

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



DISEÑO Y DESARROLLO DE UN
BANCO DE MEDICIÓN PARA
ÁRBOLES DE LEVAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio -2025

AUTOR: Adrián Alcázar Vicente

DIRECTOR: Francisco Javier Amorós Cortés



AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a Jhonathan, Pepu, Llorca y Daniel por su apoyo, consejos y saber hacer. Después de toda la experiencia compartida en Impormotor, me habéis transmitido mucho más que conocimientos técnicos, me habéis enseñado a trabajar con pasión, precisión y entrega.

También quiero mostrar mi agradecimiento a mi tutor, Javier Amorós, por su implicación y disponibilidad. No solo por el tiempo y esfuerzos dedicados de forma desinteresada en el proyecto MotoStudent, sino también por su consejo y ayuda constante durante todo el proceso de elaboración de este trabajo.

Agradezco profundamente a mi familia y amigos, especialmente a mis padres, por su constante atención, preocupación y sacrificio. Por apoyarme incondicionalmente durante estos años tan duros como enriquecedores. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

Y, finalmente, quiero darme las gracias a mí mismo. Por haber resistido cuando todo parecía cuesta arriba, por seguir adelante cuando lo fácil habría sido rendirse, por confiar en mis capacidades, por no dejarme vencer por las dificultades. Hoy, por fin, cumplo una de mis grandes metas.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ÁRBOL DE LEVAS	4
3. ESTUDIO DEL MERCADO ACTUAL	5
3.1 JENOPTIK	5
3.2 MARPOSS	6
3.3 MAHR.....	7
3.4 BLUM	8
3.5 CGK Gage Group LLC	8
3.6 EXPLORACIÓN DEL MERCADO ITALIANO	9
3.6.1 VICIVISION	10
3.6.2 PERIÓDICO INDUSTRIA ITALIANA.....	12
3.6.3 FERIA EMO DE MILÁN	13
4. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO	13
5. CONOCIMIENTOS PREVIOS	14
5.1 FUNCIONAMIENTO.....	14
5.2 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS ÁRBOLES DE LEVAS	15
5.2.1 DURACIÓN Y CRUCE.....	15
5.2.2 ALTURA.....	17
5.2.3 PERFIL	18
6. MATERIAL Y MÉTODOS	19
6.1 CONTROL Y MONITOREO	21
6.2 CONCLUSIONES	21
7. DISEÑO	22
7.1 CÓMO SE DISEÑÓ EL BANCO DE PRUEBAS	22
7.1.1 ESTRUCTURA DEL BANCO	23
7.1.2 MANDRILES.....	24
7.1.3 SOPORTES DE LOS MANDRILES.....	25
7.1.4 ADAPTADOR DE LOS SOPORTES	26
7.1.5 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	27
7.1.6 SOPORTE DEL MOTOR.....	30
7.1.7 MEDIDOR DIAL.....	31
7.1.8 SOPORTE INDICADOR DIAL	33
7.1.9 ELECTRÓNICA DE CONTROL	34

7.1.10 CONTROL DE MOTOR: DRV8825.....	34
8. PROGRAMA	35
8.1 APP DESIGNER.....	35
8.1.1 FUNCIONES CLAVE QUE OFRECE MATLAB Y APP DESIGNER.....	35
8.1.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL PROYECTO	36
8.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO	37
8.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	38
8.2.2 CONDENSADOR PROTECTOR	39
8.2.3 MOTOR PASO A PASO	40
8.2.4 CONEXIÓN ENTRE DRV8825 Y ARDUINO.....	41
8.2.5 COMPONENTES UTILIZADOS.....	42
8.2.6 CONSIDERACIONES FINALES	42
8.3 CONEXIÓN E INTEGRACIÓN CON MATLAB.....	42
8.3.1 COMUNICACIÓN ARDUINO - MATLAB	43
8.4 COMUNICACIÓN ENTRE ARDUINO Y MATLAB	43
8.4.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	44
8.4.2 CAPTURA Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.....	44
8.4.3 SINCRONIZACIÓN ENTRE LECTURA Y CONTROL	45
8.5 DESARROLLO DEL CÓDIGO Y FUNCIONAMIENTO	46
8.5.1 CÓDIGO DE ARDUINO.....	46
8.5.2 INTERFAZ PROGRAMA APP DESIGNER.....	49
9. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	50
9.1 COMPARACIÓN CON UN PERFIL CONOCIDO.....	52
9.2 REPETIBILIDAD DE LA MEDICIÓN	52
9.3 ANÁLISIS DE ERRORES	53
9.4 MÁRGENES DE ERROR ACEPTABLES	54
10. APLICACIONES INDUSTRIALES	54
10.1 CÓMO PUEDE MEJORAR LOS SERVICIOS DE UNA EMPRESA	54
11. COMPARACIÓN CON MÉTODOS DE MEDICIÓN CONVENCIONALES	55
11.1 COMPARADOR MECÁNICO ANALÓGICO.....	56
11.2 PERFILÓMETRO ÓPTICO	57
11.3 MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS (CMM).....	58
11.4 SISTEMA DESARROLLADO EN ESTE PROYECTO.....	59
12. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DE LOS COMPONENTES.....	60
12.1 MOTOR PASO A PASO vs MOTOR DC.....	60
12.1.1 CONCLUSIÓN	61

12.2 ELECCIÓN DE CONTROLADOR.....	61
12.2.1 CONCLUSIÓN	62
12.3 COMPARACIÓN DE PLACAS DE CONTROL.....	62
12.3.1 CONCLUSIONES	63
13. ESTUDIO ECONÓMICO	64
13.1 COSTE POR COMPONENTE	64
13.2 DISTRIBUCIÓN DE COSTES	66
13.3 ESTIMACIÓN DE PRECIO DE VENTA.....	66
13.4 COMPARATIVA CON BANCOS DE PRUEBAS COMERCIALES.....	67
14. POSIBLE MEJORAS	67
14.1 EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS A EXCEL.....	68
14. 2 AUTOMATIZACIÓN DE LA PARADA	68
14.3 REDISEÑO DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN DEL ÁRBOL DE LEVAS.....	68
14.4 DISEÑO PARAMETRIZADO CON AUTODESK INVENTOR.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO: CÓDIGO COMPLETO.....	72
ANEXO: PLANOS	74



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1: Optocline CS	6
Ilustración 3-2: medidas dimensionales de un eje	6
Ilustración 3-3: medición óptica de árboles de levas.....	7
Ilustración 3-4: máquina de medición multipunto.....	8
Ilustración 3-5: MTL 1250 X-Stream.....	10
Ilustración 3-6: Industria italiana, 28 abril 2023	12
Ilustración 5-1: diagrama de distribución.....	15
Ilustración 5-2: diferencia de altura de leva	17
Ilustración 5-3: comparación de perfil.....	18
Ilustración 6-1: sistema de sujeción	19
Ilustración 7-1: ensamblaje banco de pruebas	22
Ilustración 7-2: estructura base.....	23
Ilustración 7-3: mandriles y árbol de levas.....	24
Ilustración 7-4: sujeción mandril.....	24
Ilustración 7-5: soporte mandril	25
Ilustración 7-6: adaptación soporte mandril	26
Ilustración 7-7: sistema de transmisión	27
Ilustración 7-8: eje primario	28
Ilustración 7-9: eje secundario.....	29
Ilustración 7-10: soporte motor	30
Ilustración 7-11: medidor dial	31
Ilustración 7-12: medidor dial digital	32
Ilustración 7-13: soporte medidor Dial.....	33
Ilustración 7-14: controlador del motor.....	34

Ilustración 8-1: representación visual de sistema electrónico mediante Tinkercad	37
Ilustración 8-2: fuente de alimentación	38
Ilustración 8-3: condensador 100 μ F 50 V	39
Ilustración 8-4: modelo 17HS13-0404S	40
Ilustración 8-5: conexión DRV8825 y Arduino	41
Ilustración 8-6: conexiones DRV882	41
Ilustración 8-7: conexión ARDUINO.....	43
Ilustración 8-8: visualización de datos	44
Ilustración 8-9: interfaz programa App Designer.....	49
Ilustración 9-1: proyecto final	50
Ilustración 9-2: resultado graficado	51
Ilustración 9-3: validación del sistema de medición	53
Ilustración 11-1: indicador dial analógico	56
Ilustración 11-2: perfilómetro óptico.....	57
Ilustración 11-3: máquina de coordenadas	58
Ilustración 12-1: motor DC vs motor paso a paso	60
Ilustración 12-2: DRV8825	61
Ilustración 13-1: diagrama de costes	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: especificaciones técnicas motor 17HS13-0404S.....	20
Tabla 2: conexiones bobina - controlador	40
Tabla 3: componentes utilizados	42
Tabla 4: funciones de los comandos.....	46
Tabla 5: valores obtenidos.....	51
Tabla 6: análisis de errores	53
Tabla 7: aplicaciones industriales.....	55
Tabla 8: comparación con métodos de medición convencionales.....	59
Tabla 9: comparación controladores.....	62
Tabla 10: comparación placas de control	63
Tabla 11: coste material banco de pruebas.....	64
Tabla 12: costes secundarios y totales.....	65
Tabla 13: comparación bancos de pruebas	67

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una máquina capaz de medir árboles de levas con una alta precisión, asegurando un buen rendimiento y eficiencia de los motores, además de facilitar el uso de la maquinaria para que el operario con conocimientos básicos sea capaz de manejar la máquina sin ningún impedimento. Asimismo, el proyecto pretende encontrar una solución solvente a los precios del mercado actual, facilitando la compra de la maquinaria a pequeños talleres que buscan aumentar sus servicios y satisfacer las necesidades de sus clientes.

Para lograr este objetivo, se seguirán los siguientes pasos metodológicos:

1. **Revisión del mercado:**

- Realizar una revisión del mercado sobre métodos de medición de árboles de levas y las tecnologías actuales utilizadas en la industria
- Evaluar las ventajas y desventajas de las soluciones existentes, identificando oportunidades de mejora en términos de precisión, facilidad de uso y costes

2. **Especificaciones del Diseño:**

- Definir las especificaciones técnicas y funcionales de la máquina, incluyendo el rango de medición, facilidad de uso y costes
- Determinar los materiales y componentes necesarios para el diseño, asegurando una relación coste-beneficio óptima

3. **Diseño Conceptual y Detallado**

- Utilizar software de diseño asistido por ordenador (CAD) para desarrollar modelos de la máquina
- Realizar simulaciones para validar el diseño, asegurando que cumpla los requisitos de funcionalidad

4. **Desarrollo del Prototipo:**

- Construir un prototipo de la máquina utilizando los materiales y componentes seleccionados
- Realizar pruebas preliminares para evaluar el rendimiento del prototipo y ajustar diseño según sea necesario

5. Validación y Pruebas

- Realizar pruebas del prototipo para verificar su precisión, facilidad de uso y coste
- Comparar los resultados de las pruebas

6. Análisis de Costes:

- Realizar un análisis detallado de los costes de producción y mantenimiento de la máquina
- Comparar los costes con los de las máquinas existentes en el mercado para asegurar competitividad

7. Documentación y Conclusiones:

- Documentar todo el proceso de diseño y desarrollo, incluyendo los resultados de las pruebas y el análisis de costes
- Presentar las conclusiones del proyecto, destacando las mejoras

Esta metodología proporciona un enfoque estructurado y detallado que nos permitirá diseñar una máquina de medición de árboles de levas capaz de cumplir con los objetivos de precisión, facilidad de uso y costes reducidos establecidos para el proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

El árbol de levas es una pieza clave en los motores de combustión interna, ya que regula la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, lo cual influye directamente en el rendimiento, eficiencia y durabilidad del motor. Una pequeña variación en el perfil de una leva puede afectar significativamente el comportamiento del motor, produciendo pérdida de potencia, consumo excesivo de combustible o fallos mecánicos.

Por ello, la medición del perfil de las levas no solo tiene un papel fundamental en el diseño de los motores, sino también durante las fases de producción y mantenimiento. Obtener los valores de un perfil permite comprobar si los componentes fabricados cumplen con las especificaciones teóricas, además de detectar posibles desgastes y/o deformaciones a lo largo del tiempo.

En el ámbito del diseño y mantenimiento de motores, especialmente en motocicletas de alto rendimiento y vehículos de competición, el análisis del árbol de levas permite optimizar la curva de potencia y adaptar el funcionamiento del motor a las necesidades concretas [1, Ecubitt Performance, 2018]. Sin embargo, muchas de las soluciones de medición existentes son complejas, costosas y enfocadas a grandes industrias, lo que limita el acceso a las pequeñas empresas o talleres.

Este proyecto nace precisamente con el objetivo de acercar esta tecnología a un entorno más accesible, mediante el desarrollo de un banco de pruebas funcional, económico y fácil de usar, que permita medir de forma automatizada y precisa el perfil de los árboles de levas.

En cuanto a la fiabilidad, la seguridad y la eficiencia en la industria actual son temas que se están convirtiendo en un mayor motivo de inversión para las empresas, tanto es así que el objetivo es alcanzar la seguridad que el producto que se quiere producir, responda de manera correcta a los criterios específico-técnicos en función del tiempo.

Por las razones ligadas a los temas citados, son muy utilizados los bancos de prueba, concretamente sistemas de verificación y de medida preparados para la detección de las características mecánicas en grado de producirse, los más fielmente posible, a las condiciones de trabajo y de esfuerzo de varios componentes de un sistema, con el fin de verificar de manera empírica la solidez del diseño teórico.

En particular, este documento abordará el estudio y diseño de un banco de pruebas capaz de tomar las medidas necesarias con total precisión de árboles de levas de motocicletas desde uno hasta cuatro cilindros. La elaboración del proyecto, el diseño y la selección de los componentes individuales determinarán la fiabilidad del sistema global.

Acerca de los componentes de transmisión de movimiento que se van a probar estarán sujetos por los dos extremos del eje, de forma que se obtiene un ángulo horizontal y por ende unos resultados válidos.

Por ello, es útil tener una herramienta capaz de realizar este tipo de pruebas ya que es una condición que se verifica frecuentemente en una gran cantidad de aplicaciones aportando, en ciertos casos, fallos de fabricación, diseño o un desgaste prematuro produciendo un incorrecto funcionamiento motor.

Los aspectos de diseño mecánico que se abordarán tendrán que ver especialmente con la construcción, con especial atención a los detalles que determinan el correcto montaje del producto, sin perder de vista el aspecto del coste de producción, que en muchos casos es el motivo que lleva a tomar decisiones dictadas por la mejor relación entre aspectos técnicos y económicos.

2. ÁRBOL DE LEVAS

La función del árbol de levas es abrir y cerrar las válvulas de admisión y escape de la culata, por lo que controla el llenado y vaciado de los cilindros. Es un elemento rotativo que dispone de las conocidas levas que son las encargadas de empujar las varillas que mueven el tren de las válvulas.

En el sector de la competición, los árboles de levas es uno de los factores más importantes a la hora de ajustar la curva de potencia correcta para cada motor y su modalidad. Hay que tener en cuenta que un mismo motor se puede desempeñar en diferentes ámbitos. Las curvas de potencia que se buscan en cada una de las categorías pueden tener objetivos totalmente dispares. La adaptación de la curva de potencia se realiza modificando los árboles de levas.

Cabe añadir que el proceso de medida de un árbol de levas es bastante complejo, por tanto, es difícil predecir el comportamiento del motor. Un banco de medición y análisis nos facilita y nos muestra datos con gran exactitud.

3. ESTUDIO DEL MERCADO ACTUAL

Actualmente, los instrumentos más conocidos y utilizados por la gran mayoría de profesionales están destinados a pequeños trabajos de medida que no requieren una alta precisión y están limitados a la obtención de ángulos o profundidad [2, Race Tools Direct].

Sin embargo, unas pocas empresas ofrecen un producto basado en un banco de pruebas acompañado de un software donde se recopila toda la información.

A continuación, se detalla un estudio realizado sobre el mercado actual y las empresas más relevantes hasta el momento.

3.1 JENOPTIK

En Francia encontramos al grupo JENOPTIK [3, Jenoptik], con sucursal en España, es una empresa muy centrada en el I+D, la cual oferta 4 productos relacionados con la medición de ejes torneados. Anuncian que las medidas que obtienen no son principalmente por contacto, sino por láser, de esta forma consiguen una gran precisión y garantía.

Por lo general, sus productos están enfocados al sector industrial, por lo que los bancos de pruebas son grandes, pesados y de muy alto coste. Dentro de lo que cabe, me centraré en su producto más económico, con las dimensiones más reducidas y manejabilidad.



Ilustración 3-1: Optocline CS. Fuente: Jenoptik

Este producto ha sido diseñado para tomar medidas en la producción de piezas torneadas, tiene un alto rendimiento y una precisión a partir de 2 micras. Se caracteriza por tomar medidas sin la necesidad de un operador.

