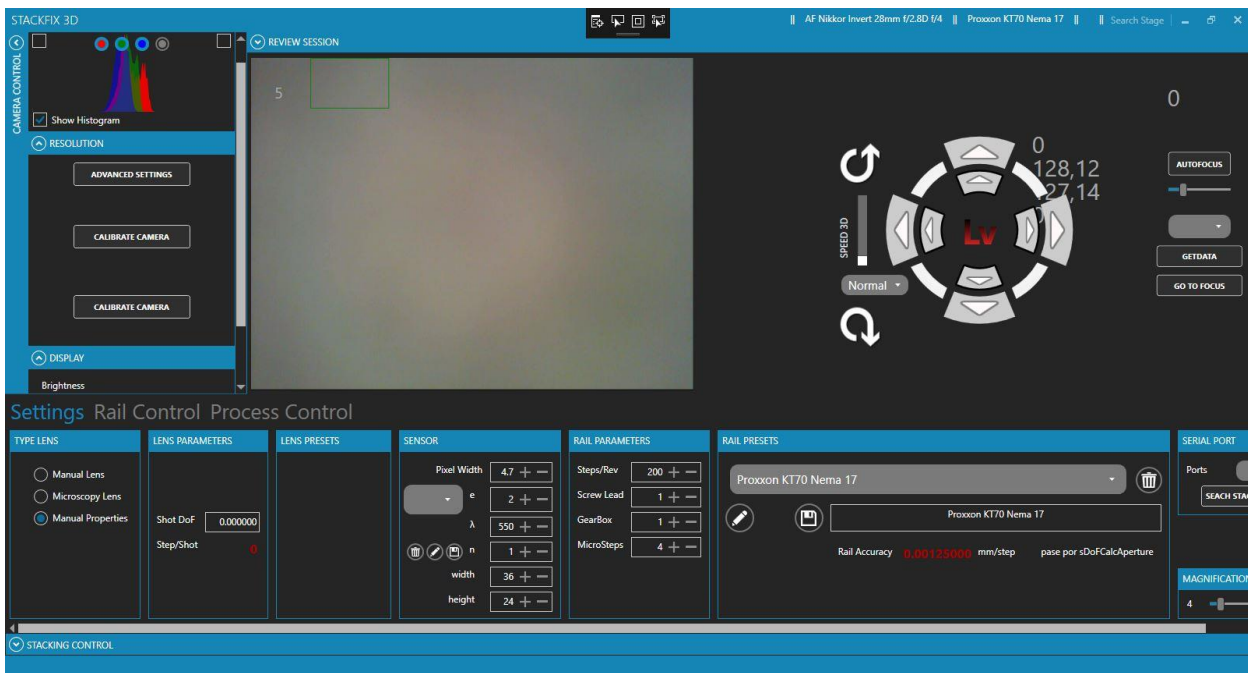


Ilustración 76 Interfaz gráfica del programa

El software se puede dividir en 5 partes principales:

- Parámetros (Settings)
- Control de Rail (Rail Control)
- Control de Cámara (Camera Control)
- Control de Visionado Directo y Posicionamiento (Live View Control)
- Control del Proceso de Captura de Imágenes (Process Control)

Cada una de ellas gestiona de forma centralizada su parte del proceso completo, desde el disparo de la cámara al movimiento del carril de enfoque, así se consigue un manejo y automatización de todas las funciones del prototipo.

6.1. Parámetros (Settings)

Al arrancar el programa, éste realiza una búsqueda del prototipo de forma automática. En caso de lograr una conexión validada, indicará que ha encontrado el StackFix y el puerto serie de comunicación en la casilla “Serial Port” de la pestaña “Settings”. En caso de no haber realizado la conexión USB apropiadamente antes de iniciar el programa, la conexión del dispositivo al PC

lanza de nuevo el evento de búsqueda automática. Si el automatismo fallase, se ha añadido un botón “Search StackFix 3d” que inicia la rutina de búsqueda de forma manual. En la barra superior de cabecera del programa se ha añadido también un control manual “Search Stage” accesible desde cualquier punto de todo el entorno visual.



Ilustración 77 Botones de puerto serie

El enlace se realiza enviando un texto concreto (“ping”) a cada uno de los puertos COM disponibles en el ordenador, si alguno responde el texto concreto que se espera, se establece la comunicación.

El resto del control está orientado a aportar la información necesaria a cerca de nuestra configuración de trabajo para la realización de los cálculos de la PDC y de la magnificación. Dichos datos son:

- Características de la lente utilizada
- Características del sensor de cámara
- Características del carril micrométrico

Dado que la mayoría de las veces tendremos una configuración de trabajo fija implícita a nuestro “hardware” habitual, se ha implementado un sistema de base de datos SQL en la que guardar todos los datos asociados a cada configuración específica para no tener que rellenar estos datos cada vez que se utiliza el prototipo. Con los distintos botones habilitados se puede añadir, modificar o eliminar los elementos guardados en la base de datos



Ilustración 78 Botones de gestión de base de datos

En función de la lente que se utilice, óptica fotográfica o de video de diafragma manual o lente de microscopio acoplada a la cámara, el programa va a pedir el valor f de diafragma o el número NA (numeric aperture), con los cuales irá actualizando el cálculo de la DOF. También es posible la opción completamente manual de introducir la DOF de manera manual.

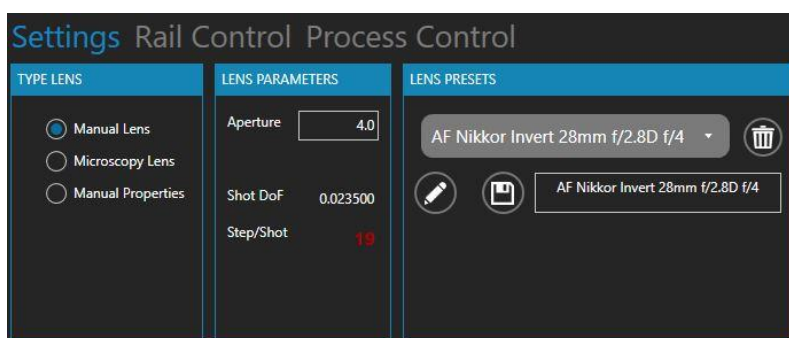
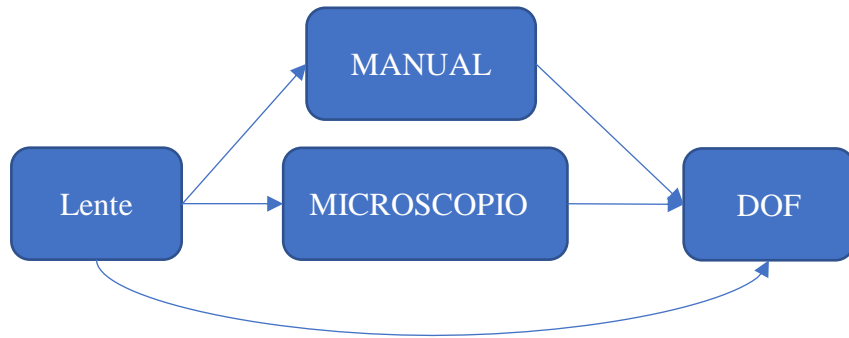


Ilustración 79 Gestión de lentes



Cuadro 3 Diagrama de datos de lentes

Para el cálculo de la profundidad de campo y de la magnificación también son necesarios datos del sensor que al igual que las lentes se guardan en una base de datos para que el proceso sea más cómodo.



Ilustración 80 Gestión de sensores

Se ha decidido poder configurar los parámetros específicos del rail a pesar de conocer el avance por cada paso enviado al motor, con la finalidad de poder utilizarse con otras soluciones del mercado. Estos datos son necesarios para poder calcular el número de pasos que hay que mandarle al motor para el movimiento de avance de la cámara durante el apilado de foco.

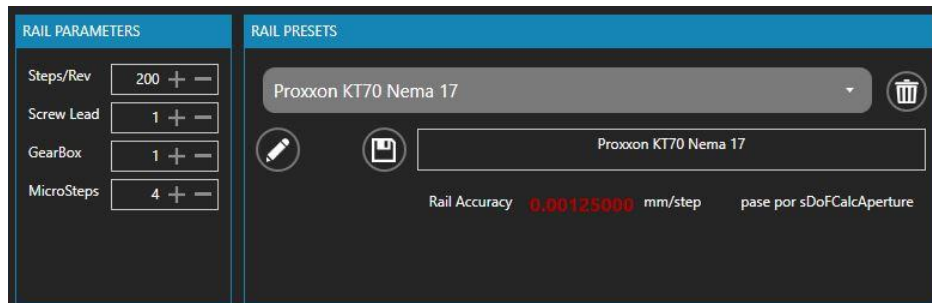


Ilustración 81 Gestión de datos del carril de enfoque

6.2. Control de Rail (Rail Control)

En esta pestaña se determina a PDC extendida deseada y se ajustan todos los valores del apilado de foco.