3.2 MARPOSS

En el país italiano cabe destacar a MARPOSS [4, MARPOSS], a lo largo de los años ha recibido múltiples premios gracias a su inversión en I+D, dentro de todos los productos que oferta, se encuentra la gama Optoquick, centrada en la realización de controles de precisión en levas, manivelas, ejes de cambio y accionamiento.

Esta gama puede realizar las siguientes medidas dimensionales, de posición y forma:

- Diámetro
- Longitud
- Radio
- Chaflan
- Ángulo
- Excentricidad radial
- Excentricidad axial
- Concentricidad
- Cilindricidad
- Coaxialidad
- Rectitud



*Ilustración 3-2: medidas dimensionales de un eje.
Fuente: Marposs*

- Redondez
- Aplanamiento
- Simetría
- Paralelismo
- Perpendicularidad
- Perfil de leva
- Índice de carrera

Según anuncia MARPOSS, en sus productos utiliza los siguientes métodos:

- Sensores ópticos: capaces de realizar mediciones rápidas y precisas
- Por contacto: el método más rudimentario, pero a su vez efectivo, tiene gran valor como método complementario para obtener profundidad, ángulo de ranuras, superficies planas y excentricidad axial
- Sensor láser 3D
- Contacto de CAM seguida

3.3 MAHR

Empresa alemana [5, MAHR] con una gran experiencia en el sector, particularmente ofrece productos en función del tipo de medida que busque el cliente, por lo que divide sus gamas en:

- Máquinas táctiles
- Sistemas ópticos y táctiles
- Sistemas ópticos



Ilustración 3-3: medición óptica de árboles de levas. Fuente: Mahr

3.4 BLUM

Como segunda empresa alemana tenemos a Blum Novotest [6, Blum Novotest], a diferencia del resto, esta para reducir tiempos de verificación utiliza un método basado en sensores táctiles, llamado multipunto.

Donde se utiliza a lo largo de todo el árbol una gran cantidad de sensores que mide de forma simultánea.

Como punto fuerte de este novedoso sistema encontramos una gran velocidad de medición para un árbol de levas completo, pero en contra, la dificultad de coordinar todos los sensores y la variación de la posición de los sensores en el caso de cambiar el árbol.

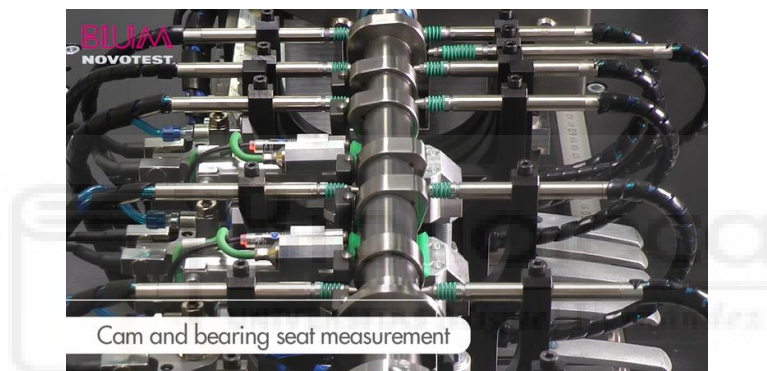


Ilustración 3-4: máquina de medición multipunto. Fuente: Blum

3.5 CGK Gage Group LLC

Por lo visto, esta empresa [7, CGK Gage Group LLC] tiene un producto muy cercano al proyecto que se tiene en mente, además de productos ciertamente parecidos a los mencionados en páginas anteriores.

Es la solución económica para verificar el perfil del árbol de levas, ángulo fase y otras cualidades.

Tienen una versión manual y otra automática.

Las medidas tomadas son:

- Ángulo fase
- Radio del círculo base

- Diámetro medio
- Elevación máxima
- Error de perfil en punta y flancos
- Error de perfil en rampa

3.6 EXPLORACIÓN DEL MERCADO ITALIANO

El estudio del mercado italiano se ha incluido de forma específica debido a la reconocida trayectoria del país en los sectores de la automoción, la ingeniería mecánica de precisión y el diseño de componentes de alto rendimiento.

Italia tiene algunas de las marcas más prestigiosas del mundo en el ámbito de los motores, tanto para coches como motocicletas (Ferrari, Ducati, Lamborghini, etc.), y ha creado una red de proveedores y empresas especializadas en tecnologías de medición, control de calidad y automatización.

Además, las ferias internacionales como EMO Milán o las noticias técnicas italianas reflejan un mercado muy activo en la innovación de soluciones para el control dimensional.

Por esta razón, el mercado italiano cobra un gran valor para el estudio de innovaciones y productos en el diseño de bancos de prueba.

3.6.1 VICIVISION

El modelo MTL 1250 X-Stream, mide de forma óptica, para ello utiliza un iluminador y una videocámara [8, VICIVISION].



Ilustración 3-5: MTL 1250 X-Stream. Fuente: Vicivision

Esto permite registrar todo el perfil para el que es necesario medir; diámetros, longitudes y ángulos.

También es posible realizar medidas dinámicas; run out, cilindrada. Además del perfil de la leva, obtiene importantes datos teóricos con el fin de obtener aceleraciones, velocidades y la posición particular de cada leva.

Todos sus modelos tienen un funcionamiento muy sencillo, la máquina solamente tiene 3 botones, start, reset y estatus.

A continuación, se exponen comentarios de clientes de VICIVISION.

3.6.1.1 Cliente PANERLFISA

Proveedor global de elementos de fijación producidos por estampación en frío y especializados en el sector de la automoción.

Compraron una máquina con la intención de reducir tiempos y garantizar las mediciones que anteriormente se realizaban a mano.

Como ventajas encontraron, mediciones más rápidas, más fiables, trazabilidad de las mediciones y han acelerado el proceso de validación de las piezas, además de mejorar el porcentaje de productos defectuosos [9, PANERLFISA, 2021].

3.6.2.2 Cliente UTILITÀ

UTILITÀ está enfocada en el sector de la aviación, aeronáutica, implantología dental y ortopédica.

Afirman que las máquinas VICIVISION son muy importantes, la máquina de medición óptica es muy útil para entender el deterioro de las herramientas durante el trabajo.

Gracias a sus máquinas controlan todas las medidas de forma, posicionamientos y diámetros [10, UTILITÀ, 2021].

3.6.2 PERIÓDICO INDUSTRIA ITALIANA

Avanzando en el estudio, debo destacar el periódico italiano INDUSTRIA ITALIANA, que dedica un apartado para mencionar a la empresa MARPOSS comentada unas páginas atrás.

Marposs: gli occhi sulle e-car... Tutto sul big delle macchine utensili

di Piero Macri ♦ L'azienda della famiglia Possati - fatturato prossimo al mezzo miliardo - punta sulla mobilità elettrica. OptoCloud: tecnologia ottica a nuvola di punti, ricostruzione 3d di modelli complessi. OptoFlash: prima unità di misurazione ottica con campo assiale di 300 mm. Maindo: piattaforma per digitalizzazione e manutenzione predittiva. L'acquisto di MeSys e gli investimenti in r&d. In occasione del Mecspe ne abbiamo parlato con Fabio Faggioli

28 Aprile 2023

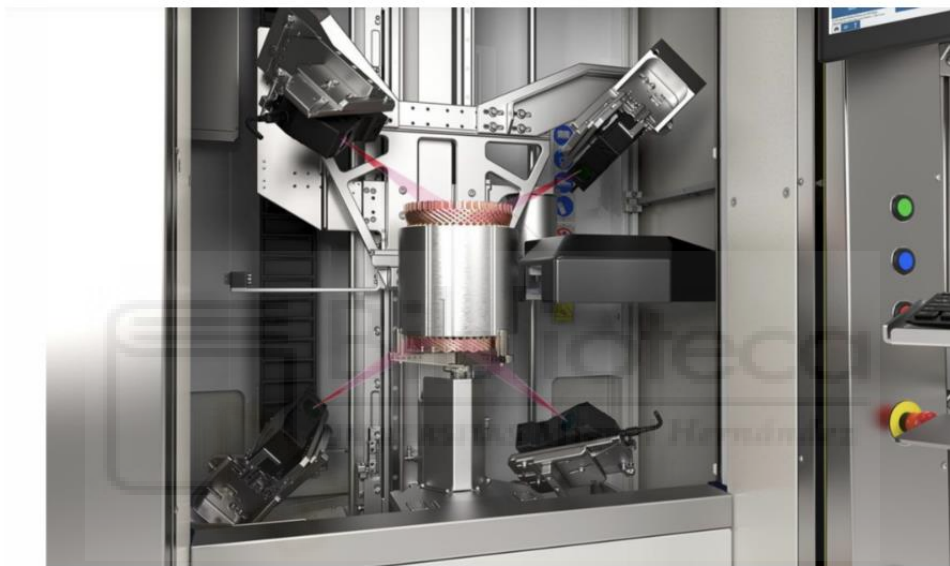


Ilustración 3-6: Industria italiana, 28 abril 2023. Fuente: Industria Italiana

La empresa ha aparecido en el periódico italiano “Industria italiana”, en él comentan algunas de las gamas centradas en la obtención de medidas por medio de sensores ópticos y destacan que es una de las empresas más importantes en relación con las herramientas necesarias para la construcción de automóviles.

En un fragmento de la entrevista, comentan la nueva unidad de medida óptica con un campo axial de 300mm. Este instrumento sea desarrollado con la intención de medir árboles de dimensiones reducidas como pueden ser implantes dentales, con esta nueva unidad, la empresa ofrece una precisión y calidad en el ambiente de producción del mismo nivel que se puede encontrar en el laboratorio.

Se basa en dos sensores 2D fijos, estos captan imágenes y las combinan entre ellos para finalmente obtener una sola imagen. Gracias a esto, se representa de forma perfecta el componente. Para complementar, el componente se mueve en el eje Z, esto garantiza mediciones continuas, estables y en breves intervalos de tiempo [11, Industria Italiana, 2023].

3.6.3 FERIA EMO DE MILÁN

La EMO de Milán es la feria comercial más importante del mundo para la industria metalúrgica, es un escaparate para las innovaciones de la tecnología de producción global.

En el año 2021, una de las principales empresas alemanas en el sector de la tecnología de medición industrial, WENZEL, presentó su nueva serie de productos, la serie GT.

Esta nueva serie se basa en la experiencia de desarrollo y producción de dispositivos especializados en la medición de engranajes. Ofrece mediciones para engranajes de módulo pequeño, componentes con simetría de rotación, desde piezas dentadas y eje de vehículos comerciales hasta transmisiones ferroviarias o engranajes marinos [12, WENZEL, 2021].

4. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO

Tras la investigación en el mercado de los bancos capaces de obtener medidas de árboles de levas, puedo concluir que hasta el momento no hay una gran cantidad de empresas que estén centradas en la investigación y desarrollo de dicho producto, además la mayoría se centra en cadenas de montaje y sector industrial para verificar y garantizar las correctas medidas.

Cabe añadir que en casi todos los artículos se utiliza más de un método de medida, siendo los más utilizados el táctil y sensor óptico.

En vista de lo anterior, considero que como base de proyecto este podría encaminarse no tanto al sector industrial sino más a los pequeños comercios y/o talleres que busquen

mejorar sus servicios con un producto más reducido en costes, tamaño y un uso más intuitivo sin necesidad de formación profesional.

5. CONOCIMIENTOS PREVIOS

Antes de comenzar con el desarrollo del proyecto, debo comentar ciertos aspectos a tener en cuenta, con el fin de comprender y orientar correctamente el sentido que tomará el proyecto.

5.1 FUNCIONAMIENTO

Para comenzar, en un motor de combustión interna, el árbol de levas controla la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape. En una motocicleta de competición, la sincronización precisa es esencial para optimizar la eficiencia del motor y maximizar la potencia.

Los perfiles de levas específicos en el árbol de levas determinan la duración y el tiempo de apertura de las válvulas, afectando la cantidad de mezcla de aire y combustible que ingresa y sale de la cámara de combustión. La forma en que el árbol de levas se conecta y gira en conjunto con el cigüeñal es vital.

Las motocicletas de competición suelen utilizar sistemas de distribución de válvulas más avanzados, como el DOHC (Double Over Head Camshaft), que utiliza dos árboles de levas para mayor precisión y control.

En resumen, el árbol de levas desempeña un papel esencial al sincronizar la apertura y cierre de las válvulas para lograr un rendimiento óptimo del motor y maximizar la potencia en situaciones de competición [13, AlprodpuF1, 2015].

5.2 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS ÁRBOLES DE LEVAS

5.2.1 DURACIÓN Y CRUCE

Son los parámetros más importantes que definen la característica del árbol y es el primer dato que hay que tener en consideración.

Para una fácil comprensión, el funcionamiento de un árbol de levas funciona de forma similar a un grifo cuando se abre y se cierra. Cuando se abre, el aire entra y este es quemado por el motor. De forma muy simplificada podemos decir que la *duración* nos dice cuanto tiempo el grifo está abierto.

Esto tiene como resultado, que cuanto mayor es la fuerza que empuja la leva mayor es su duración.

Para calcular la duración, es necesario saber interpretar el diagrama de distribución:

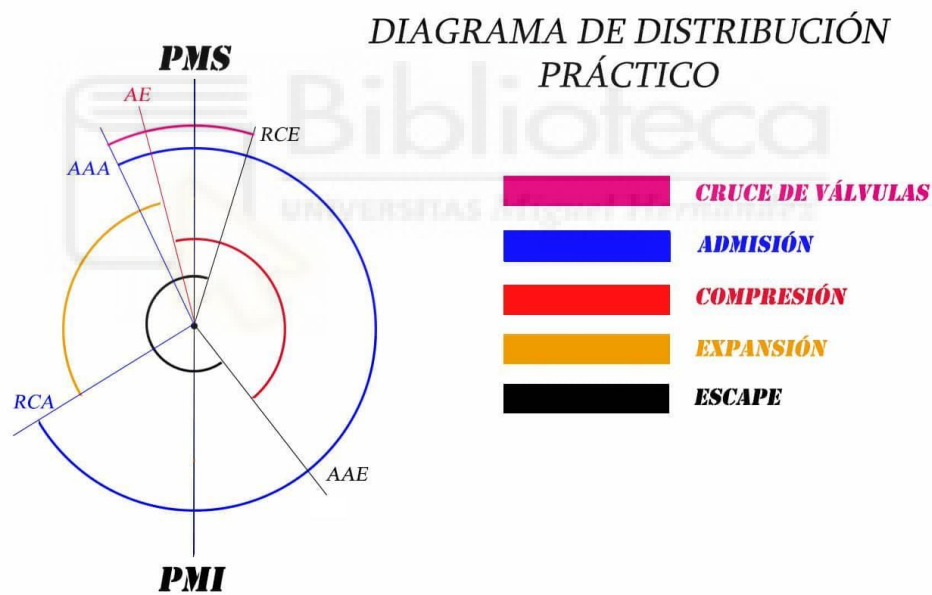


Ilustración 5-1: diagrama de distribución [14, Actualidad motor]

- AAA: Avance – Apertura – Válvula de Admisión
- RCA: Retraso – Cierre – Admisión
- AAE: Avance – Apertura – Escape
- AE: Apertura – Escape
- RCE: Retraso – Cierre – Escape

Resumidamente, estos son los tiempos en los que ocurren todos los procesos que realiza el pistón dentro del cilindro, todos estos tiempos se interpretan en grados.

Como muestra la imagen, hay momentos donde los procesos se solapan, por ejemplo, podríamos decir que el timing (momento justo) de aspiración es 21/61, esto quiere decir, que la válvula de admisión se empieza a abrir cuando el pistón haya recorrido 21° desde el PMS (Punto Muerto Superior) y se cierra 61° después del PMI (Punto Muerto Inferior).

Entendido esto, la duración se calcula sumando los grados de inicio y fin del proceso más 180°.

Por tanto, en el ejemplo de timing de aspiración 21/61, este proceso tendría una duración 262° de duración.

$$\textit{Timing aspiracion} = 21^{\circ} + 61^{\circ} + 180^{\circ} = 262^{\circ}$$

Sin embargo, el cruce representa el tiempo donde la leva de admisión y la de escape están en fase de apertura. Depende entonces de la duración y del diagrama de distribución.

Es fundamental aclarar sobre la base en la que se van a tomar los valores, no es posible comparar dos soluciones diferentes si se han tomado de forma distinta.

Por ejemplo, un Peugeot 207 1.6 utiliza un motor TU5JP4 110CV, este con un juego de válvula de 0,1mm da una duración de 242°, en cambio, si se utiliza el juego de 1mm su duración es de 199°.

Para un juego de válvulas de 0.1mm

Duración= 242°

Para un juego de válvulas de 1mm

Duración= 199°

$$\Delta \textit{Duración} = 242^{\circ} - 199^{\circ} = 43^{\circ}$$

Un aumento en el juego de válvulas provoca un cierre más temprano de la válvula.