En el recuadro “Rail Movement” se controla la velocidad de movimiento del motor del carril de enfoque y con las diferentes flechas se le ordenan los movimientos en ambas direcciones y la cantidad de movimiento por múltiplos para buscar los puntos de enfoque deseados.

La casilla “Focus Limits” sirve para fijar el punto máximo y mínimo de profundidad de campo. Mediante las flechas de “Rail Movement” se lleva la cámara hasta el punto más próximo enfocado y se pulsa el botón “Near Focus” de la izquierda para fijar dicha posición como limite cercano del foco.

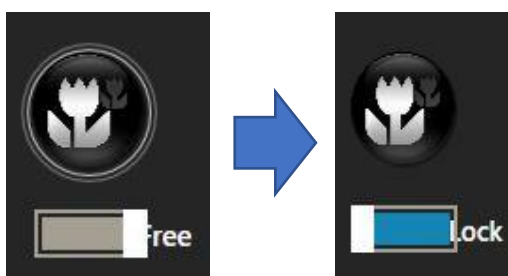


Ilustración 82 Foco cercano

A continuación, lleva hasta el punto más lejano enfocado y se fija el de “Far Focus” de la derecha

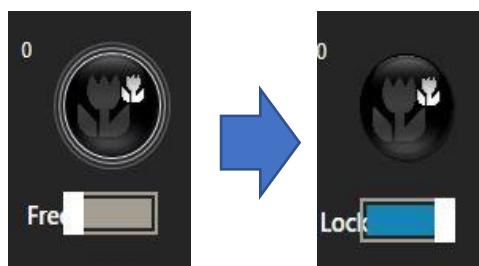


Ilustración 83 Foco lejano

Una vez hecho, quedan determinados los límites de nuestra profundidad de campo extendida y el programa reflejará ya el número de fotografías necesarias para cubrir este área de foco, más un 20% de superposición que es el admitido como mínimo para un óptimo resultado del procesamiento de las imágenes durante el Focus Stacking.

En casilla “Stacking Adds” se han añadido parámetros extra que puede ser de utilidad según el flujo de trabajo personal. Es posible fijar un número extra de imágenes por delante del foco más cercano y otro número de imágenes por detrás del foco más lejano. También se puede modificar el porcentaje de solapamiento entre imágenes (“overlap”).

Por último, en “Shooting Info” se muestra la DOF actual calculada para cada toma, en pasos de motor y en milímetros de profundidad, el número de imágenes necesario para cubrir la profundidad de campo total del objeto a fotografiar (calculado bruto + calculado ajustado con solapamiento) y la profundidad de campo total a cubrir en pasos de motor.



Ilustración 84 Información de Focus Stacking

6.3. Control de Cámara (Camera Control)

Dentro del control de cámara hay una pestaña con un histograma en tiempo real de la imagen capturada en Live View para ajustar metodológicamente la exposición de la imagen obtenida y en la parte de abajo algunos ajustes de la imagen Live View que se aplican en tiempo real, aunque hay que tener en cuenta que estas modificaciones no van a tener efecto en la imagen capturada, son modificaciones para mejorar el visionado antes de la captura.

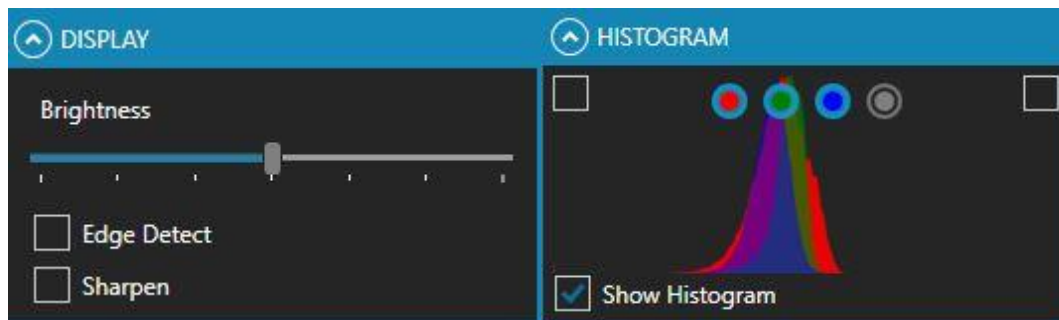


Ilustración 85 Filtros e Histograma

Por otro lado, se puede elegir entre las diferentes cámaras conectadas al equipo y la resolución a la que se quieren manejar, también se puede realizar una configuración avanzada de la cámara, en función de la cámara hay más o menos opciones avanzadas ya que inherentes a la misma (controles DirectShow).



Ilustración 86 Propiedades de cámara

Una vez que se activa el modo Live View (LV), este último menú cambia, quedando disponible únicamente las opciones avanzadas, si se quiere cambiar la resolución hay que salir de LV, cambiar y volver a activarlo. Es una limitación del propio controlador de las cámaras que no permite el ajuste de resolución sin desconexión.

En el modo LiveView se activa el control de calibración de cámara (“Calibrate Camera”). El proceso consiste en capturar una primera instantánea inicial y, tras realizar un movimiento controlado tanto en el eje vertical como en el horizontal, tomar una segunda instantánea final y vuelta al punto de origen. Mediante un algoritmo de comparación de ambas imágenes que busca puntos característicos iguales y realiza la medición en pixels de su desplazamiento en el encuadre, se obtiene la medida directa de la magnificación de la imagen y por tanto se ajusta también la profundidad de campo definitiva de cada toma y del número de tomas necesario para cubrir la profundidad total establecida.

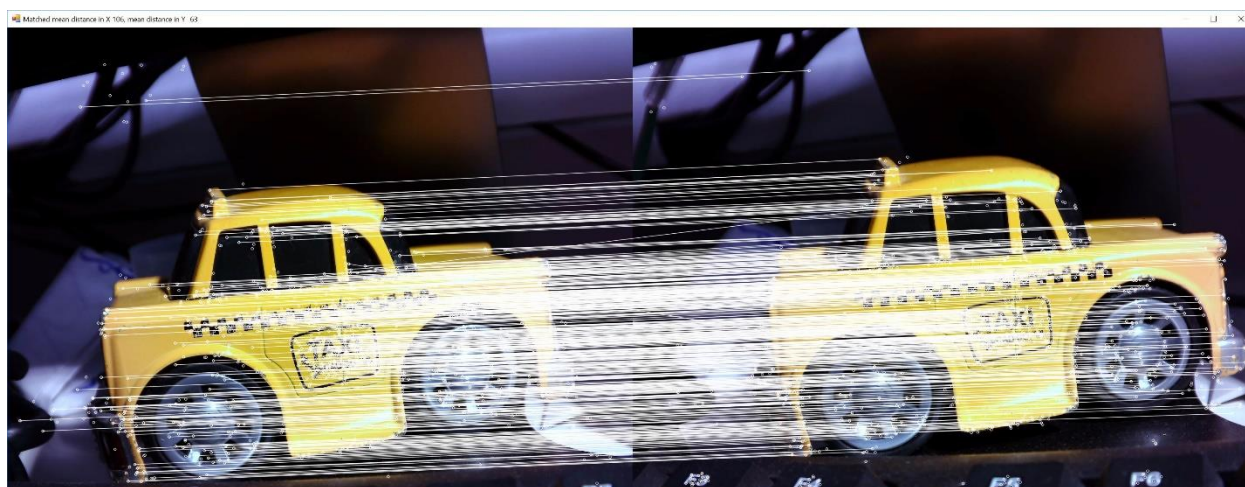


Ilustración 87 Ejemplo de medición de distancias

6.4. Live View Control

A la izquierda de la pestaña se encuentra un recuadro donde se muestra la imagen que está capturando la cámara, si está en modo LV, el recuadro verde es una región de interés que sirve para medir el nivel de foco que tiene la imagen, indicado en el número que aparece arriba a la izquierda.

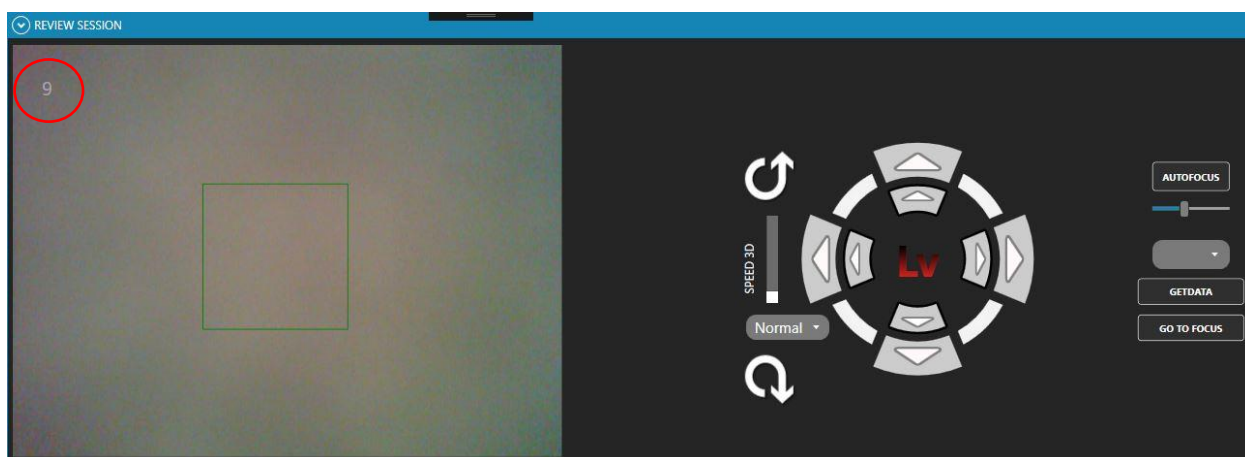


Ilustración 88 Ventana de Live View

Las flechas sirven para mover el posicionador. Las externas controlan el eje vertical y horizontal. Las internas y las curvilíneas, el movimiento tridimensional de orientación de la muñeca de Euler. Mediante deslizador es posible realizar el ajuste fino de las velocidades de giro o seleccionar el “preset” en el control de combobox.