Por lo general, el sector utiliza un juego de válvulas del 0,1mm, de esta forma es más sencillo para los productores comparar los datos obtenidos de su producto con el de la competencia, claro está que esta información no está al alcance del público o

competencia, por lo que es necesario contactar con la empresa y solicitar dicha información [15, Motorparts España, 2020].

5.2.2 ALTURA

La altura a la que ascenderá la válvula gracias a la leva influirá de forma muy significativa por el rendimiento del eje.

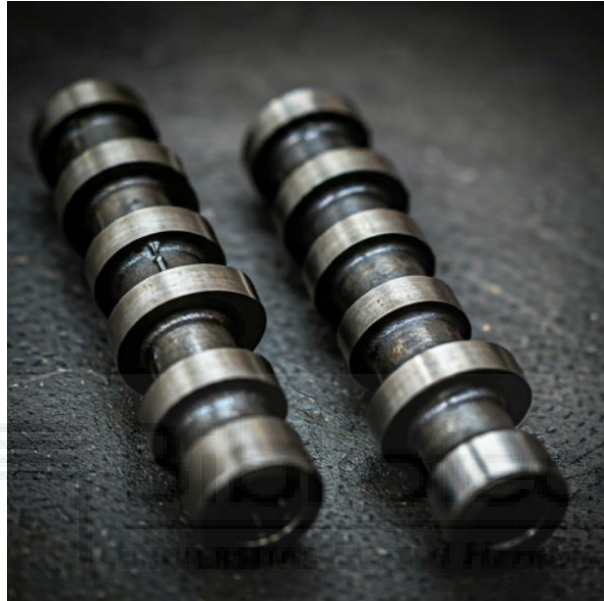


Ilustración 5-2: diferencia de altura de leva. Fuente: psa-evolution

Además, junto a la altura es importante definir el perfil, no sólo por el rendimiento sino también por la fiabilidad y el tiempo de vida útil.

5.2.3 PERFIL

Todas las empresas son capaces de crear árboles de levas con más o menos altura, pero no todos son capaces de fabricar perfiles óptimos y es por ello su gran importancia.

La forma de la leva influye en cuanto a la velocidad de apertura de la válvula y de los puntos de referencia de altura máxima, cabe añadir que el tipo de impacto que se produce tiene resultados en la vida útil del eje.

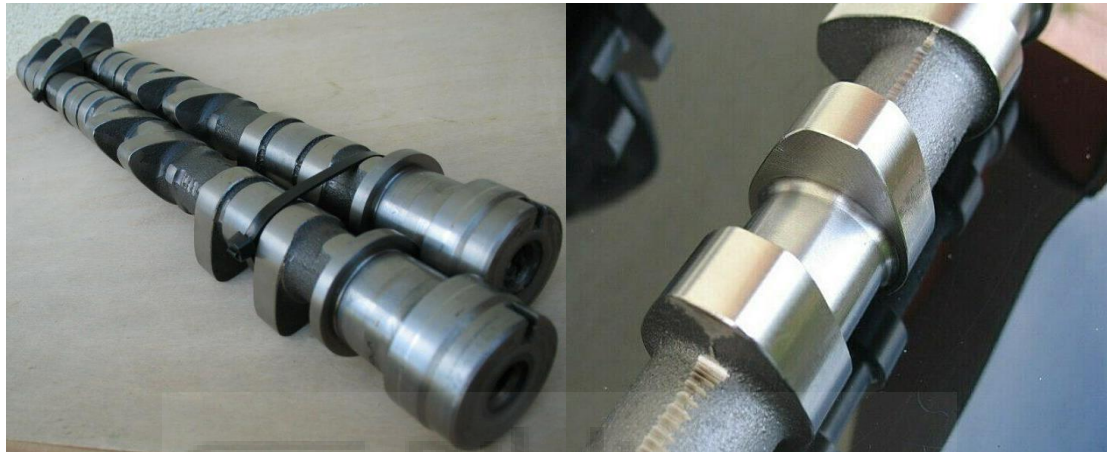


Ilustración 5-3: comparación de perfil Fuente: psa-evolution

En estos dos árboles se puede observar con facilidad los diferentes perfiles que tienen uno con el otro.

En uno se observa más altura, una forma más triangular y continua, por tanto, intuimos que la válvula tendrá una mayor apertura a una velocidad más reducida y con un menor impacto. Y en el otro caso, al tener un perfil cuadrado, la velocidad de apertura será mucho mayor y con un mayor impacto sobre la superficie de la leva, lo que supondrá a largo plazo un desgaste prematuro [16, psa-evolution, 2014].

6. MATERIAL Y MÉTODOS

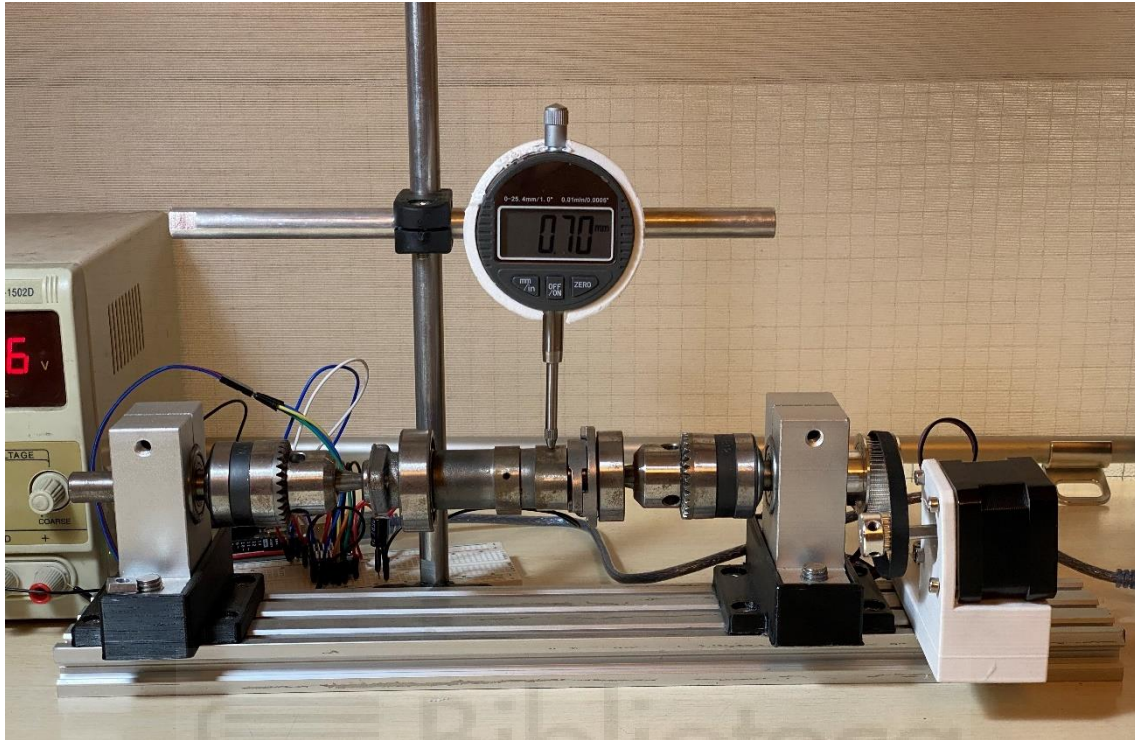


Ilustración 6-1: sistema de sujeción. Fuente elaboración propia

Acerca del material con el que partimos el proyecto, para la construcción se ha seleccionado el material necesario para garantizar la precisión y confiabilidad en las mediciones.

El material base consiste en un perfil de aluminio resistente que servirá como estructura principal del banco. La elección del aluminio se basa en su combinación de durabilidad y ligereza, proporcionando una plataforma robusta para el sistema.

Además, se emplearán dos mandriles para sujetar el árbol de levas en ambos extremos durante las pruebas. Estos dos mandriles han sido fabricados con materiales resistentes y ajustables para adaptarse a diferentes tamaños de árboles de levas, asegurando una sujeción firme y segura durante las operaciones de medición [17, ShamWerks, 2017].

Agregando a lo anterior, los mandriles estarán sujetos por unos soportes que serán los encargados de mantenerlos alineados y móviles. Asimismo, estos soportes están equipados de dos rodamientos para permitir la rotación del mandril.

El componente encargado de la rotación del árbol de levas es un motor 17HS8401S paso a paso de dos fases, para garantizar una velocidad constante y controlada. La elección de este motor se basa en su capacidad para proporcionar la velocidad de rotación requerida sin comprometer la exactitud de las mediciones.

Tabla 1: especificaciones técnicas motor 17HS13-0404S [18, Amazon]

MOTOR 17HS13-0404S	
PARÁMETROS	VALORES
Voltaje	12V
Corriente	2A
Velocidad	200 rpm
Caballos de potencia	30 W
Par	2,6 Nm
Material	Acero aleado
Tipo	Paso a paso bipolar
Ángulo de paso	1,8°
Resistencia	30 Ω
Inductancia	30 mH
Longitud del eje	20 mm
Diámetro del eje	5 mm
Peso	230 g

Por otro lado, es necesario un indicador Dial para hacer contacto con el perfil de levas y este comunicarlo directamente por cable USB al programa del ordenador.

Así mismo, se ha integrado un sistema electrónico para mejorar la precisión y la automatización del banco de pruebas. Una placa Arduino ha sido incorporada para

controlar el movimiento del árbol de levas producido por el motor y establecer comunicación con el ordenador.

Se ha diseñado un circuito para alimentar tanto el motor como la placa Arduino, garantizando un suministro de energía estable y seguro durante las mediciones.

6.1 CONTROL Y MONITOREO

El uso de la placa Arduino no solo facilita el control de la rotación del árbol de levas, sino que también establece una interfaz para la transmisión de datos. Esto posibilita la integración con un programa diseñado para comprobar y analizar los resultados tomados durante las pruebas.

Esta mejora tecnológica agrega una capa de eficiencia y precisión al proceso de medición, contribuyendo a una investigación más avanzada y detallada.

6.2 CONCLUSIONES

La inclusión de tecnologías electrónicas, como la placa Arduino y el circuito de alimentación dedicado, eleva el banco de pruebas a un nivel superior de eficiencia y control. Este enfoque integral no solo permite mediciones más precisas de los perfiles de levas, sino que también allana el camino para investigaciones más avanzadas en el desarrollo de motores de combustión interna de vanguardia.

7. DISEÑO

7.1 CÓMO SE DISEÑÓ EL BANCO DE PRUEBAS

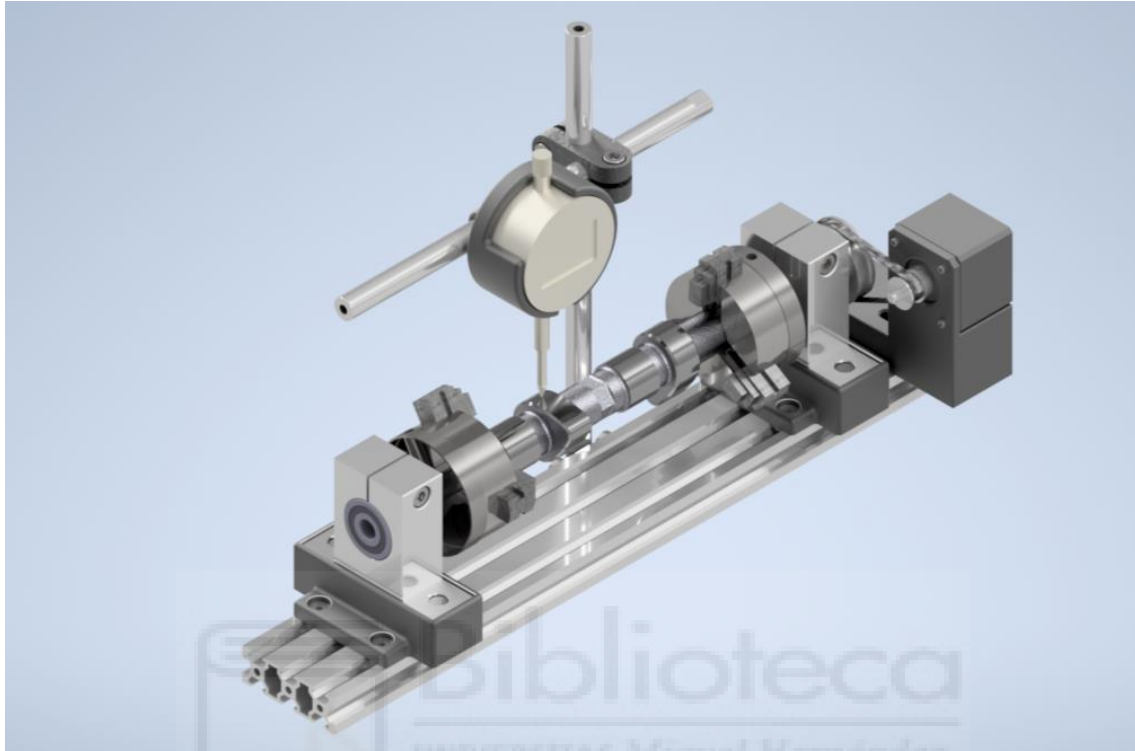


Ilustración 7-1: ensamblaje banco de pruebas. Fuente: elaboración propia

El objetivo principal era desarrollar una solución accesible, económica y funcional, capaz de adaptarse tanto a entornos académicos como técnicos. A continuación, se detalla el proceso de diseño mecánico y electrónico del banco, así como los componentes seleccionados y la forma en la que han sido integrados en el sistema.

Para asegurar la precisión y funcionalidad del banco de pruebas, se utilizaron herramientas avanzadas de diseño asistido por ordenador (CAD) con el software Autodesk Inventor. A continuación, se detallan los principales componentes diseñados.

7.1.1 ESTRUCTURA DEL BANCO

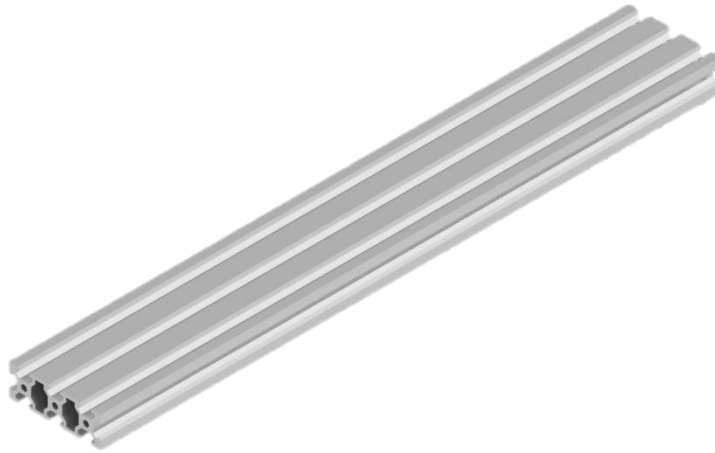


Ilustración 7-2: estructura base. Fuente: elaboración propia

La estructura del banco de pruebas constituye la base sobre la que se montan todos los componentes mecánicos y electrónicos para la medición del perfil del árbol de levas. Esta estructura ofrece una combinación entre robustez, estabilidad y ligereza.

Se ha optado por una estructura fabricada con perfiles de aluminio ranurado tipo 20x20 mm, este tipo de estructuras son muy utilizadas en prototipos y laboratorios, ya que ofrecen ventajas como:

- **Fácil montaje y modificación:** gracias a sus ranuras en forma de T, permiten el uso de tornillería estándar para fijar componentes
- **Rigidez adecuada:** aunque el sistema no soporta grandes esfuerzos, sí es fundamental minimizar vibraciones y holguras que pudieran afectar a la toma de datos
- **Peso reducido:** el aluminio permite un transporte y manejo más sencillo sin sacrificar estabilidad
- **Estética y orden:** permite una disposición ordenada de los elementos, mejorando el montaje

7.1.2 MANDRILES

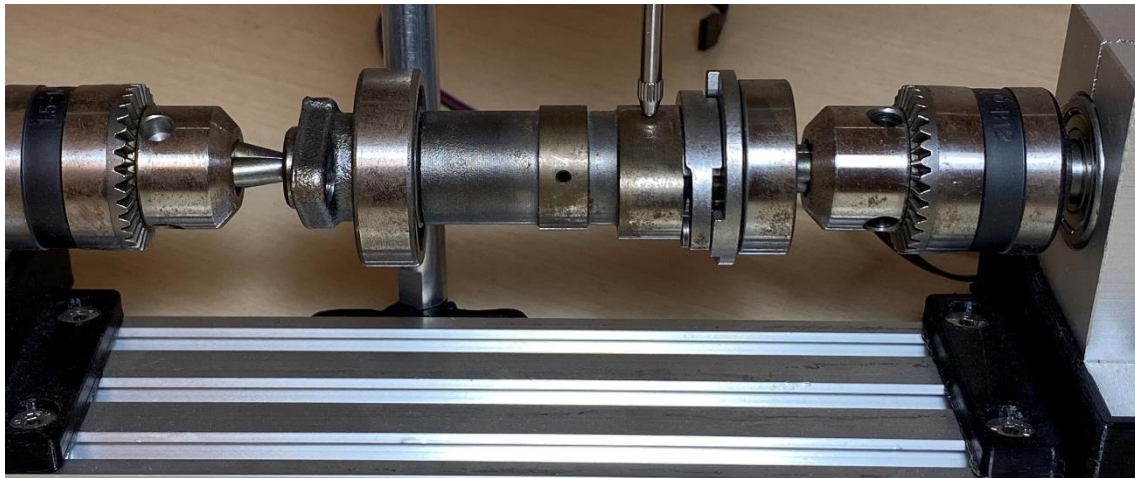


Ilustración 7-3: mandriles y árbol de levas. Fuente: elaboración propia

Los mandriles son los encargados de sujetar el árbol de levas por sus extremos, esto asegura mantenerlo siempre centrado y sin desplazamientos durante su rotación.