El botón de “Autofocus” realiza 5 fotografías por delante y otras 5 por detrás del punto de foco actual, el botón “Getdata” extrae los valores de foco de las imágenes y el botón “Go To Focus” mueve la cámara a la posición donde realizó la fotografía con mayor foco. Actualmente tiene una utilidad de ajuste fino de foco automatizado basado en la mensuración numérica del mismo, pero en un futuro se pretende desarrollar un proceso de autofocus propiamente dicho.

6.5. Control del Proceso de Captura de Imágenes (Process Control)

En la pestaña de configuración de proceso se selecciona la configuración para el proceso de toma de fotografía para el digitalizado mediante fotogrametría.

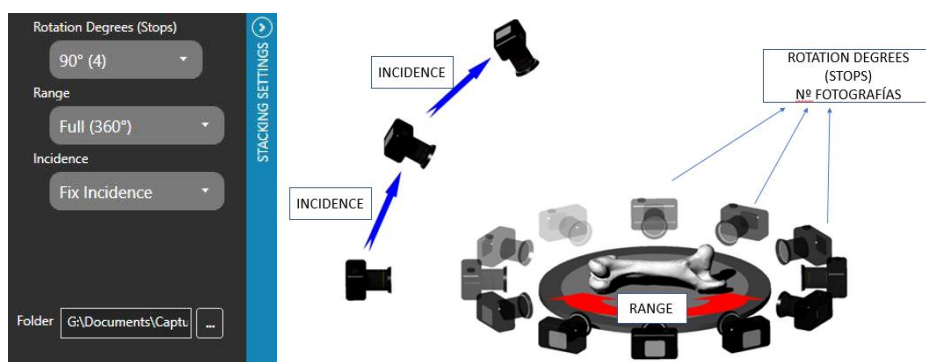


Ilustración 89 Gestión de proceso de toma de imágenes

El control de grados de rotación o paradas permite determinar cada cuantos grados de la circunferencia se realizará una toma y el número de imágenes perimetrales que se quieren hacer al objeto.

El control de rango es la cobertura del perímetro del objeto que se quiere cubrir. Puede ser completo o en ocasiones interesa la digitalización de solo un lado o una porción del objeto.

El control de incidencia establece con cuantos ángulos de inclinación sagital se pretende repetir el proceso para obtener la máxima información de la parte superior e inferior del objeto.

Por otra parte, hay que seleccionar una carpeta donde guarde todas las fotos, para lo que se ha habilitado un control específico que permite tener ordenado el inmenso volumen de archivos producidos.

7. PROCESO DE DIGITILIZADO

Para empezar con el digitalizado 3D basándose en imágenes perimetrales con profundidad de foco extendida, tomamos una serie de fotografías en distintos planos focales y a continuación repetimos el proceso de las tomas fotográficas alrededor del objeto, tal y como se muestra en la imagen, para posteriormente realizar el digitalizado 3D mediante fotogrametría.

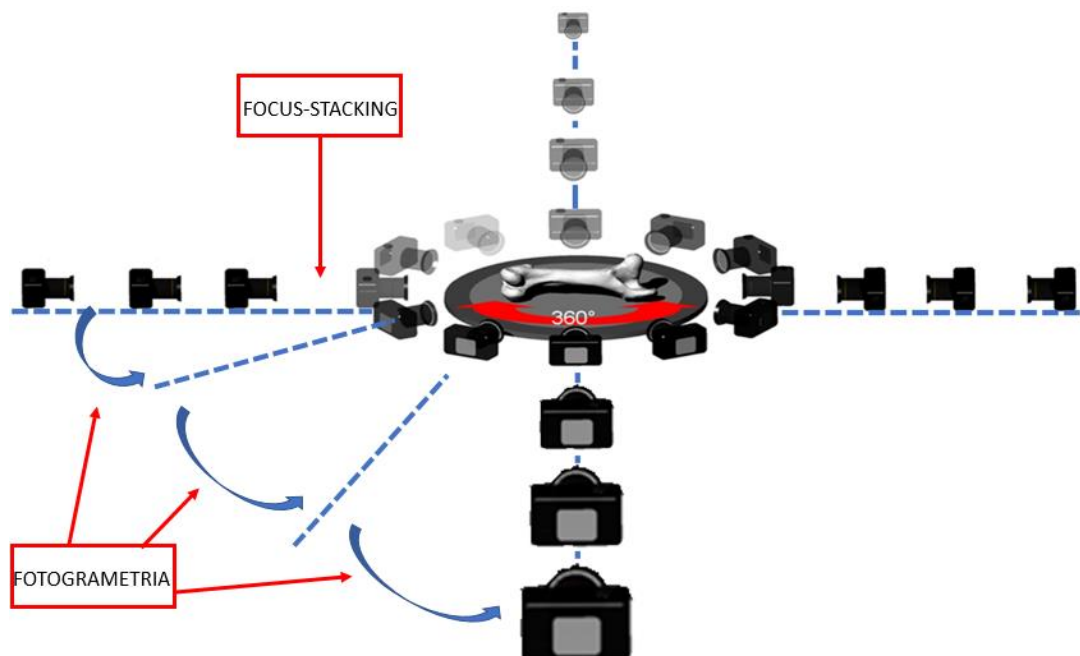


Ilustración 90 Explicación del proceso plano

Repetimos el proceso desplazándonos, por ejemplo, variando el ángulo de incidencia sagital tal y como se muestra en la imagen.

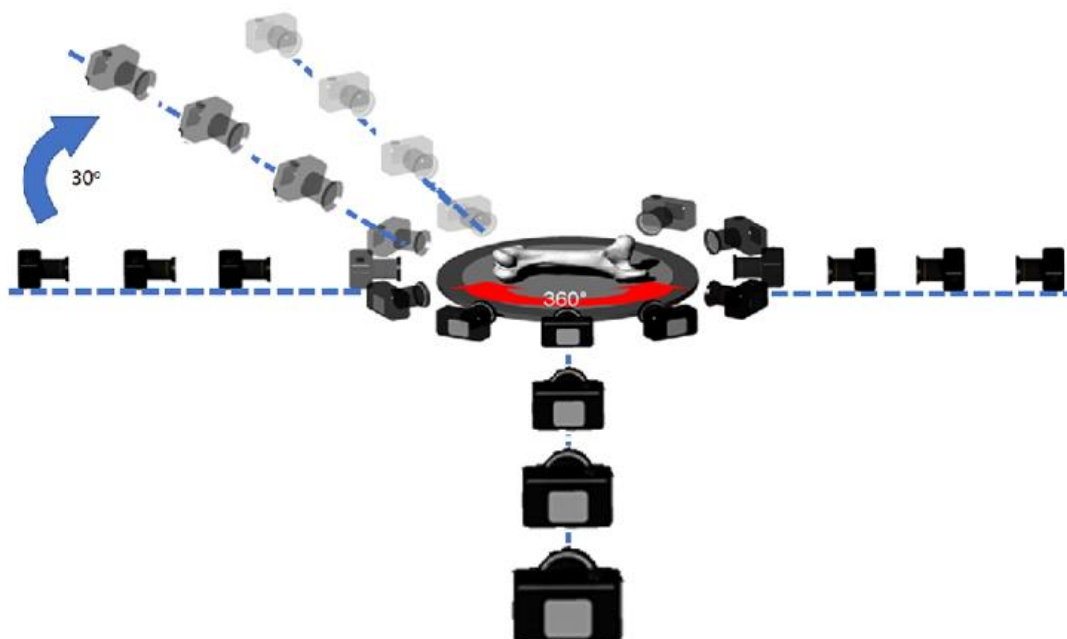


Ilustración 91 Explicación del proceso con varias altura

Como ejemplo del proceso se expone un caso práctico de la digitalización de una plaquita de corte de un torno.