Ambos mandriles disponen de una ranura longitudinal y un tornillo prisionero que permite ajustar la presión de sujeción sobre el eje sin dañarlo, garantizando a la vez la inmovilidad durante la medición.

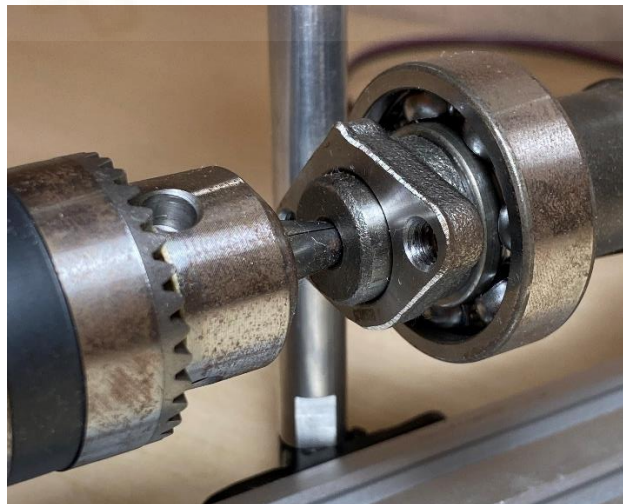


Ilustración 7-4: sujeción mandril. Fuente: elaboración propia

Cada mandril cuenta con un eje trasero, esto permite su alojamiento dentro de los rodamientos montados en los soportes. Esto facilita la transmisión del movimiento de giro y asegura una rotación suave y centrada. Además, uno de los mandriles consta

de una rueda dentada fijada mediante un tornillo prisionero, esta rueda conecta a través de una correa la rueda dentada fijada en el eje del motor, transmitiendo el movimiento de forma precisa sin holgura.

En versiones futuras del sistema, se podrían desarrollar mandriles intercambiables, ajustables mediante mordazas o casquillos para permitir la sujeción de distintos tipos de árboles de levas.

7.1.3 SOPORTES DE LOS MANDRILES

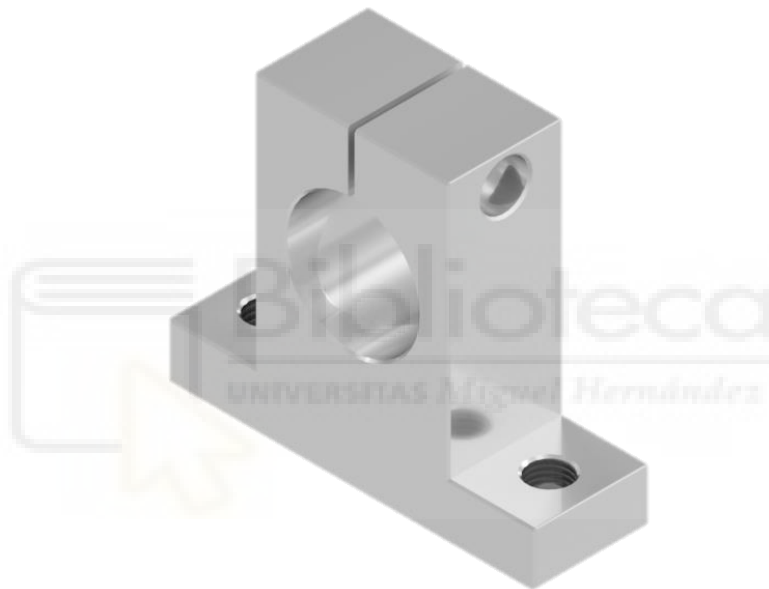


Ilustración 7-5: soporte mandril. Fuente: elaboración propia

Los soportes de los mandriles mantienen los mandriles en posición, alineados entre sí y a una altura constante respecto a la base, permitiendo una rotación estable del árbol de levas.

Cada mandril se apoya sobre un conjunto de soporte y rodamiento, situado en ambos extremos del banco. Para facilitar el montaje y el ajuste, los soportes fueron diseñados y fabricados como bloques metálicos mecanizados.

En la parte superior del soporte se ha fresado un alojamiento que permite el encaje de los rodamientos. Esta cavidad ha sido realizada con tolerancias ajustadas, de modo que el rodamiento quede sujeto, pero sin deformaciones que alteren el funcionamiento o reduzcan la vida útil de este.

Para evitar desplazamientos longitudinales del mandril durante la rotación, los ejes de los mandriles tienen unas rebabas que limitan dicho movimiento. Este detalle es clave para evitar que el árbol se desplace lateralmente durante la toma de datos.

La geometría de los soportes ha sido pensada no solo para ofrecer estabilidad, sino también para permitir un desmontaje rápido del árbol, un mecanizado rápido y sencillo.

En resumen, los soportes garantizan la rigidez estructural necesaria para el sistema y de esta forma conservar la precisión, minimizar vibraciones y facilitar el mantenimiento del banco.

7.1.4 ADAPTADOR DE LOS SOPORTES



Ilustración 7-6: adaptación soporte mandril. Fuente: elaboración propia

Los soportes de los mandriles, aunque son funcionales por su geometría y sujeción, no se adaptan de forma directa a la estructura de aluminio. Esta incompatibilidad surge principalmente por diferencias en las dimensiones.

Para resolver este inconveniente, se diseñaron adaptadores que permiten acoplar los soportes de los mandriles a la estructura base del banco. Estos adaptadores funcionan

como una pieza de unión entre la estructura y los soportes, permitiendo el desplazamiento longitudinal.

Estos adaptadores permiten insertar tornillos los cuales, roscan en tuercas tipo T y fijarlas a las ranuras del perfil. En la parte superior, el adaptador incorpora orificios avellanados que coinciden con la base del soporte del mandril, permitiendo su atornillado directo.

7.1.5 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

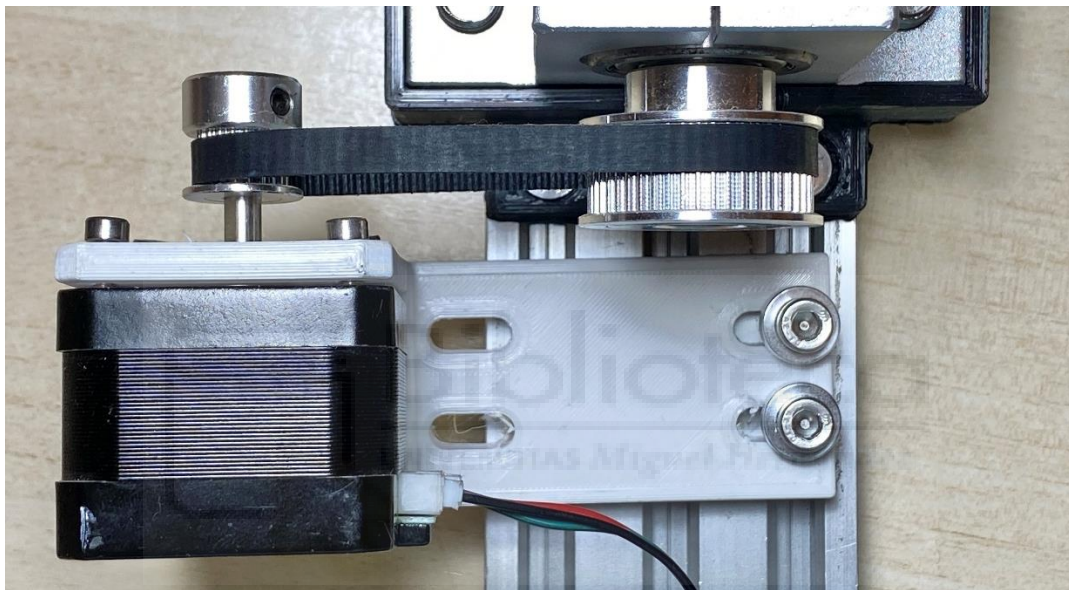


Ilustración 7-7: sistema de transmisión. Fuente: elaboración propia

El sistema de transmisión es el encargado de transferir el movimiento rotatorio generado por el motor paso a paso al árbol de levas, permitiendo así su giro durante la toma de datos. Este movimiento debe ser preciso, fluido y libre de holguras para asegurar que el valor tomado es sin errores mecánicos.

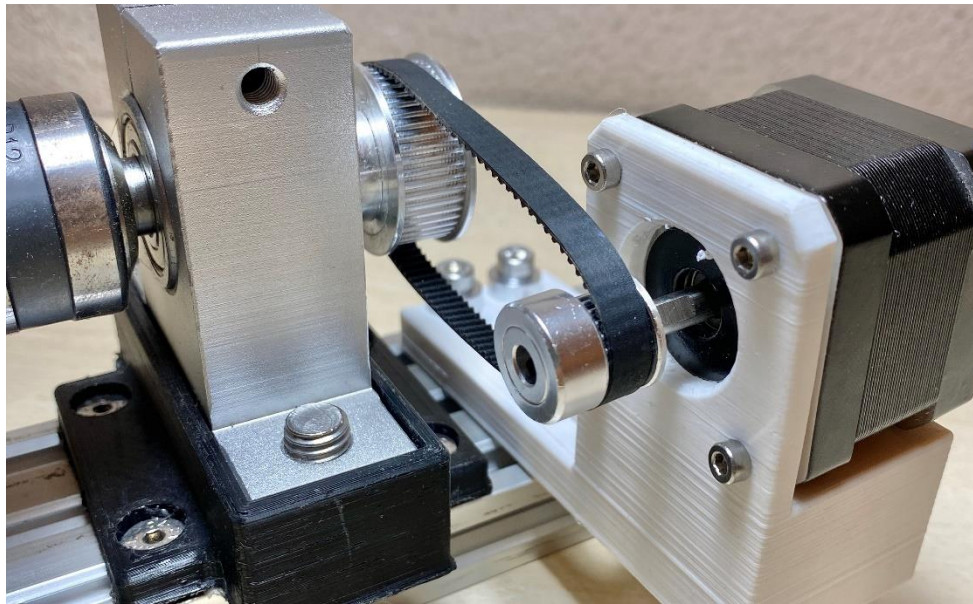


Ilustración 7-8: eje primario. Fuente: elaboración: propia

Para lograr este objetivo, se optó por una transmisión directa mediante dos ruedas dentadas y una correa. Esta decisión se tomó con el fin de minimizar cualquier pérdida de precisión por juegos mecánicos y obtener una lectura real.

El componente central del sistema es un motor paso a paso modelo 17HS13-0404S, conocido por su capacidad de realizar giros controlados. Este tipo de motor es especialmente utilizado en aplicaciones donde se demanda un control detallado de la posición y la velocidad, sin ir más lejos, la impresora 3D que se ha utilizado a lo largo del desarrollo de este proyecto, utiliza tres unidades de este modelo.

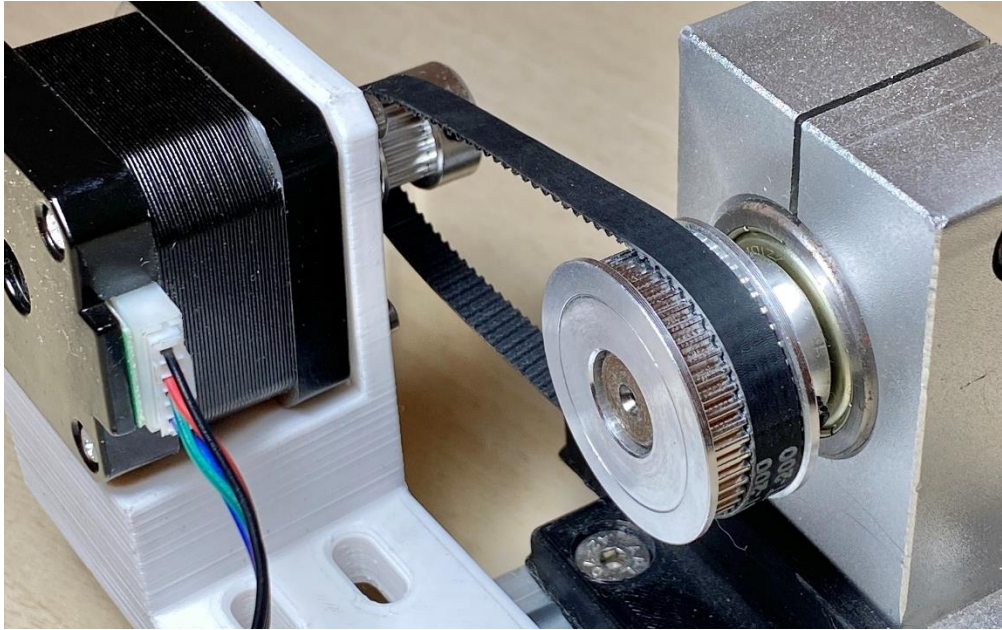


Ilustración 7-9: eje secundario. Fuente: elaboración propia

En el eje del motor se acopla una rueda dentada fijada gracias a un tornillo prisionero, utilizando una correa, esta transmite el movimiento del motor al mandril conductor.

En cuanto a la alimentación del motor, esta se realiza mediante una fuente de 12 V externa y su control se gestiona desde la placa Arduino UNO a través del controlador DRV8825, que permite dividir los pasos del motor para obtener una rotación más suave y precisa. La velocidad de rotación se ajusta desde el propio programa de MATLAB, a través de la slider de la interfaz.

El sistema está diseñado para trabajar a velocidades bajas y constantes, ya que una rotación demasiado rápida podría afectar a la precisión del dial o hacer que este pierda contacto con la superficie de la leva. En las pruebas preliminares, se ha comprobado que una velocidad de rotación lenta permite una lectura continua y fiable del perfil, manteniendo el sistema estable.

7.1.6 SOPORTE DEL MOTOR



Ilustración 7-10: soporte motor. Fuente: elaboración propia

El soporte del motor cumple una doble función: por un lado, fijar el motor paso a paso de forma segura y estable a la estructura del banco de pruebas y, por otro lado, permite su desplazamiento longitudinal para mantener la tensión y alineación del sistema de transmisión.

El soporte ha sido diseñado específicamente para adaptarse a los anclajes de nuestro cuerpo motor, permitiendo la fijación mediante los cuatro orificios roscados de los que está compuesto el motor. Este soporte se ancla a la estructura de la misma forma que los adaptadores de los soportes de los mandriles, mediante tornillos que roscan en tuercas tipo T, de modo que puede moverse a lo largo del eje horizontal del banco. Esta movilidad es crucial para ajustar correctamente la tensión de la correa y garantizar un acoplamiento firme entre las ruedas dentadas.

El conjunto formado por el motor, su soporte móvil, las ruedas dentadas y la correa constituyen una solución eficiente, ajustable y rígida para transmitir el giro del árbol de levas.

7.1.7 MEDIDOR DIAL



Ilustración 7-11: medidor dial. Fuente: elaboración propia

El indicador dial es el componente encargado de medir la elevación del perfil del árbol de levas durante su rotación. Su funcionamiento se basa en un palpador que traduce el desplazamiento vertical en una señal digital, la cual transmite directamente al ordenador en tiempo real a través de una conexión USB.

Es necesario recalcar que se ha utilizado un indicador digital electrónico, este es capaz de obtener valores con una resolución de centésimas de milímetro. Esta es una precisión adecuada para el tipo de mediciones que se realizan en perfiles de leva. Como diferencia con un medidor mecánico convencional, el indicador digital permite una lectura rápida y automatizada, sin la necesidad de intervenir el usuario.



Ilustración 7-12: medidor dial digital. Fuente: elaboración propia

Otro rasgo para destacar es que este medidor se comporta como un dispositivo de entrada al conectarse por USB, es decir, cada vez que registra un cambio de posición, envía un valor numérico. Esa función simplifica mucho la integración con MATLAB ya que no es necesario configurar ningún puerto serie ni protocolos de comunicación.