En primer lugar se hace el Focus Stacking

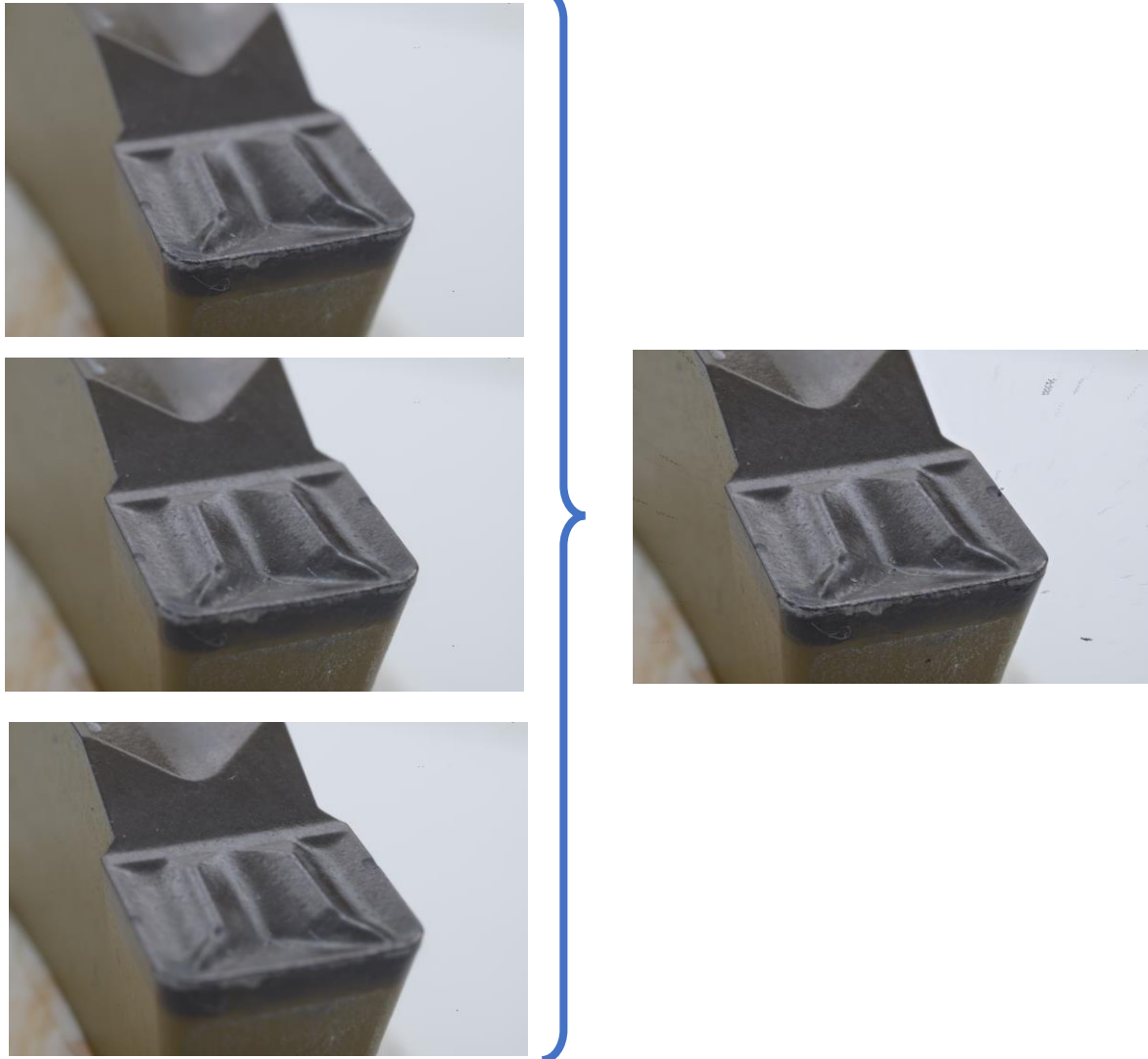


Ilustración 92 Focus Stacking

Se repite el proceso alrededor del objeto:

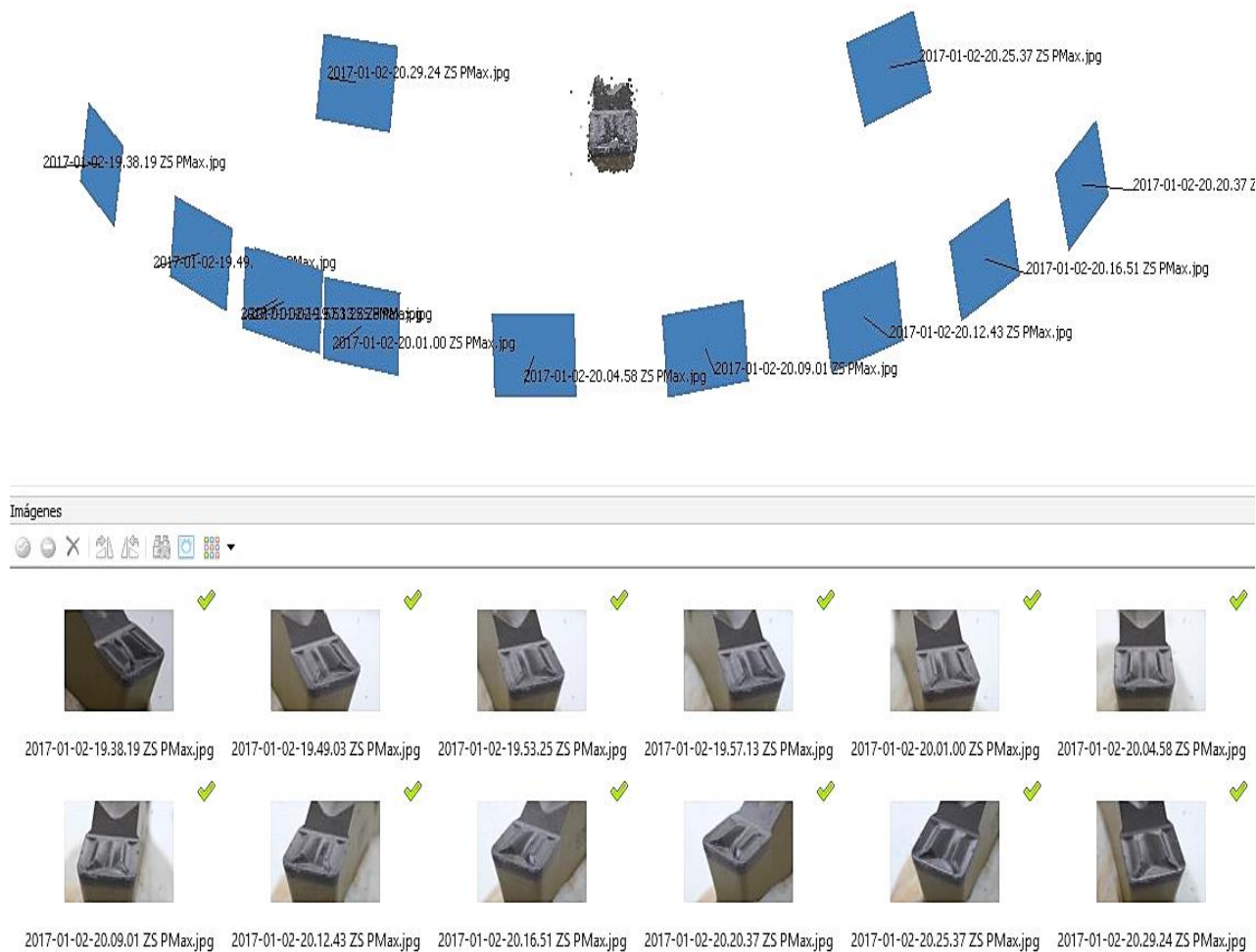


Ilustración 93 Fotos finales resultado del Focus Stacking orientadas

Por último con el software de fotogrametría se obtiene la nube de puntos resultado de la digitalización 3d y la maya de triángulos (STL).

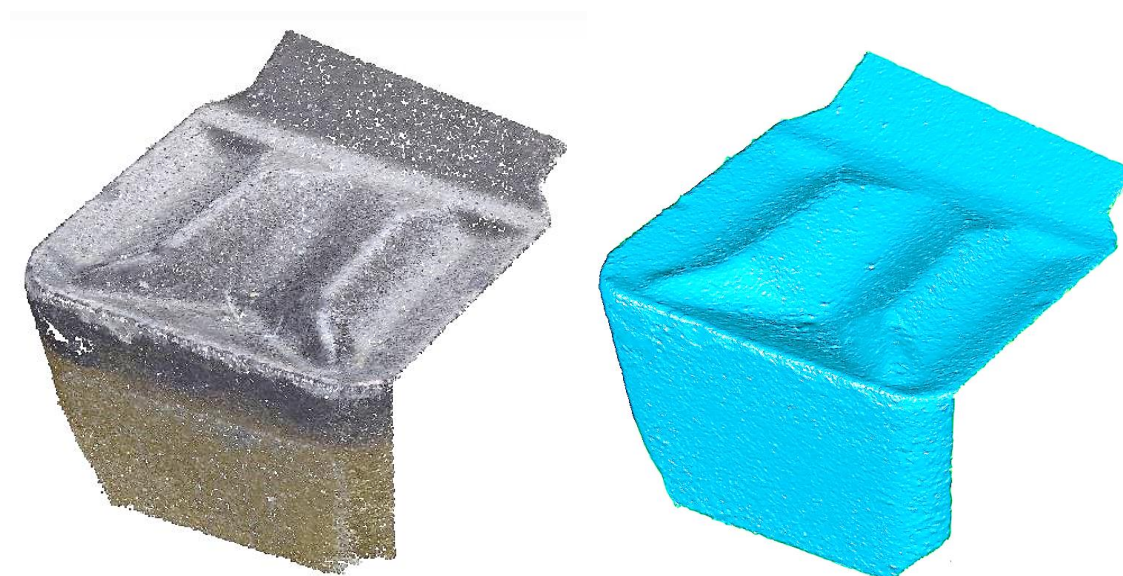


Ilustración 94 Izq. Nuve de puntos Der. Maya de triángulos STL

8. PRESUPUESTO

Componente	Cantidad	Precio unitario	Precio total	Unidades medida
Husillo TR8 500mm	1	14,9	14,9	€
Tuerca Anti-Backlash	3	5,5	16,5	€
Rodamientos lineales Im8uu	4	3	12	€
Microstepper	4	6,16	24,64	€
Nema 11 Pequeño	2	11,5	23	€
Nema 11 Grande	1	14	14	€
Conector de alimentación PCB	1	0,5	0,5	€
Conector USB	1	0,4	0,4	€
CH340G	1	2,8	2,8	€
Cristal 12Mhz	1	1,4	1,4	€
Cristal 16Mhz	1	1,4	1,4	€
Sensor óptico	1	2	2	€
Arca Swiss grapa	1	5,1	5,1	€
Arca Swiss adaptado cámara	1	2,19	2,19	€
Acoplamiento flexible	3	3	9	€
Cámara	1	65	65	€
Lente 50mm + 2 anillos	1	26,5	26,5	€
Tubo aluminio 200x100x2,5	1	50	50	€
Tubo aluminio 50x40x2	1	40	40	€
Resina Rápida	1	22,4	22,4	€
Resina Lenta	1		0	€
Silicona	2	17	34	€
Agente ce curado	1	4	4	€
Guía lineal	1	29,42	29,42	€
Patín Guía lineal	1	16,2	16,2	€
Cojinete lineal	4	1,96	7,84	€
Eje Aluminio D8mm L140mm	6	1,5	9	€
Cojinete	1	2,84	2,84	€
Aluminio para mecanizar	1	50	50	€
Horas de mecanizado	10	18	180	€
Materiales agotada utilidad			2832,59	€
Total materiales			3499,62	€
Mano de obra	4000	18	72000	€
Total trabajo ingeniería			72000	€
Total materiales+mano obra			75499,62	€
Gastos generales	13%		9814,9506	€

Diseño e implementación de un prototipo funcional para Focus-Stacking y digitalizado 3D

Total M+MO+GG		85314,5706	€
Beneficio industrial	6%	5118,874236	€
Total M+MO+GG+BI		90433,44484	
IVA	21%	18991,02342	€
Presupuesto Final		109424,4683	€

9. MODELO DE NEGOCIO

<p>Socios Clave Alianzas con socios Fabricantes de máquinas fotográficas Entidades públicas y centros de enseñanza de nivel medio o superior de técnica fotográfica de macrofotografía Entidades corporativas talque asociaciones de índole científico donde se use macrofotografía</p>	<p>Actividades Clave Diseño, desarrollo y construcción o fabricación de un dispositivo, que permita realizar la técnica de deformación sencilla y prácticamente automática a la vez de mejorar su calidad. Canales de distribución Tienda virtual, Stands en ferias y congresos Relaciones con clientes Mediante mail a asociaciones de profesionales, centros públicos o privados donde se use la técnica de macrofotografía Fuentes de ingresos Venta de dispositivos</p>	<p>Propuesta de Valor Problemas de nuestro cliente que vamos a resolver la macrofotografía de gran aumento como el digitalizado 3D basado en fotogrametría son procesos fotográficos muy laboriosos por el consumo de tiempo necesario en realizar un enorme número de tomas fotográficas y por la necesidad de realizar movimientos de rango micrométrico con precisión y de forma estable. Valor a entregar al cliente Un sistema integrado de soporte, posicionamiento y manipulación del objeto que se pretende fotografiar que permite encuadrar la imagen bajo visión directa desde el ordenador y automatizar todo el procedimiento de captura. También realiza las tomas con plano focal progresivo necesarias para la extensión de la profundidad de campo (focus stacking) de forma automatizada, así como todos los cálculos necesarios para su realización.</p>	<p>Relaciones con clientes Tipo de relación cada uno de nuestros segmentos de cliente Asistencia personal, asistencia personal dedicada Relaciones establecidas hasta la fecha Colectivos que organizan congresos y están muy interesados por el dispositivo para sus miembros.</p>	<p>Segmentos de cliente Destinatarios de nuestra innovación: Fotógrafos especializados Centros de educación media y profesional Centros universitarios Investigadores y docentes</p>
<p>Nuestros suministradores clave Suministradores de materiales para el montaje Motivaciones para socios: Optimización y economía, reducción de riesgo e incertidumbre, adquisición de recursos y actividades particulares</p>	<p>Recursos Clave Recursos clave requiere nuestra propuesta de valor Financieros para la fabricación, distribución y venta Canales de distribución Tienda online, venta directa en congresos científicos Relaciones con clientes Mediante Pagina Web, presencial en los Stands y presentaciones en congresos Fuentes de ingresos Venta de dispositivos fabricados</p>	<p>Canales Canales que quieren ser contactados nuestros segmentos de cliente Mediante la demostración ínsito del aparato Mediante web Fases del canal de contacto 1. Conciencia: Exposición y demostración de la innovación tecnológica 2. Evaluación: Mediante las demostraciones ínsito 3. Compra: En los stands o mediante la página Web 4. Entrega: Transporte urgente asegurado 5. Post-venta: Mediante la web o ínsito en nuestras dependencias</p>	<p>Fuentes de ingresos Los obtenidos por la venta y cobro de nuestro producto.</p>	
<p>Estructura de costes Fijos: Renta de local y gastos de luz, agua, telefonía, internet, etc. Personal de fabricación, administración, marketing y marketing digital Tienda online y mantenimiento de la misma Variables: Materiales de fabricación Contrato, montaje y atención de stands</p>				

10. CONCLUSIONES

1. El dispositivo permite posicionar tridimensionalmente el objeto desde el interfaz del software, controlando los 5 grados de libertad.
2. Una vez establecida el área que se desea enfocar, se introducen los parámetros de cámara y se calibra el sistema, el sistema realiza los cálculos matemáticos y todo el proceso de captura de imágenes de forma desatendida.
3. Se ha completado el diseño y se ha fabricado un modelo completamente funcional.