Durante el funcionamiento del banco, el dial se apoya sobre el perfil de la leva. A medida que esta gira, las variaciones de altura del perfil provocan que el palpador se desplace de forma vertical. Cada una de estas variaciones de altura queda registrada con un valor numérico y dicho valor es almacenado y graficado automáticamente en la interfaz de App Designer.

Gracias a su precisión, facilidad de uso y compatibilidad con el programa desarrollado en MATLAB, el indicador dial ha demostrado ser una solución muy eficiente para este tipo de aplicaciones, donde la fiabilidad de las mediciones es de alta importancia.

7.1.8 SOPORTE INDICADOR DIAL



Ilustración 7-13: soporte medidor Dial. Fuente: elaboración propia

El soporte del indicador dial es un elemento clave dentro de todo el sistema, ya que garantiza que el sensor de medición esté siempre en contacto y en su posición correcta con el perfil del árbol de levas. Se ha diseñado para ofrecer estabilidad y una correcta alineación con el eje del árbol.

Durante el proceso de diseño, se tuvo en cuenta que la precisión de la medición depende en gran medida de la ubicación del palpador respecto al eje de rotación de la leva. Por este motivo, el soporte ubica el eje del palpador de forma transversal a la línea del eje del árbol de levas, de modo que cualquier desplazamiento vertical será una variación real del perfil, sin distorsiones debidas a ángulos incorrectos o desviaciones laterales.

Cabe destacar que su altura y posición son ajustables, gracias a la estructura creada con varillas fijaciones, permitiendo adaptar el sistema a distintas configuraciones o diámetros de árbol de levas.

Para asegurar que el palpador se mantenga presionado contra el perfil de la leva sin excesiva fuerza, se ha dispuesto el dial con una ligera inclinación controlada y una alineación precisa a nivel vertical.

Este enfoque modular y ajustable no solo mejora la precisión del sistema, sino que también facilita su uso en diferentes configuraciones futuras, permitiendo montar árboles de levas de distintos tamaños sin necesidad de rediseñar o fabricar nuevos componentes.

7.1.9 ELECTRÓNICA DE CONTROL

La electrónica de control es la encargada de gestionar el movimiento del motor paso a paso y asegura una correcta comunicación entre el sistema mecánico y el programa de control.

Lo más importante de la electrónica es la placa Arduino UNO, que actúa como interfaz entre el usuario y los componentes físicos. Se ha optado por esta placa por su relación versatilidad, fiabilidad, facilidad de integración además de ser un instrumento altamente utilizado en el entorno educativo donde se empiezan a dar los primeros pasos en ambientes de programación y sistemas electrónicos.

7.1.10 CONTROL DE MOTOR: DRV8825

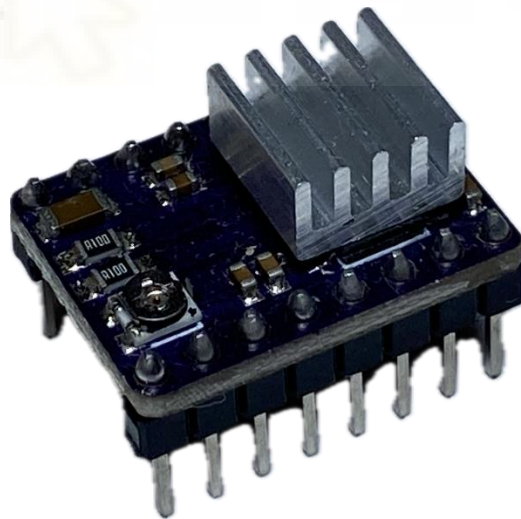


Ilustración 7-14: controlador del motor. Fuente: elaboración propia

El control del motor paso a paso se realiza mediante el controlador DRV8825, un módulo muy utilizado en aplicaciones donde se busca precisión y control de corriente. Este controlador se conecta directamente a la placa Arduino mediante tres señales:

- **STEP:** determina cuando el motor avanza un paso
- **DIR:** define el sentido de giro (horario o antihorario)
- **ENABLE:** permite activar o desactivar el motor

Estas señales son controladas desde MATLAB, enviando comandos al Arduino, este interpreta dichos comandos y los traduce en pulsos electrónicos hacia el controlador.

Todavía cabe señalar que una de las características por las que fue escogido el controlador DRV8825 es por su capacidad de microstepping, esta técnica permite subdividir cada paso del motor en fracciones de paso más pequeñas, esto tiene como resultado una rotación más suave y precisa, lo cual es especialmente importante en sistema de medición como este.

8. PROGRAMA

8.1 APP DESIGNER

En este proyecto se ha decidido utilizar MATLAB, específicamente su aplicación App Designer, debido a la experiencia previa adquirida durante el grado, donde este programa ha sido una herramienta fundamental en diversas asignaturas. MATLAB es conocido por su facilidad de uso, su entorno intuitivo y por ser un software muy completo, ideal para abordar tareas complejas como la representación de resultados, manejo de datos y control de hardware.

8.1.1 FUNCIONES CLAVE QUE OFRECE MATLAB Y APP DESIGNER

MATLAB se empleará para desarrollar un programa que permita graficar el perfil del árbol de levas, almacenar los datos recolectados durante las mediciones y controlar la velocidad del motor de la máquina. Las funciones más relevantes que ofrece MATLAB para este proyecto son:

- **Visualización 2D:** utilizaré esta capacidad para graficar el perfil del árbol de levas en tiempo real, proporcionando una representación clara y precisa de las mediciones.

- **Gestión de datos:** MATLAB permite manejar y procesar los datos de manera eficiente. En este caso, los datos se almacenarán en un archivo **CSV**, que podrá ser exportado fácilmente a Excel para su análisis o documentación posterior.
- **App Designer:** Esta herramienta facilitará la creación de una interfaz gráfica de usuario intuitiva y personalizada. Los elementos principales que incluirá la interfaz son:
 - Un gráfico 2D para visualizar el perfil de la leva
 - Un botón de encendido y apagado
 - Un control deslizante (*slider*) para ajustar la velocidad del motor
 - Un panel para mostrar en tiempo real el valor que transmite el indicador dial, que se conecta mediante un puerto USB

8.1.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL PROYECTO

El programa se integrará con los componentes hardware mediante:

1. Una placa Arduino UNO, que se encargará de controlar el motor de la máquina y comunicarse con MATLAB a través de comandos
2. Un indicador dial, que enviará datos al ordenador a través de un puerto USB, permitiendo que las mediciones se muestren en tiempo real en un gráfico
3. El control de velocidad del motor se realizará mediante el slider incluido en la interfaz, lo que permitirá ajustar la potencia de manera sencilla y precisa

Ventajas

Por un lado, su capacidad para diseñar gráficos personalizados y de manera intuitiva, esto facilita su uso para los operarios, de esta manera, reducimos el riesgo de errores. Además, al permitir la personalización, será posible adaptar la interfaz a los requerimientos que desee el usuario.

Desventajas

Podemos encontrar posibles problemas a la hora de adaptar librerías para establecer la comunicación con Arduino o con el manejo en tiempo real del indicador dial.

8.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO

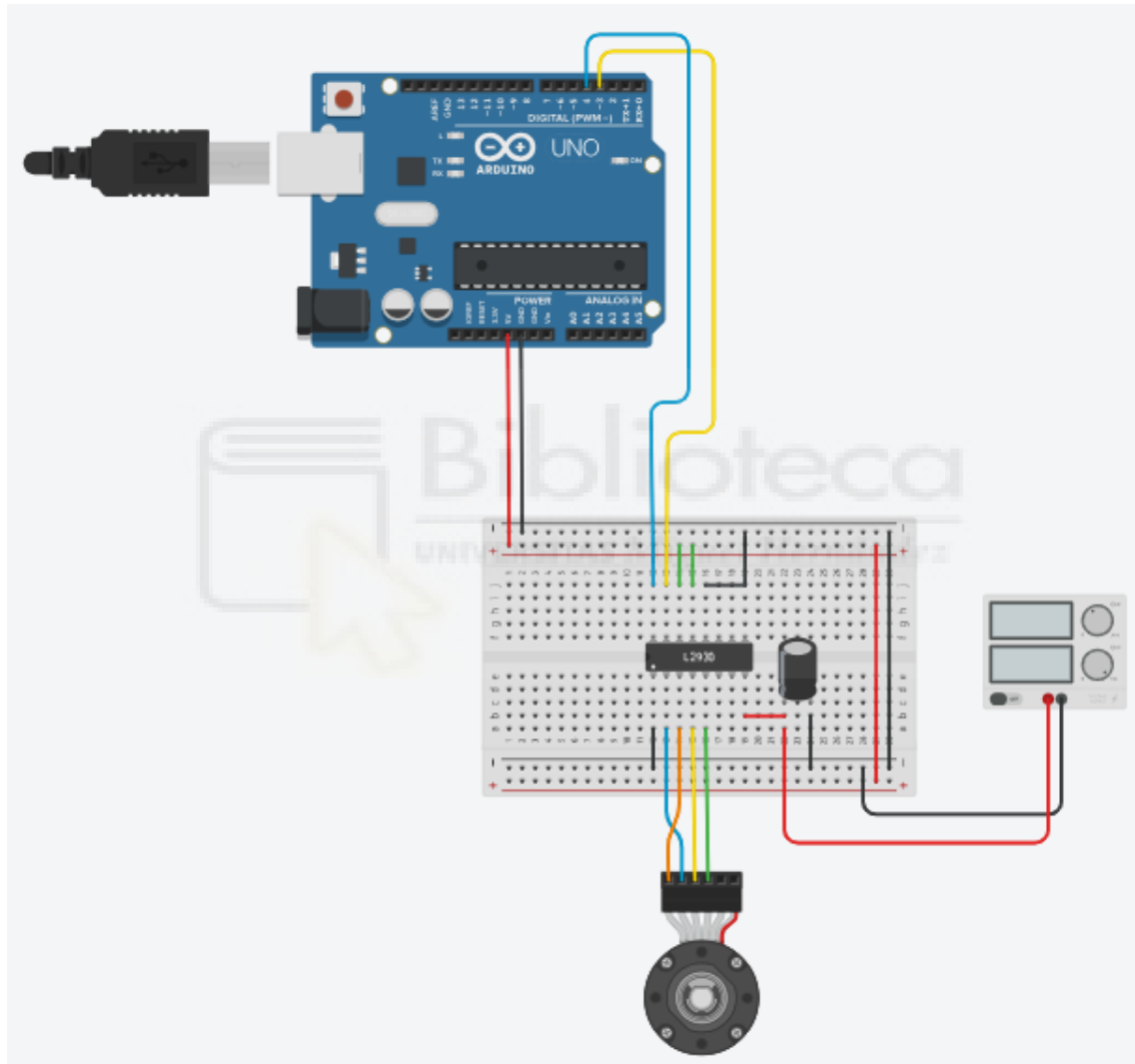


Ilustración 8-1: representación visual de sistema electrónico mediante Tinkercad. Fuente: elaboración propia

Por lo que se refiere a montaje del circuito, para el control del motor se ha utilizado un circuito basado en una placa Arduino UNO y un controlador DRV8825. Con el fin de graficar el sistema electrónico, se he hecho uso del programa Autodesk Tinkercad, el cual

no incluye en su librería el controlador con el que trabajaremos, por lo que haremos uso de un L293D a modo simbólico. Lo mismo ocurre con el motor, ya que el modelo de Tinkercad utilizado tiene seis conexiones, mientras que el nuestro sólo dispone de cuatro. En el esquema se han conectado únicamente cuatro de ellos, de forma representativa [19, EAZYTRONIC, 2025].

Más allá de estas limitaciones visuales, el diagrama refleja las conexiones entre los distintos componentes.

8.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN



Ilustración 8-2: fuente de alimentación. Fuente: elaboración propia

El motor necesita más potencia de la que puede suministrar directamente el Arduino, por lo que se emplea una fuente externa. Se recomienda una fuente de 12 V y al menos 1.5 A.

- El polo positivo (+) se conecta a la entrada VMOT del VR8825
- El polo negativo (-) se conecta a la línea TIERRA del controlador

Cabe añadir que para que funcione correctamente el sistema, es importante que la TIERRA esté conectada también a la TIERRA del Arduino, de modo que ambos dispositivos tengan la misma referencia eléctrica.

8.2.2 CONDENSADOR PROTECTOR

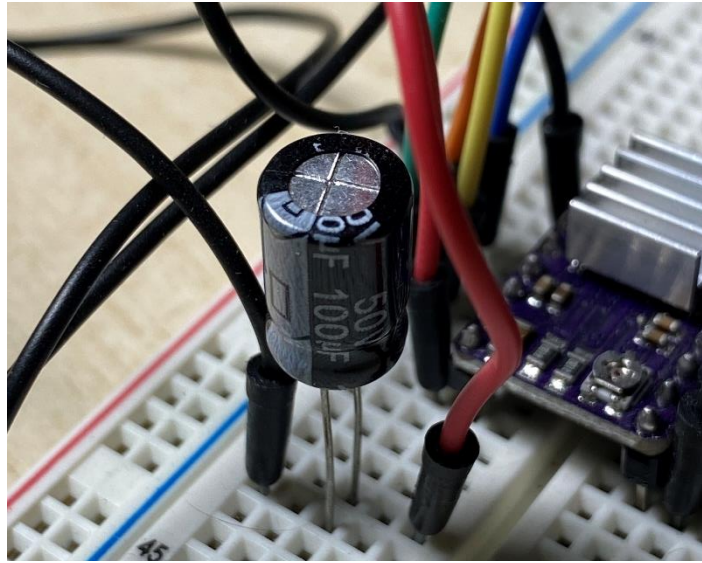


Ilustración 8-3: condensador 100 μ F 50 V. Fuente: elaboración propia

En cuanto a la protección del controlador, he utilizado un condensador de 100 μ F y 50 V, con el objetivo de estabilizar la tensión y absorber posibles picos de voltaje que pueden producirse en diferentes situaciones, como cuando el motor frena o cambia de dirección. Este condensador ha sido recomendado por el propio fabricante del controlador.

Hay que tener en cuenta que este condensador está polarizado, por lo tanto, lo conectaremos de la siguiente forma:

- Polo positivo (+) se conecta a VMOT
- Polo negativo (-) se conecta a TIERRA

8.2.3 MOTOR PASO A PASO

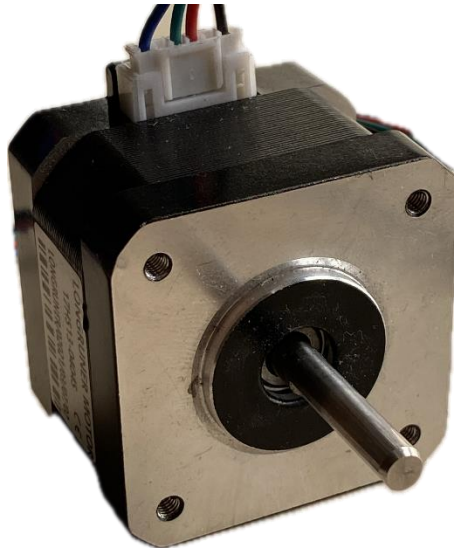


Ilustración 8-4: modelo 17HS13-0404S. Fuente: elaboración propia

Otro punto es el motor, modelo 17HS13-0404S es bipolar y dispone de dos bobinas internas. Para conectarlo al controlador correctamente, es necesario identificar qué cables corresponden a cada bobina. Esto se ha averiguado con la ayuda de un multímetro: los cables que muestran continuidad eléctrica entre sí pertenecen a la misma bobina.