11. BIBLIOGRAFÍA

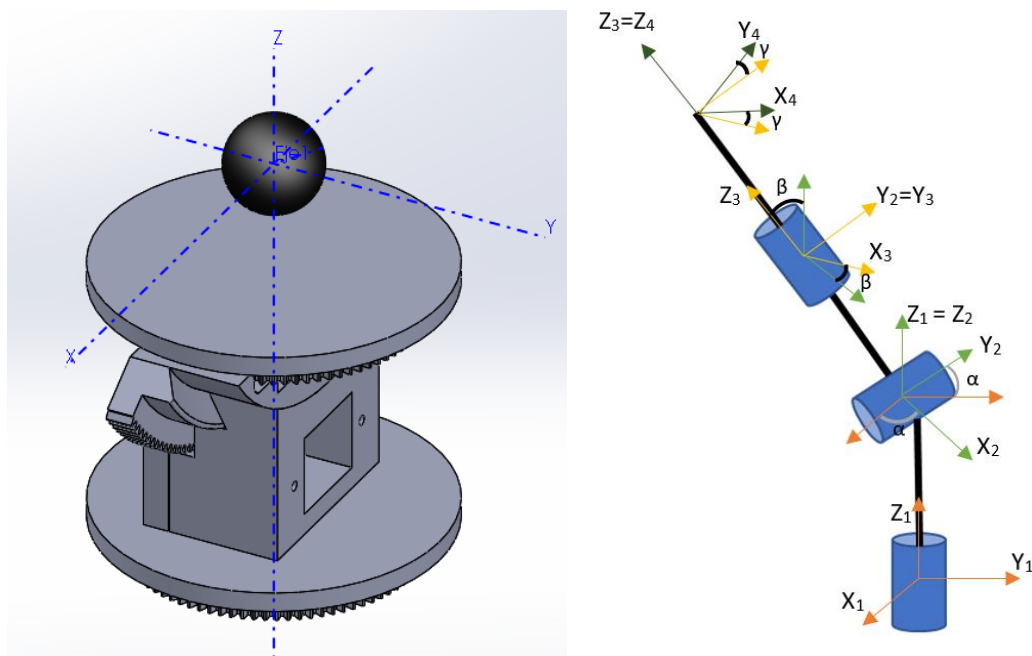
- **Blanco, D. and Zapico, P.** *Tecnologías para el Digitalizado de Superficies*. Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica. EPI Gijón, Universidad de Oviedo.
- **Canonistas.com. (2017).** *Macros muy macros* - Página 312. [online] Disponible en: <http://www.canonistas.com/foros/macro/169000-macros-macros-312.html> [Acceso 12 May 2017].
- **Edificación, J. (2017).** *Digitalización de un objeto 3D mediante la técnica de fotogrametría de un objeto cercano*. [online] Edificacionpolitecnico.blogspot.com.es. Disponible en: <https://edificacionpolitecnico.blogspot.com.es/2016/04/digitalizacion-de-un-objeto-3d-mediante.html> [Acceso 24 Abr. 2017].
- **Elblogdelplastico.blogs.upv.es. (2017).** *Ingeniería Inversa El blog del Plástico*. [online] Disponible en: <http://elblogdelplastico.blogs.upv.es/2013/05/05/ingenieria-inversa/> [Acceso 24 Abr. 2017].
- **Elmundodel3d.es. (2017).** *Escáner 3D | La Biblioteca del 3D*. [online] Disponible en: <http://elmundodel3d.es/biblioteca/hardware/escaner-3d/> [Acceso 30 Abr. 2017].
- **Es.wikipedia.org. (2017).** *Escáner 3D*. [online] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D [Acceso 30 Abr. 2017].
- **Es.wikipedia.org. (2017).** *Fotogrametría digital*. [online] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametr%C3%ADa_digital [Acceso 26 Abr. 2017].
- **Extreme Macro Photography** - extreme-macro.co.uk. (2017). *Extreme Macro Photography*. [online] Disponible en: <http://extreme-macro.co.uk/> [Acceso 12 May 2017].
- **Groen, F., Young, I. and Ligthart, G. (1985).** *A Comparison of Different Focus Functions for Use in Autofocus Algorithms*. Department of Applied Physics. Delft University of Technology, 2600 GA Delft, The Netherlands.
- **Jameel, A. and Noor, F. (2015).** *Improved Multi-Focus Image Fusion*. Department of Computer Engineering and Department of Electrical Engineering. Bahria University, Islamabad.
- **Macrosmuymacros.com. (2017).** *Contenidos*. [online] Disponible en: <http://macrosmuymacros.com/index.php/es/contenidos> [Acceso 7 May 2017].
- **Morenatti, M. (2017).** *Macrofotografía extrema: Lo que el ojo no ve*. [online] EL PAÍS. Disponible en: https://elpais.com/elpais/2017/07/08/punto_de_enfoque/1499506301_819420.html [Acceso 11 Jul. 2017].

- **Network54.com.** (2017). [online] Disponible en: [http://www.network54.com/Search/view/657050/1351494405/Copiado+en+Resina+%2B+Termodin%C3%A1mica+Espuria+\(I\)?term=cuanto+mide+maricarmen&page=43&sort=date](http://www.network54.com/Search/view/657050/1351494405/Copiado+en+Resina+%2B+Termodin%C3%A1mica+Espuria+(I)?term=cuanto+mide+maricarmen&page=43&sort=date) [Acceso 18 May 2017].
- **Network54.com.** (2017). *Tutoriales de escala española*: [online] Disponible en: <http://www.network54.com/Forum/657050/message/1381436739/Copiado+en+Resina+%2B+Termodin%C3%A1mica+Espuria+%28II%29> [Acceso 18 May 2017].
- **Nikon's MicroscopyU.** (2017). *Interactive Tutorials*. [online] Disponible en: <https://www.microscopyu.com/tutorials> [Acceso 12 May 2017].
- **Ortiz Coder, P. and del Pino Espinosa, B.** *Digitalización 3D automática con láser escáner, fotogrametría y videogrametría*. Instituto de Arqueología de Mérida-CSIC. Mérida. España.
- **Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez-Solano, R., Martín, L. and Bachiller, I.** *FOTOGRAMETRÍA*.
- **Pdi.topografia.upm.es.** (2017). *Concepto de Fotogrametría Analítica*. [online] Disponible en: http://pdi.topografia.upm.es/cepeda/Coplanaridad/Introduccion/html/Concepto_de_Fotogrametría_Analitica.htm [Acceso 30 Abr. 2017].
- **Pereira, J.** (2017). *Diferencias Full frame Vs APS-C, resolución, círculos de confusión y profundidad de campo* - Jose Pereira. [online] Jpereira.net. Disponible en: <http://www.jpereira.net/apuntes-brevs/resolucion-full-frame-aps-circulos-de-confusion-y-demas-historias> [Acceso 27 Abr. 2017].
- **Pertuz Arroyo, S.** (2013). *Modeling and applications of the focus cue in conventional digital cameras*. Universidad Rovira I Virgili, Tarragona, España.
- **Pertuz, S., Puig, D., García, M. and Fusiello, A. ed.,** (2013). *Generation of All-in-Focus Images by Noise-Robust Selective Fusion of Limited Depth-of-Field Images*. EE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 22.
- **Photomacrography.net.** (2017). Index. [online] Disponible en: <http://www.photomacrography.net/forum/index.php?sid=ed266bd5b1358e1ef888c9198318fb50> [Acceso 7 May 2017].
- **Rodríguez Navarro, P. (n.d.).** *La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos*.

- **Santos, A., Ortiz de Solórzano, C., Vaquero, J., Peña, m., Malpica, N. and del Pozo, F. ed., (1997).** *Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis.* Journal of Microscopy, Vol. 188, pp.264 –272.
- **Sonystas.com. (2017).** *Matemáticas para macrofotografía - Sony Alpha.* [online] Disponible en: <http://www.sonystas.com/foro/tutoriales-fotografia/matematicas-para-macrofotografia/?PHPSESSID=t6060mniif1ls7a06occ9mno77> [Acceso 7 May 2017].
- **Topoequipos.com. (2017).** *¿Qué es Fotogrametría? - Terminología - Topoequipos S.A - Venta de equipos de Topografía - Geomática - Equipos GPS.* [online] Disponible en: <http://www.topoequipos.com/dem/que-es/terminologia/que-es-fotogrametria> [Acceso 30 Abr. 2017].
- **Villarrubia, P., Villarrubia, P. and perfil, V. (2017).** *Macrofotografía.* [online] Comosehace-tecnicasfotograficas.blogspot.com.es. Disponible en: <http://comosehace-tecnicasfotograficas.blogspot.com.es/2014/02/macrofotografia.html> [Acceso 16 Jul. 2017].
- **Xu, X., Wang, Y., Tang, J., Zhang, X. and Liu, X. (2011).** *Robust Automatic Focus Algorithm for Low Contrast Images Using a New Contrast Measure.* Department of Computer Science and Engineering and School of Computer Science and Technology. Shanghai Jiao Tong University and Wuhan University of Science and Technology, China.

ANEXO 1: ESTUDIO DEL POSICIONADOR CONCENTRICO RRR (ZYZ)

Caso 1: Objeto centrado en el origen del triedro

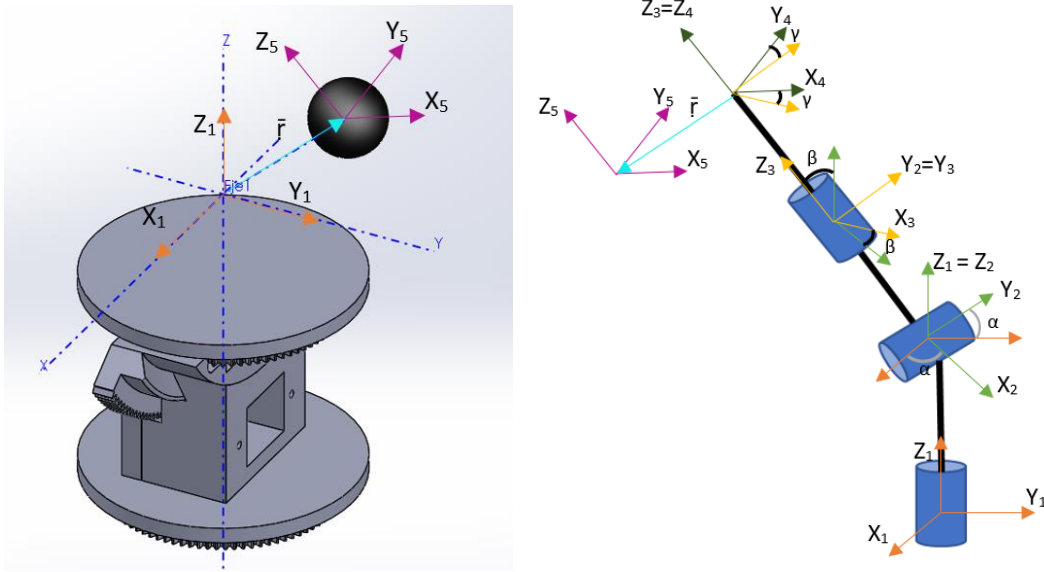


A la izquierda se encuentra el montaje real (ZYZ) y a la derecha el esquemático, siendo coincidentes los orígenes de los cuatro ejes coordenados, lo que significa que los movimientos van a tener lugar alrededor del centro del triedro del montaje real.