Una vez identificadas, las conexiones han sido las siguientes:

Tabla 2: conexiones bobina - controlador

BOBINA	CABLE DEL MOTOR	DRV8825
A (+)	Negro	A1
A (-)	Verde	A2
B (+)	Rojo	B1
B (-)	Azul	B2

8.2.4 CONEXIÓN ENTRE DRV8825 Y ARDUINO

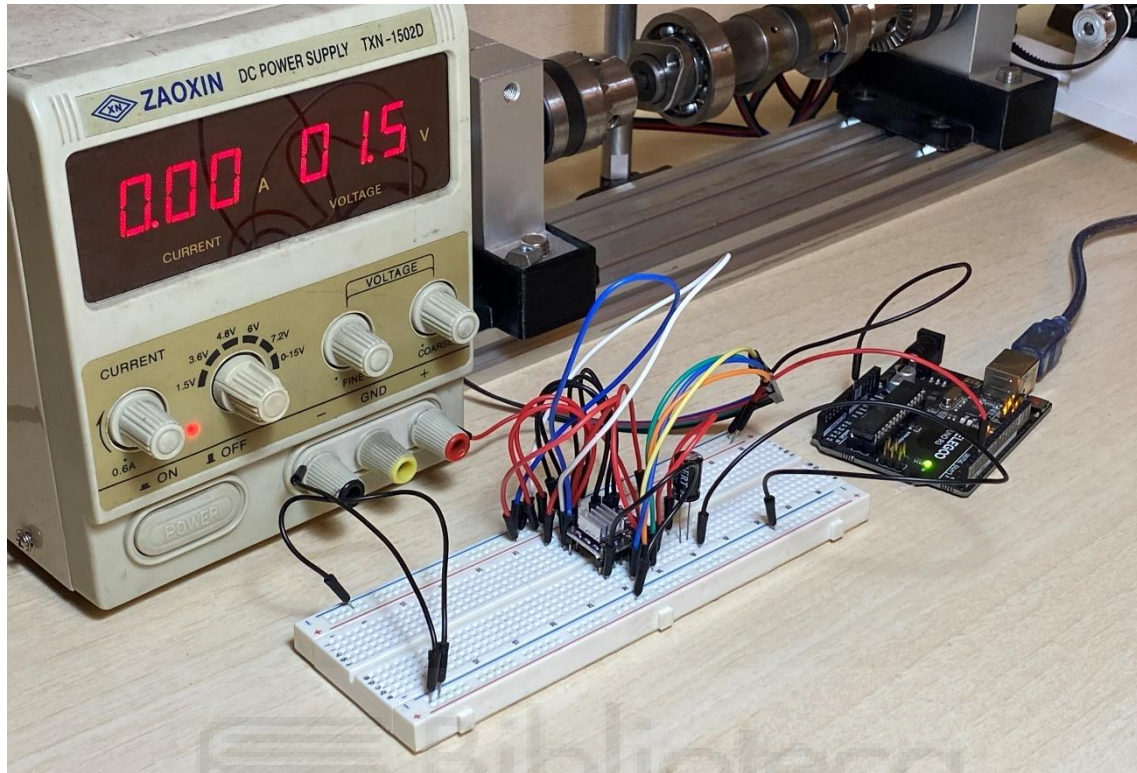


Ilustración 8-5: conexión DRV8825 y Arduino. Fuente: elaboración propia

La placa Arduino actúa como cerebro del sistema, enviando las órdenes de dirección y paso al controlador. Para ello, se realizan las siguientes conexiones:

- STEP > Pin digital 3 del Arduino
- DIR > Pin digital 4 del Arduino
- ENABLE > conectado directamente a TIERRA
- TIERRA del controlador > TIERRA del Arduino

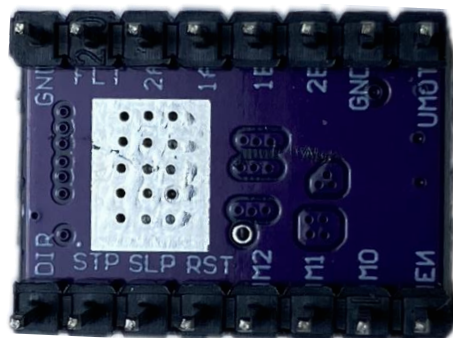


Ilustración 8-6: conexiones DRV882. Fuente: elaboración propia

8.2.5 COMPONENTES UTILIZADOS

Tabla 3: componentes utilizados

COMPONENTE	ESPECIFICACIÓN
Arduino UNO	Controlador principal
Driver DRV8825	Controlador del motor paso a paso bipolar
Motor 17HS13-0404S	Motor paso a paso bipolar
Fuente de alimentación	12 V DC, 1.5A
Condensador	100 μ F, 50V, electrolítico
Protoboard / Circuito de conexiones	Conexiones

8.2.6 CONSIDERACIONES FINALES

Aunque el diagrama creado en Tinkercad no permite representar exactamente el DRV8825 ni el motor real, ha sido útil para visualizar la lógica de las conexiones. En el montaje real se ha sustituido el controlador simbólico por un DRV8825 y se han respetado las conexiones descritas anteriormente. También se ha tenido en cuenta mantener una correcta fuente de alimentación y conectar correctamente los pines del motor para garantizar el funcionamiento de este.

8.3 CONEXIÓN E INTEGRACIÓN CON MATLAB

Una vez completado el montaje del circuito, el paso sucesivo ha consistido en establecer la comunicación entre el sistema electrónico y el programa MATLAB, con el objetivo de controlar el motor paso a paso y visualizar en tiempo real los datos provenientes del sistema.

Para ello, se ha utilizado la comunicación por USB entre la placa Arduino y el ordenador de trabajo. Gracias a esta conexión el programa recibe datos del microcontrolador y, a su vez, le envíe órdenes que modifiquen el comportamiento del motor.

8.3.1 COMUNICACIÓN ARDUINO - MATLAB

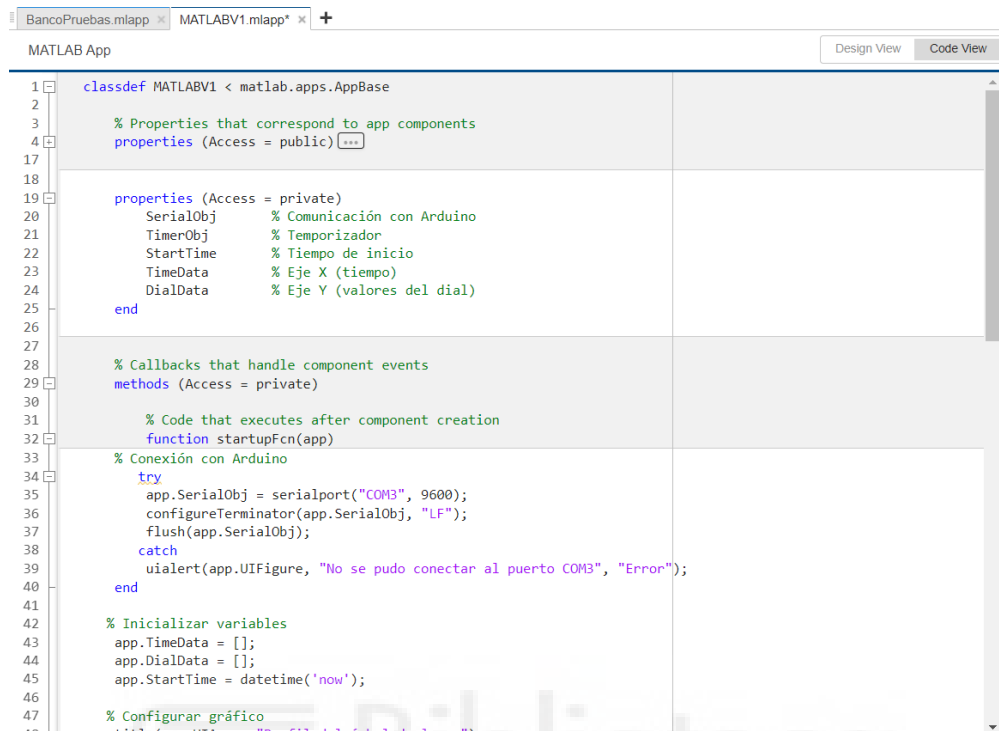


Ilustración 8-7: conexión ARDUINO. Fuente: elaboración propia

Para empezar, MATLAB dispone de herramientas integradas para establecer comunicación serial, esto facilita la conexión con la placa Arduino. En este caso, se ha abierto un puerto serie (COM3) con una velocidad de transmisión de 9600 baudios, que coincide con la configurada en el programa cargado en el Arduino.

Una vez tenemos la conexión, el programa puede enviar comandos que el Arduino interpreta para mover el motor en una dirección u otra, cambiar su velocidad o detenerlo. Asimismo, el Arduino puede enviar de vuelta datos que MATLAB representa gráficamente o almacena en un archivo “.csv” para su posterior exportación.

8.4 COMUNICACIÓN ENTRE ARDUINO Y MATLAB

Una vez diseñado el circuito y desarrollada la interfaz en App Designer, el siguiente paso ha sido establecer la lógica de comunicación entre MATLAB y Arduino, lo cual permite que las acciones realizadas por el operario en la aplicación se traduzcan en órdenes que afectan al comportamiento del motor [20, MATLAB].

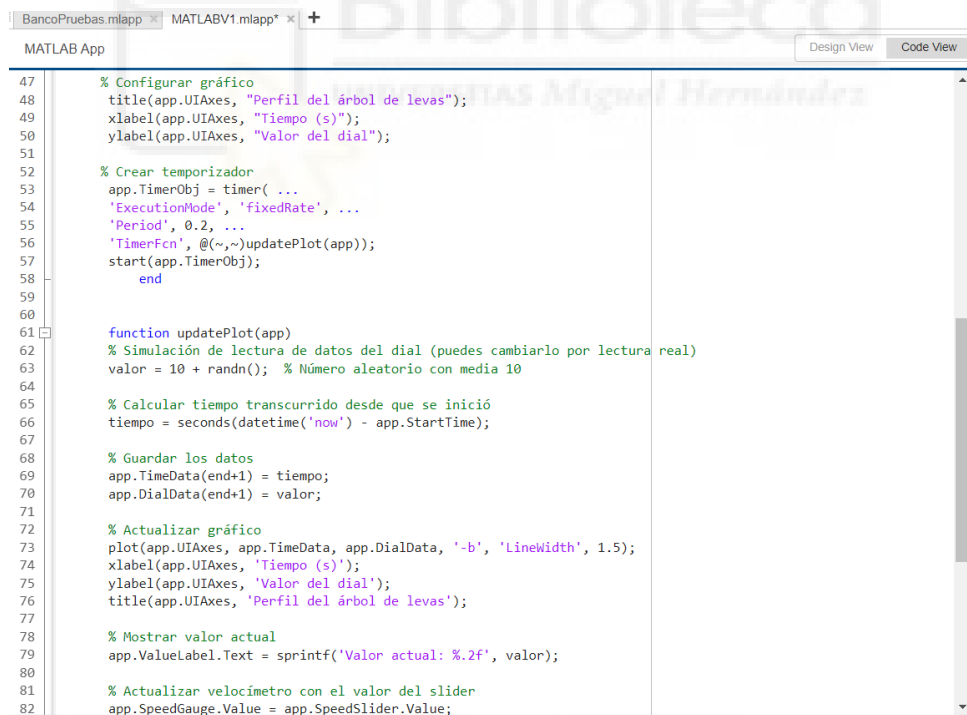
8.4.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

La comunicación se realiza a través de un puerto USB, utilizando instrucciones simples que se envían desde MATLAB hacia Arduino, por ejemplo, al presionar el botón de inicio de la aplicación, el programa envía una cadena de texto como “START” que el programa cargado en el Arduino interpreta como una orden para comenzar a mover el motor.

De manera parecida, otras acciones como puede ser cambiar la dirección o ajustar la velocidad generan distintas órdenes que el microcontrolador recibe y ejecuta.

Este sistema de control basado en mensajes breves y claros hace que sea fácil de mantener la comunicación y además permite posibles ampliaciones que pueda requerir el operario.

8.4.2 CAPTURA Y VISUALIZACIÓN DE DATOS



```

47 % Configurar gráfico
48 title(app.UIAxes, "Perfil del árbol de levas");
49 xlabel(app.UIAxes, "Tiempo (s)");
50 ylabel(app.UIAxes, "Valor del dial");
51
52 % Crear temporizador
53 app.TimerObj = timer( ...
54 'ExecutionMode', 'fixedRate', ...
55 'Period', 0.2, ...
56 'TimerFcn', @(~,~)updatePlot(app));
57 start(app.TimerObj);
58 end
59
60
61 function updatePlot(app)
62 % Simulación de lectura de datos del dial (puedes cambiarlo por lectura real)
63 valor = 10 + randn(); % Número aleatorio con media 10
64
65 % Calcular tiempo transcurrido desde que se inició
66 tiempo = seconds(datetime('now') - app.StartTime);
67
68 % Guardar los datos
69 app.TimeData(end+1) = tiempo;
70 app.DialData(end+1) = valor;
71
72 % Actualizar gráfico
73 plot(app.UIAxes, app.TimeData, app.DialData, '-b', 'LineWidth', 1.5);
74 xlabel(app.UIAxes, 'Tiempo (s)');
75 ylabel(app.UIAxes, 'Valor del dial');
76 title(app.UIAxes, 'Perfil del árbol de levas');
77
78 % Mostrar valor actual
79 app.ValueLabel.Text = sprintf('Valor actual: %.2f', valor);
80
81 % Actualizar velocímetro con el valor del slider
82 app.SpeedGauge.Value = app.SpeedSlider.Value;

```

Ilustración 8-8: visualización de datos. Fuente: elaboración propia

Además del control del motor, la aplicación recibe datos enviados desde el medidor Dial. Estos valores se transmiten por otro puerto USB y se representan en una gráfica que muestra la evolución de los valores a lo largo del tiempo. Esta representación de los

valores permite al operario observar el perfil de la leva con claridad, incluso durante el funcionamiento del sistema.

Los datos recogidos se almacenan en un archivo CSV, de esta forma facilitamos la exportación de los datos obtenidos para posteriormente utilizar herramientas como Excel para comprobar y modificar los valores que sean de interés.

8.4.3 SINCRONIZACIÓN ENTRE LECTURA Y CONTROL

Una parte fundamental del proyecto ha sido conseguir que el control del motor y la recogida de datos del medidor dial funcione a la vez, sin interferirse entre sí. Esto puede parecer sencillo, pero en la práctica requiere cierta coordinación para evitar errores en la comunicación entre el programa, el Arduino y el puerto USD del medidor dial.

Para ello, he estructurado el programa de manera que cada parte del sistema funcione por unas conexiones diferentes.

Por un lado, el motor se controla a través de las órdenes enviadas por el operario desde la aplicación, como iniciar, detener o cambiar la velocidad.

Por otro lado, la lectura de los datos del dial se hace de forma continua y se actualiza en el gráfico sin afectar al movimiento del motor.

La clave está en usar un temporizador dentro de MATLAB, que se encarga de controlar cada cuánto se actualiza la gráfica con los nuevos datos del dial. De esta forma, se evita que MATLAB esté constantemente pendiente de leer el puerto USB, lo que podría ralentizar el resto del sistema. Además, se consigue que tanto la visualización como el control del motor sean fluidos y respondan bien a las acciones del usuario.

En resumen, el sistema debe ser capaz de mover el motor con precisión y al mismo tiempo mostrar en pantalla las mediciones en tiempo real, sin que una cosa entorpezca a la otra. Esta sincronización ha sido esencial para que todo funcione de manera estable y sin retrasos.

8.5 DESARROLLO DEL CÓDIGO Y FUNCIONAMIENTO

Para garantizar una comunicación funcional entre el usuario y el sistema de medición, el proyecto se ha dividido en dos partes principales: por un lado, el código que se ejecuta en la placa Arduino y, por otro lado, el código que ejecuta el programa diseñado en App Designer. A continuación, se describe cómo funciona cada uno y cómo interactúan entre sí.

8.5.1 CÓDIGO DE ARDUINO

En primer lugar, el Arduino actúa como el intermediario entre MATLAB y el motor. Su principal función es recibir las órdenes enviadas desde el ordenador y ejecutarlas de forma precisa. Para ello, se han configurado los pines del controlador DRV8825, que es el encargado de gestionar las órdenes que activan el motor.

En cuanto al funcionamiento general, el Arduino permanece a la espera de recibir comandos a través del puerto serie. Una vez recibe una orden, la interpreta y la ejecuta, ya sea encendiendo el motor, modificando el sentido de giro o ajustando la velocidad [21, MATLAB].

Además, el programa ha sido diseñado para que sea intuitivo y fácilmente interpretable desde MATLAB:

Tabla 4: funciones de los comandos

COMANDO	FUNCIÓN
START	Activa motor
STOP	Detiene motor
CW	Giro sentido horario
CCW	Giro sentido anti
SPEED:	Modifica la velocidad de gira

A modo ilustrativo, el siguiente fragmento muestra una versión simplificada del código implementado en la placa:

```
const int stepPin = 3;

const int dirPin = 4;

bool running = false;

int delayTime = 500;

void setup() {

    pinMode(stepPin, OUTPUT);

    pinMode(dirPin, OUTPUT);

    Serial.begin(9600);

}

void loop() {

    if (Serial.available()) {

        String command = Serial.readStringUntil('\n');

        command.trim();

        if (command == "START") {

            running = true;

        } else if (command == "STOP") {

            running = false;

        } else if (command == "CW") {

            digitalWrite(dirPin, HIGH);

        } else if (command == "CCW") {
```

```
digitalWrite(dirPin, LOW);  
  
} else if (command.startsWith("SPEED:")) {  
    delayTime = command.substring(6).toInt();  
}  
  
}  
  
if (running) {  
    digitalWrite(stepPin, HIGH);  
    delayMicroseconds(delayTime);  
    digitalWrite(stepPin, LOW);  
    delayMicroseconds(delayTime);  
}  
}
```



En resumen, este código permite un control flexible y directo del motor desde MATLAB, sin necesidad de modificar el código del microcontrolador para cada cambio.

8.5.2 INTERFAZ PROGRAMA APP DESIGNER

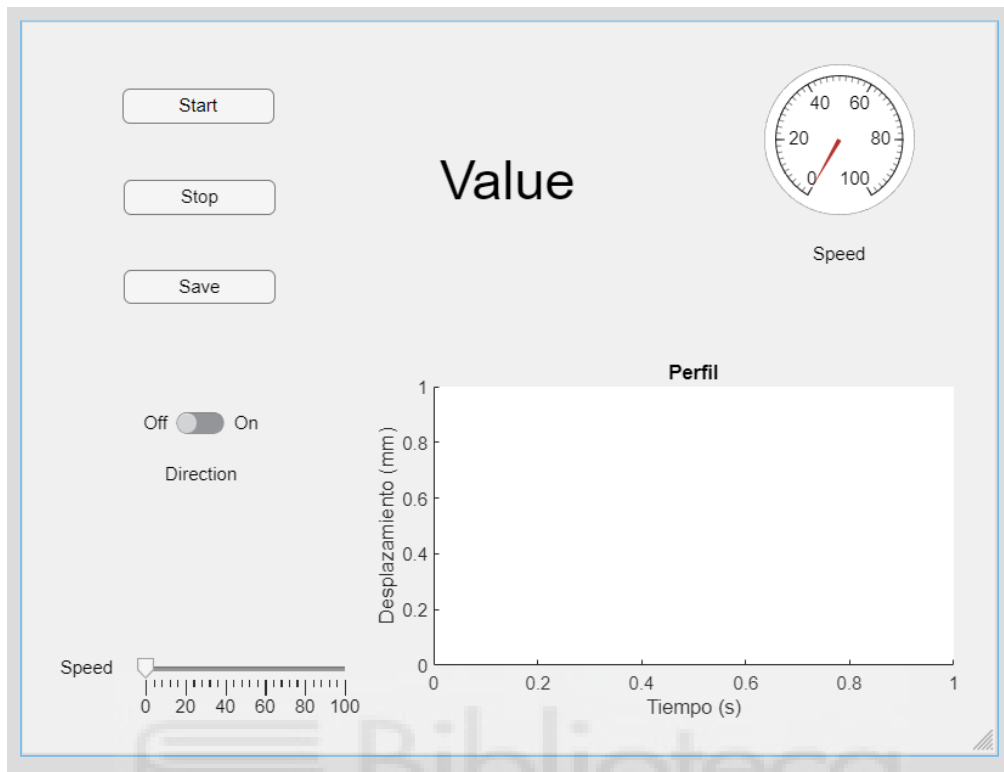


Ilustración 8-9: interfaz programa App Designer. Fuente: elaboración propia

Por otra parte, se ha desarrollado una interfaz personalizada mediante App Designer. Esta aplicación permite al usuario interactuar de forma sencilla e intuitiva con el sistema, sin necesidad de conocimientos técnicos en programación.

Concretamente, la interfaz incluye los siguientes elementos:

- Botón de inicio motor
- Botón de parada motor
- Deslizador para ajustar la velocidad del motor
- Interruptor para cambiar el sentido de giro
- Indicador número para mostrar en tiempo real el valor que está leyendo el medidor dial
- Gráfica en tiempo real, donde se representa el perfil del árbol de levas
- Sistema de almacenamiento automático en un archivo CSV

En adición, se emplea dentro del código un temporizador para mantener una lectura continua del medidor dial, esto permite actualizar tanto la gráfica como el valor numérico de forma fluida.

Por último, esta interfaz también establece una conexión con el puerto serie del dial, el cual transmite datos al ordenador mediante eventos del teclado. De esta forma, el valor medido se puede capturar automáticamente y representar gráficamente en tiempo real.

9. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

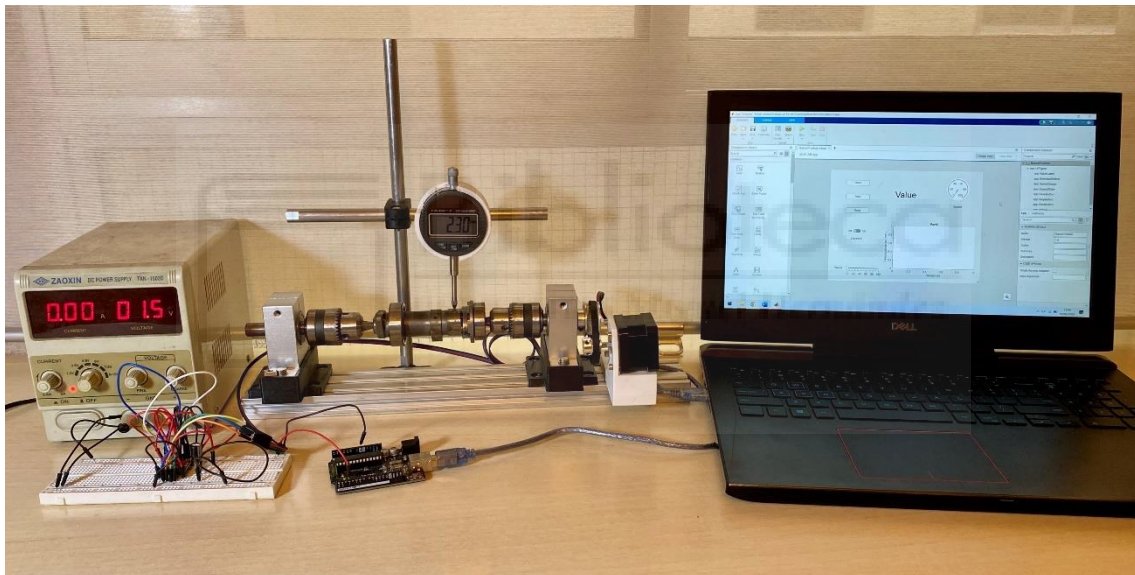


Ilustración 9-1: proyecto final. Fuente: elaboración propia

La validación del sistema es una etapa fundamental en cualquier diseño técnico. Esto permite verificar si el prototipo cumple con los resultados esperados, en este caso, que mida el perfil del árbol de levas con precisión.

Para comprobar la fiabilidad del sistema desarrollado, se ha llevado a cabo una simulación de medición del perfil de una leva. Durante la toma de datos, se ha registrado el desplazamiento (mm) en función del tiempo (s).

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo gráfico del perfil en tiempo real:

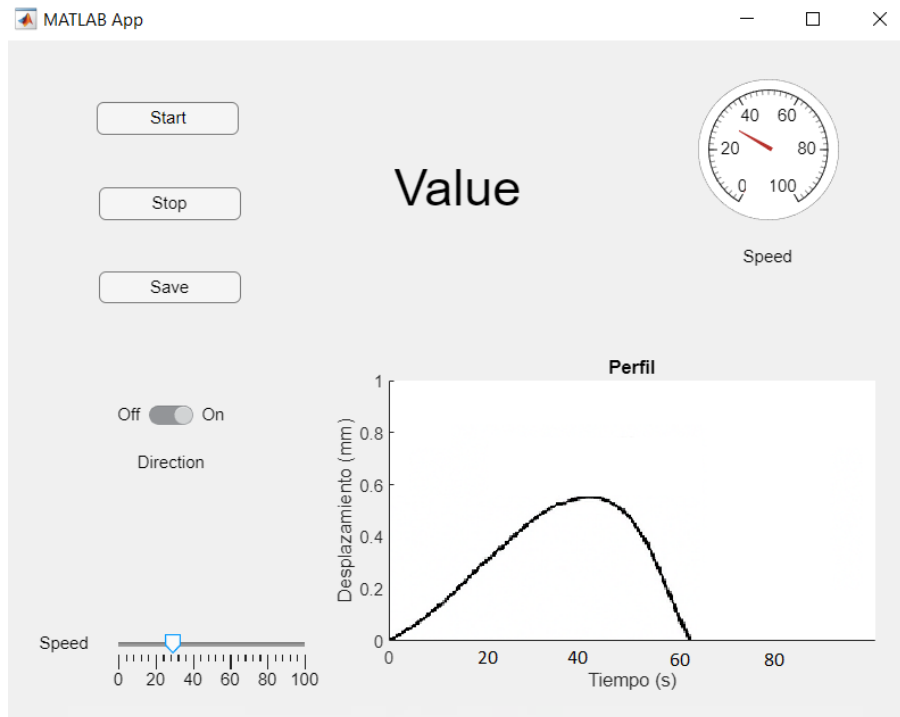


Ilustración 9-2: resultado graficado. Fuente: elaboración propia

Se puede observar cómo el desplazamiento varía progresivamente, simulando con fidelidad la geometría de la leva.

Los datos recogidos son exportados a un archivo .csv para su posterior comprobación y posible uso.

Tabla 5: valores obtenidos

Desplazamiento	Tiempo (s)
0.026	30.8
0.028	31.7
0.033	32.6
0.031	33.5
0.031	34.4
0.037	35.3
0.059	36.2
0.071	37.1
0.074	38
0.065	38.9
0.121	39.8
0.164	40.7
0.176	41.6

Estos valores son un fragmento de la medición, en dicha tabla se puede observar una fase de ascenso, la suavidad de los datos y su progresión indican que el sistema es capaz de detectar pequeñas variaciones de desplazamiento, sin embargo, en momentos puntuales se obtienen valores anómalos, estos podrían deberse a la fricción del palpador con la leva o una baja calidad del medidor dial.

En conjunto, tanto el gráfico como los datos numéricos refuerzan la validez del sistema de medición, confirmando que con pequeñas mejoras podría llegar a utilizarse en entornos reales de trabajo para caracterizar perfiles de levas. A continuación, describo varias formas de validar la precisión del sistema.

9.1 COMPARACIÓN CON UN PERFIL CONOCIDO

Una de las formas más directas consiste en medir un árbol de levas cuyo perfil ya se conoce, ya sea proporcionado por el fabricante o creado en CAD con unas medidas verificadas.

Pasos:

1. Se monta el árbol de levas en el banco de pruebas
2. Se realiza una medición completa del perfil utilizando el medidor dial
3. Se compara la curva obtenida en MATLAB con el perfil verificado

Si la diferencia entre ambas curvas es pequeña, el sistema puede considerarse preciso dentro del margen de error aceptable.

9.2 REPETIBILIDAD DE LA MEDICIÓN

La repetibilidad es la capacidad del sistema para comparar los resultados bajo las mismas condiciones.

Para verificarlo:

1. Se mide el mismo árbol de levas en varias ocasiones
2. Las condiciones deben ser constantes (posición del dial, velocidad motor, sujeción árbol de levas)
3. Se superponen los gráficos obtenidos y se analizan las diferencias

9.3 ANÁLISIS DE ERRORES

Se puede analizar las fuentes de donde provienen los errores que puedan afectar a la precisión de los resultados:

Tabla 6: análisis de errores

Fuente	Posible solución
Juego o flexión en los soportes	Reforzar estructura
Holgura en el soporte del motor	Usar un soporte más rígido
Ruido en la lectura	Engrasar punta y leva
Mal contacto del dial con la leva	Asegurar presión constante con muelle
Paso de motor demasiado grande	Usa un motor con más pasos por vuelta

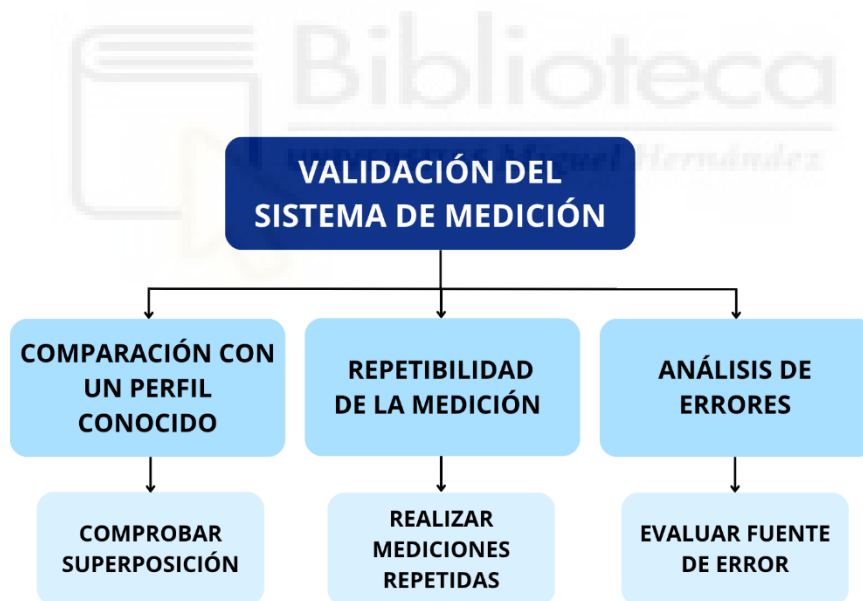


Ilustración 9-3: validación del sistema de medición. Fuente: elaboración propia

9.4 MÁRGENES DE ERROR ACEPTABLES

En la industria del motor, las tolerancias en los perfiles de levas pueden variar, pero suelen estar en torno a los ± 0.01 mm a ± 0.05 mm dependiendo del uso. Si el sistema alcanza una repetibilidad dentro de ese rango, puede considerarse válido para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

10. APLICACIONES INDUSTRIALES

El banco de pruebas diseñado en este proyecto tiene múltiples aplicaciones en diferentes sectores industriales. En primer lugar, hay que destacar su uso en la industria de la automoción y motocicletas, donde los árboles de levas son componentes clave en el rendimiento del motor.

De igual modo, empresas que fabrican o reparan motores, ya sean del tipo que sea, requieren sistemas de medición precisos para asegurar que cada leva cumpla con las especificaciones técnicas.

Otro rasgo es el sector de la competición deportiva, donde los motores deben funcionar con la máxima eficiencia. La opción de adquirir los datos de un árbol de levas y posteriormente modificar la curva en función de los requerimientos del usuario permite un gran abanico de posibilidades de desarrollo e investigación.

El banco propuesto en este proyecto se posiciona como una alternativa económica y compacta, pensada para talleres mecánicos independientes, servicios técnicos y pequeñas empresas que desean ampliar su oferta con una herramienta de precisión sin realizar una gran inversión.

10.1 CÓMO PUEDE MEJORAR LOS SERVICIOS DE UNA EMPRESA

En cuanto a las posibles mejoras que puede traer incluir el servicio de medición de árboles de levas puede traducirse en:

- Reducción de errores y productos defectuosos: gracias a la automatización del proceso de medición, se minimiza la posibilidad de errores humanos al tomar medidas manuales

- Aumento de la eficiencia: la medición rápida y precisa acelera los procesos de validación
- Documentación: el programa guarda los datos de cada medición en un archivo csv
- Herramienta competitiva: disponer de este servicio puede marcar la diferencia frente a otros competidores

Tabla 7: aplicaciones industriales

Tipo de empresa	Aplicación	Beneficios
Fabricantes de motores	Control de calidad	Asegura cumplimiento de especificaciones y elimina productos defectuosos
Talleres tradicionales	Comprobación de árboles de levas	Servicio diferenciador y mejora la confianza con el cliente
Equipos de competición	Modificación de curvas de par y potencia	Mejora el rendimiento
Laboratorios de I+D	Desarrollo y análisis de nuevos perfiles de levas	Comprobaciones experimentales
Centros formativos	Enseñanza de mecánica avanzada y análisis de perfiles	Fomenta el aprendizaje práctico con tecnología accesible

11. COMPARACIÓN CON MÉTODOS DE MEDICIÓN CONVENCIONALES

A lo largo del tiempo, la medición de perfiles de árboles de levas se ha llevado a cabo mediante diferentes metodologías, cada una con sus propias características. A continuación, se muestra una comparación de los métodos actualmente más comunes.

11.1 COMPARADOR MECÁNICO ANALÓGICO

Principalmente, este sistema funciona haciendo girar manualmente el árbol de levas y tomando nota de los valores que marca el dial cada cierto intervalo de rotación.



Ilustración 11-1: indicador dial analógico. Fuente: The Tool Academy

Ventajas

- Económico y fácil de utilizar
- No necesita alimentación ni electrónica

Desventajas

- Toma de datos manual
- Requiere mucho tiempo
- No se tiene una representación visual automática

11.2 PERFILÓMETRO ÓPTICO

Por otro lado, el perfilómetro óptico es un equipo de una precisión muy elevada, capaz de capturar la geometría de un objeto mediante sensores ópticos y/o láser.



Ilustración 11-2: perfilómetro óptico. Fuente: Bruker

Ventajas

- Precisión muy elevada (μM)
- Rápido y sin contacto
- Ideal para laboratorios

Desventajas

- Precio muy elevado
- Personal técnico cualificado

11.3 MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS (CMM)

En cambio, una máquina de medición por coordenadas utiliza una sonda táctil y/o láser tomar datos de diferentes puntos del perfil y posteriormente crea una construcción digital del objeto.