Se realizan tres giros consecutivos, un giro de ángulo α alrededor del eje Z, un giro de ángulo β alrededor del eje Y del nuevo triedro y un giro de ángulo γ alrededor del eje Z del nuevo triedro (ZYZ), por lo que la matriz de cambio de orientación del montaje es la siguiente.

$$\begin{aligned}
 {}^1R_4(\alpha, \beta, \gamma) &= R_z(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) = \\
 &\begin{pmatrix} C\alpha & -S\alpha & 0 \\ S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C\gamma & -S\gamma & 0 \\ S\gamma & C\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\
 &\begin{pmatrix} C\alpha C\beta C\gamma - S\alpha S\gamma & -C\alpha C\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha C\beta \\ S\alpha C\beta C\gamma + C\alpha S\gamma & -S\alpha C\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta \\ -S\beta C\gamma & S\beta S\gamma & C\beta \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Caso 2: Objeto descentrado del origen del triedro



Este caso modifica al anterior en que el objeto a orientar no está situado en el origen de los triedros del caso anterior, por lo que hay que añadir una traslación pura aplicada a posteriori. Para poder realizar esta operación es necesario pasar a matrices de transformación homogéneas.

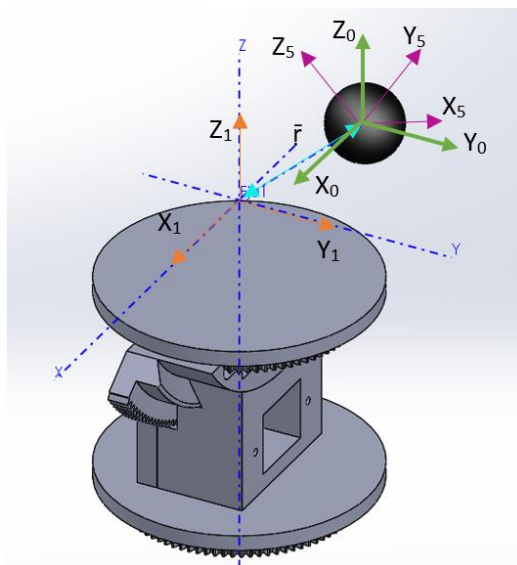
$${}^1H_4 = \begin{pmatrix} {}^1R_4 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\alpha C\beta C\gamma - S\alpha S\gamma & -C\alpha C\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha C\beta & 0 \\ S\alpha C\beta C\gamma + C\alpha C\gamma & -S\alpha C\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta & 0 \\ -S\beta C\gamma & S\beta S\gamma & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^4H_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^1H_5 = {}^1H_4 \cdot {}^4H_5$$

$${}^1H_5 = \begin{pmatrix} {}^1R_4 & (C\alpha C\beta C\gamma - S\alpha S\gamma)x_0 + (-C\alpha C\beta S\gamma - S\alpha C\gamma)y_0 + (C\alpha C\beta)z_0 \\ (S\alpha C\beta C\gamma + C\alpha C\gamma)x_0 + (-S\alpha C\beta S\gamma + C\alpha C\gamma)y_0 + (S\alpha S\beta)z_0 \\ (-S\beta C\gamma)x_0 + (S\beta S\gamma)y_0 + (C\beta)z_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Esta matriz representaría orientación del triedro situado en un punto fuera del centro de movimiento del constructo, con respecto al mismo. Pero en nuestro caso nos interesa que la orientación sea con respecto a un eje fijo situado en el punto de interés, por lo que hay que pre-multiplicar una matriz homogénea, que representa un giro sobre el eje Y para compensar el ángulo de inclinación de la cámara, y una traslación cuyo vector director sea el contrario al de traslación final.



$$\vec{r} = (-x_0, -y_0, -z_0)$$

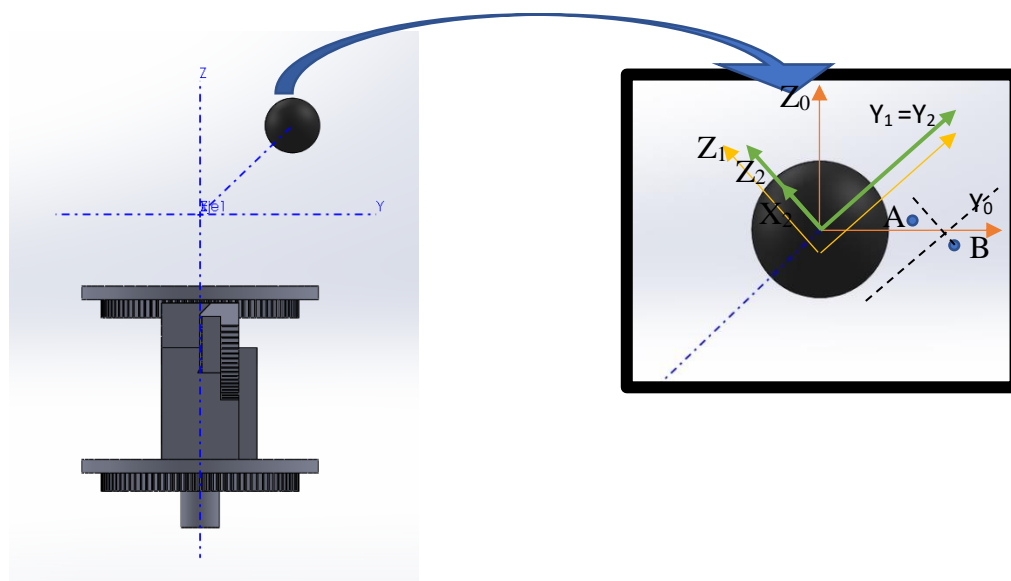
$${}^0H_1 = \begin{pmatrix} C\theta & 0 & S\theta & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

0H_5

Caso específico de aplicación

El posicionador sirve para orientar un objeto en el espacio, de tal manera que con unos motores haga girar el objeto dentro del espacio de trabajo accesible.

El posicionador se va manejar desde un ordenador y el objeto se va a visualizar desde una cámara en la pantalla del ordenador, por lo que los giros que se quieren realizar tienen que ser con respecto a los Z_0 y Y_0 de la pantalla cuyo dentro coincidirá con el centro del objeto en cuestión.



La matriz 0H_5 representa el comportamiento del posicionador para este caso concreto. Por lo tanto, si se quisiera realizar un giro se pincharía en el punto A y se soltaría el cursor en el punto B, y el

giro resultante sería entorno a un eje perpendicular a la línea que une A con B y que pasa por el centro de la pantalla.

En primer lugar, se calcula la orientación de la recta perpendicular a la AB, el sistema de referencia hay que rotarlo entorno a X_0 un ángulo μ que se corresponde con la inclinación de la recta anterior y a posteriori realizar un giro de ángulo Ω entorno al eje Y_1 , matricialmente:

$${}^0R_2(\mu, \Omega) = R_x(\mu) \cdot R_y(\Omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\mu & -S\mu \\ 0 & S\mu & C\mu \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C\Omega & 0 & S\Omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\Omega & 0 & C\Omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\Omega & 0 & S\Omega \\ S\mu S\Omega & C\mu & -S\mu C\Omega \\ -C\mu & S\Omega & C\mu C\Omega \end{pmatrix}$$

Cuya matriz de transformación homogénea es:

$${}^0H_2(\mu, \Omega) = \begin{pmatrix} C\Omega & 0 & S\Omega & 0 \\ S\mu S\Omega & C\mu & -S\mu C\Omega & 0 \\ -C\mu & S\Omega & C\mu C\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = H_{mov}$$

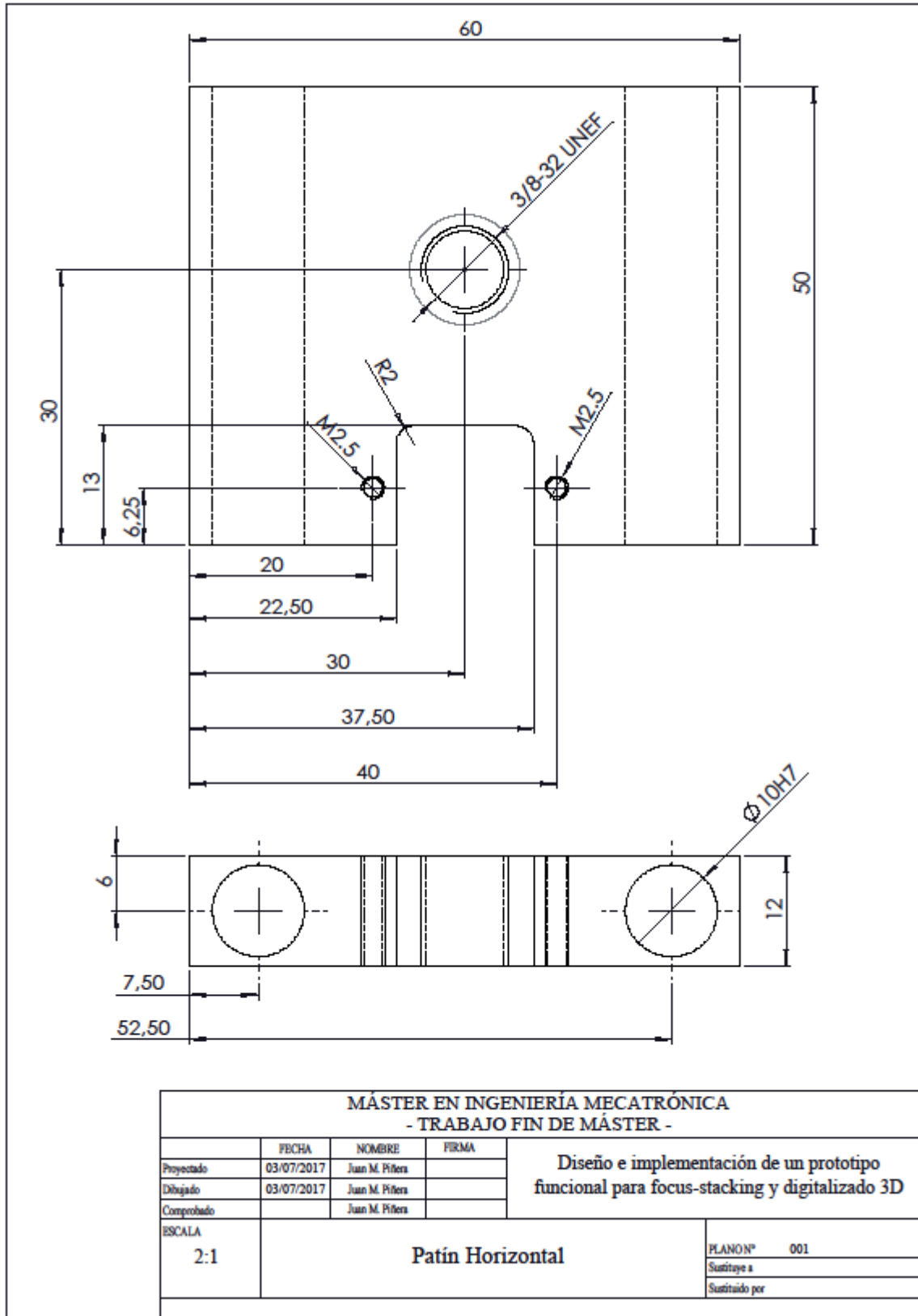
Por lo que para obtener los ángulos del y la posición x, y, z, que satisfagan el giro que se quiere hacer hay que resolver el siguiente sistema:

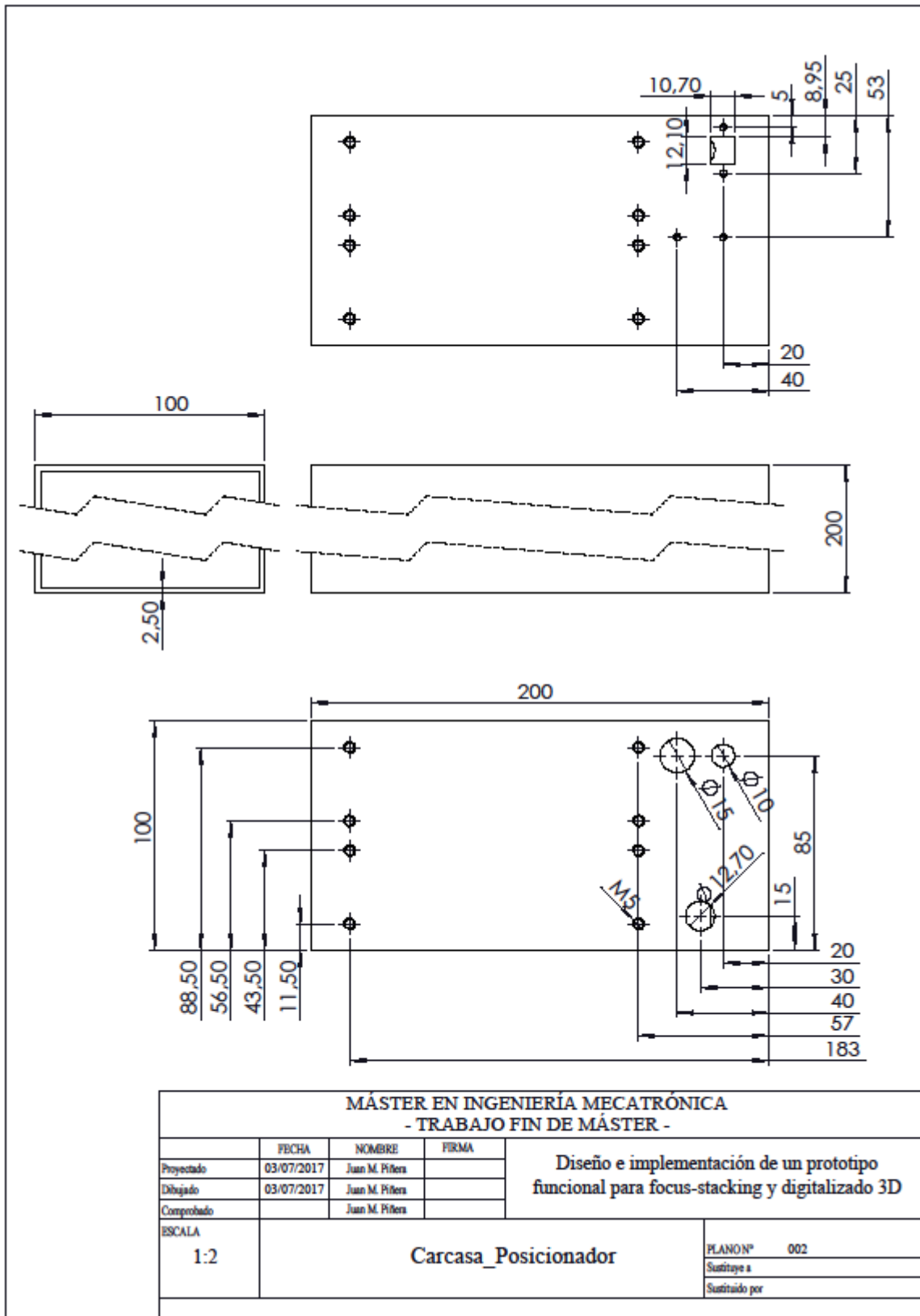
$$H_{mov}(\mu_1, \Omega_1) \cdot H_{pos}(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, x_0, y_0, z_0) = H_{pos}(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$$

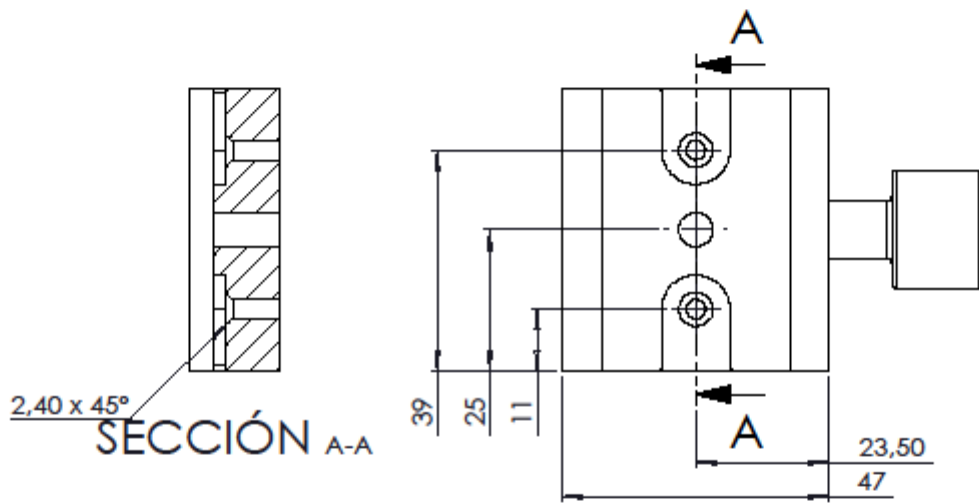
ANEXO 2: PLANOS

Índice de Planos

1.	001 Patín Horizontal	72
2.	002 Carcasa_Posicionador	73
3.	003 Arca Swiss clamp	74
4.	004 Arca Swiss custom	75
5.	005 Carcasa_Carril	76
6.	006 Chapa_Carril	77
7.	007 Patín	78







MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA - TRABAJO FIN DE MÁSTER -			
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	16/05/2017	Juan M. Pifera	
Dibujado	16/05/2017	Juan M. Pifera	
Comprobado		Juan M. Pifera	
Diseño e implementación de un prototipo funcional para focus-stacking y digitalizado 3D			
ESCALA	Arca swiss clamp		PLANONº 003
1:1			Sustituye a
			Sustituido por