Ilustración 11-3: máquina de coordenadas. Fuente: MGT

Ventajas

- Muy precisa
- Capaz de medir geometrías complejas
- Se utiliza en entornos industriales avanzados

Desventajas

- Coste y mantenimiento elevado
- Necesita tiempo para ser programada
- Personal técnico cualificado

11.4 SISTEMA DESARROLLADO EN ESTE PROYECTO

Ventajas

- Bajo coste
- Precisión suficiente para la mayoría de aplicaciones
- Permite visualizar el perfil en tiempo real y guardar los datos
- Posibilidad de personalizar la interfaz
- Ajustable a distintos árboles de levas

Desventajas

- Requiere calibración manual inicial
- Menor precisión a otros sistemas del mercado

Tabla 8: comparación con métodos de medición convencionales

Sistema	Precisión	Facilidad de uso	Automatización	Coste
Comparador mecánico analógico	Media-baja	Alta	No	Bajo
Perfilómetro	Muy alta	Baja	Sí	Muy alto
CMM	Muy alta	Media-baja	Sí	Muy alto
Proyecto TFG	Alta	Media-alta	Sí	Medio-bajo

12. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DE LOS COMPONENTES

Acerca de los componentes utilizados, en esta sección se explican las razones técnicas por las que han sido seleccionados los componentes principales del sistema: el motor, el controlador del motor y la placa de control.

12.1 MOTOR PASO A PASO vs MOTOR DC

La primera decisión de todas fuera la elección del corazón del proyecto, el motor, se buscaba transmitir al árbol de levas un giro controlado. Las dos opciones principales era un motor de corriente continua (DC) o un motor paso a paso.



Ilustración 12-1: motor DC vs motor paso a paso. Fuente: Gian

Ventajas del motor paso a paso

- Precisión angular
- Movimiento controlado
- Funcionamiento a bajas velocidades constante
- Fácil control con Arduino

Desventajas del motor DC

- Precisión más baja
- Variaciones de velocidad
- Difícil control con Arduino

12.1.1 CONCLUSIÓN

Finalmente se ha optado por opción es cogida por su equilibrio entre precisión y facilidad de control. El motor 17HS130404S no solo tiene una precisión de 200 pasos por revolución sino también al controlarlo con un controlador DRV8825 se fraccionan los pasos aumentando considerablemente la precisión.

12.2 ELECCIÓN DE CONTROLADOR

En cuanto al controlador, se ha optado por un DRV8825, el cual ha sido diseñado para este tipo de motores.

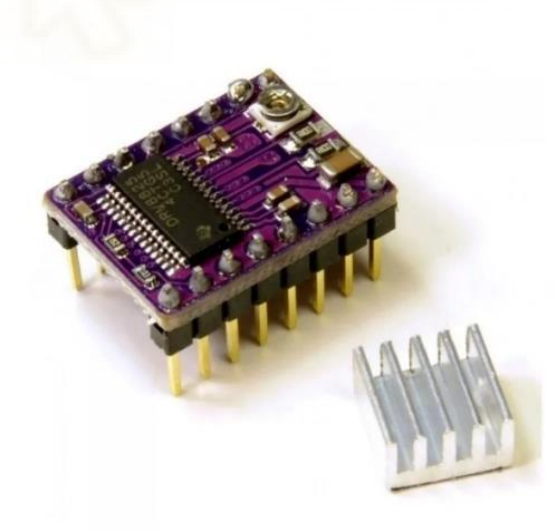


Ilustración 12-2: DRV8825. Fuente: altronics

A continuación, dejo una tabla comparativa con los posibles controladores que podrían haber sido utilizados:

Tabla 9: comparación controladores

Característica	DRV8825	A4988	TMC2208
Microstepping	1/32	1/16	1/256
Corriente máxima	2.2 A	1.2 A	1.2 A
Voltaje	8.2 – 45 V	8 – 35 V	4.75 – 36 V
Facilidad de uso	Alta	Alta	Baja
Coste	Medio	Bajo	Alto
Compatibilidad Arduino	Muy buena	Muy buena	Baja

12.2.1 CONCLUSIÓN

Por todo esto, ha sido elegida la opción del DRV8825 por su equilibrio de prestaciones, facilidad de uso.

12.3 COMPARACIÓN DE PLACAS DE CONTROL

En relación con la placa de control, esta se encarga de gestionar las entradas y salidas del sistema, controlar motores, leer sensores y establecer la comunicación entre los diferentes dispositivos del sistema.

En este proyecto necesitamos una placa de control con al menos las siguientes funciones:

- Pines digitales para controlar el motor paso a paso
- Comunicación con el ordenador por USB
- Compatibilidad con MATLAB
- Precio contenido
- Facilidad de programación

Teniendo en cuenta estos criterios, se ha realizado la siguiente tabla comparativa entre las placas de control más comunes:

Tabla 10: comparación placas de control

Característica	Arduino UNO	Arduino Mega 2560	ESP32
Procesador	ATmega328P	ATmega2560	Xtensa Dual-Core
Velocidad	16 MHz	16 MHz	240 MHz
GPIO disponibles	14 digitales	54 digitales	34 multipropósito
Comunicación USB	Sí	Sí	Sí
Compatibilidad con MATLAB	Nativo	Nativo	Configurable
Facilidad de uso	Muy buena	Buena	Media
Precio	20 €	30 €	10 €
Información publicada	Muy amplia	Muy amplia	Amplia

12.3.1 CONCLUSIONES

Por un lado, la ESP32 ofrece mayor velocidad en procesamiento, pero en contra partida, tiene limitaciones importantes en cuanto a compatibilidad con el software que se ha decidido utilizar.

Por otro lado, la Arduino Mega 2560 es la más potente y la mayor con número de pines disponibles, pero a su vez también la más elevado en precio.

Por estas razones, se ha decidido optar por la placa Arduino UNO, siendo la opción más equilibrada para los objetivos de nuestro proyecto, es fácil de utilizar, presenta una velocidad de procesamiento más que suficiente y un apartado con gran peso, la elevada documentación que hay publicada en internet. Cabe destacar, que es una de las placas más utilizadas en entornos educativos y esto provoca sobre el usuario, estar familiarizado con la nomenclatura y funcionamiento.

13. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se analiza el coste económico del desarrollo del banco de pruebas diseñado en este proyecto. Para ello se ha tenido en cuenta el precio estimado de cada uno de los componentes utilizados, tanto mecánicos como electrónicos, así como los costes asociados al diseño y fabricación del sistema.

13.1 COSTE POR COMPONENTE

La siguiente tabla recoge los costes estimados de los elementos integrados en el sistema. Los precios pueden variar ligeramente en función del proveedor y volumen de compra.

Tabla 11: coste material banco de pruebas

Componente	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Perfil de aluminio	1	21.09	21.09
Motor paso a paso 17HS130404S	1	14.00	14.00
Rueda dentada	2	2.18	4.32
Correa dentada	1	1.49	1.49
Soporte motor (aluminio mecanizado)	1	46.5	46.5
Indicador dial digital	1	40	40
Soporte dial (PETG)	1	1.22	1.22
Varillas	2	6.39	12.78
Fijaciones	2	2.20	4.40
Mandril	2	13.39	26.78
Soporte mandril (aluminio mecanizado)	2	38.5	77.00

Arduino UNO	1	23.44	23.44
Controlador DRV8825	1	1.29	1.29
Condensador 100 μ F 50 V	1	0.50	0.50
Fuente de alimentación	1	10.00	10.00
Circuito y cables	Kit	5.00	5.00
Tornillería	Kit	12	12
Subtotal materiales			301.81

Tabla 12: costes secundarios y totales

Componente	Cantidad (h)	Coste (€/h)	Coste total (€)
Mano de obra	10	15	150
Costes indirectos (electricidad, herramientas, etc.)	-	-	20
Subtotal costes secundarios			170
Costes totales estimados			470.81

13.2 DISTRIBUCIÓN DE COSTES

A continuación, se presenta un diagrama de los costes del prototipo:

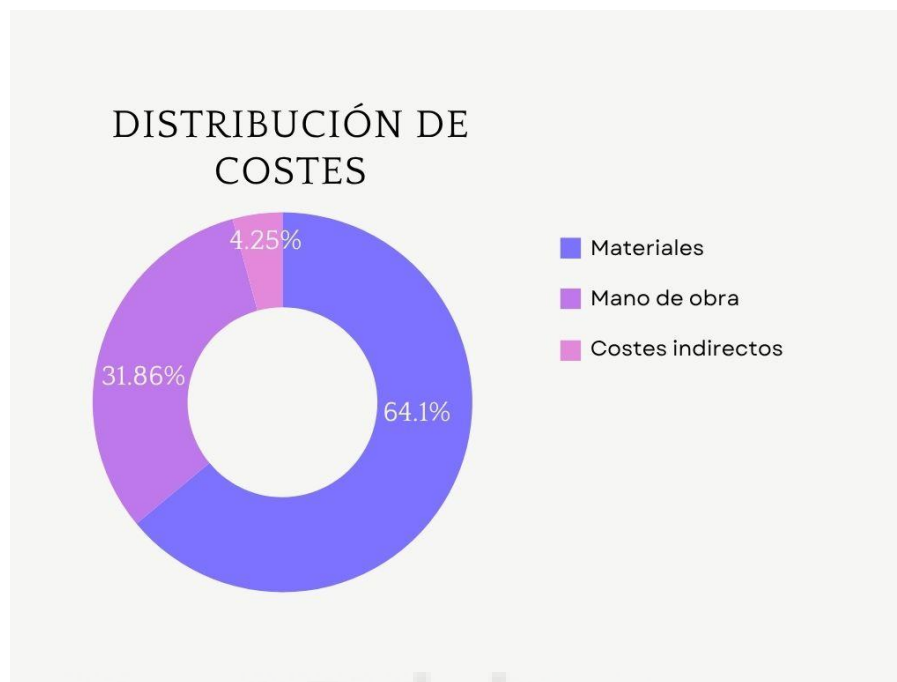


Ilustración 13-1: diagrama de costes. Fuente: elaboración propia

13.3 ESTIMACIÓN DE PRECIO DE VENTA

En cuanto a el precio de venta, habría que entrar en el mercado por lo que comenzar con un precio competitivo buscando un beneficio del 100%, considero que sería realista.

- Coste total: 470.81 €
- Margen de beneficio (318.5%): 1029.19 €
- Precio de venta estimado: 1500 €

Este precio posiciona al producto como una alternativa económica frente a los bancos de pruebas comerciales, siendo especialmente atractivo para centro educativos, laboratorios de investigación y pequeñas empresas que buscan una servicio innovador y asequible para la medición de árboles de levas.

13.4 COMPARATIVA CON BANCOS DE PRUEBAS COMERCIALES

A continuación, se compara el prototipo del proyecto frente a los bancos de medición de árboles de las empresas comentadas en el comienzo de esta memoria. Aunque estos productos cuentan con mayor precisión y automatización, también presentan un coste muy elevado, pensado para entornos industriales.

Tabla 13: comparación bancos de pruebas

Fabricante – Producto	Precio aprox. (€)	Características principales
CGK Gage Group – Camshaft Checking Fixture	3000 € - 6000 €	Medición angular, comparador analógico/digital
VICIVISION – Optical Shaft Measuring	> 15000 €	Escaneo óptico completo, sin contacto, tolerancias micrométricas
JENOPTIK – Wavelift 400	> 18000 €	Análisis de forma completo con software profesional
Prototipo del proyecto	1500 €	Medición digital con gráfica en tiempo real, control motor automatizado

14. POSIBLE MEJORAS

Una vez confirmado el funcionamiento del proyecto desarrollado, se encuentran una serie de posibles mejoras que permitirían aumentar el grado de satisfacción del usuario y de la calidad del producto. A continuación, describo algunas de las ideas de mejoras que podrían implementarse en un futuro.

14.1 EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS A EXCEL

Hasta ahora, una vez el usuario consideraba por terminada la toma de datos, el propio usuario debía detener la medición y posteriormente guardar los datos obtenidos en un archivo .csv para poder visualizar los datos en una tabla Excel. Una mejora interesante sería la automatización de este proceso: el sistema exportaría los datos directamente en tiempo real o al finalizar la prueba.

14.2 AUTOMATIZACIÓN DE LA PARADA

Una ampliación que se podría incorporar es la detección de vueltas completas del árbol de levas. Mediante comparación de datos o a través de un sensor óptico, se podría detectar el punto de inicio y tras una revolución completa el sistema se detendría automáticamente.

14.3 REDISEÑO DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN DEL ÁRBOL DE LEVAS

El sistema actual de fijación requiere ajustar simultáneamente ambos soportes de mandril mientras se sujeta el árbol de levas, lo que resulta incómodo. Una posible mejora sería incorporar un sistema de fijación rápida o mediante mordazas ajustables, con el fin de facilitar el montaje y reducir el tiempo de preparación.

14.4 DISEÑO PARAMETRIZADO CON AUTODESK INVENTOR

Otra ampliación que añadiría un gran valor al proyecto sería vincular el archivo de los datos obtenidos a una hoja Excel parametrizada y esta tabla sirviera para un boceto de Inventor. De esta forma, cualquier perfil medido se obtendría el boceto del perfil en un modelo CAD, permitiendo comparar, modificar o simular diferentes perfiles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ecubitt Performance, “Medición y análisis de árboles de levas” [Internet], Bizkaia, fecha de consulta: 14 Oct 2023, disponible en: <https://www.ecubitt.com/medicion-y-analisis-de-arboles-de-levas/>
- [2] Race Tools Direct, “Camshaft Measuring Tools [Internet]”, fecha de consulta: 14 Oct 2023, disponible en: <https://racetoolsdirect.com/product-category/engine-tools/measurement-tools-engine-tools/camshaft-measuring-tools/>
- [3] Jenoptik, “Sistemas de medición Opticline CS [Internet]”, Francia, fecha de consulta 15 Oct 2023, disponible en: <https://www.jenoptik.es/productos/soluciones-de-medicion-optica/medicion-optica-de-ejes/sistemas-opticline-cs>
- [4] Marposs, “Máquina automática de medida para inspección del perfil de leva” [Internet], Bentivoglio, fecha de consulta: 15 Oct 2023, disponible en: <https://www.marposs.com/spa/product/automatic-measuring-machine-for-cam-profile-inspection>
- [5] Marh, “Medición óptica de árboles” [Internet], Esslingen, fecha de consulta: 15 Oct 2023, disponible en: <https://metrology.mahr.com/es/productos/group/wellenmesstechnik-optische-wellenmessung/>
- [6] Blum Novotest, “Máquina de medición multipunto” [Internet], Grünkraut, fecha de consulta 15 Oct 2023, disponible en: <https://www.blum-novotest.com/es/productos/maquinas-de-medicion/maquinas-de-medicion-de-arboles-y-ejes/#tab46943>
- [7] CGK Gage Group LLC, “Camshaft Measuring Machine” [Internet], fecha de consulta: 15 Oct 2023, fecha de consulta: 15 Oct 2023, disponible en: <http://cgkgage.com/ezcam-camshaft-measuring-machine/>
- [8] VICIVISION, “Gama TECHNO” [Internet,] Santarcangelo di Romagna, fecha de consulta: 22 Oct 2023, disponible en: <https://www.vicivision.com/es/medicion-optica-2/gama-de-maquinas-de-medicion/>

- [9] VICIVISION, “La nostra gamma TECHNO in base ai nostri clienti” [Internet], Italia, 12 Feb 2021, fecha de consulta: 22 Oct 2023, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MloQe53tac8>
- [10] VICIVISION, “I vantaggi dei nostri prodotti” [Internet], Italia, 24 Mar 2021, fecha de consulta: 22 Oct 2023, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=74MBGx6PPIY>
- [11] Industria Italiana, “Marposs: gli occhi sulle e-cars... Tutto sul big delle macchine utensili” [Internet], Italia, 28 Abr 2023, fecha de consulta: 26 Oct 2023, disponible en: <https://www.industriaitaliana.it/marposs-mesys-intelligenza-artificiale-e-mobility-digitalizzazione/>
- [12] WENZEL, “WENZEL vuelve a mostrar los dientes!” [Internet], Milan, 2021, fecha de consulta 26 Oct 2023, disponible en: <https://www.wenzel-group.com/es/noticias/dientes>
- [13] AlbrodpulF1, “Análisis técnico - Árbol de levas” [Internet], España, 25 de Mar 2015, fecha de consulta: 8 Nov 2023, disponible en: <https://albrodpulfl.wordpress.com/2015/03/25/analisis-tecnico-arbol-de-levas/>
- [14] Actualidad Motor, “Distribución variable: qué es y cuál es su función” [Internet], fecha de consulta: 8 Nov 2023, disponible en: <https://www.actualidadmotor.com/distribucion-variable-que-es-cual-es-su-funcion/>
- [15] Motorparts España, “ARBOL DE LEVAS, funciones, diagrama practico, distribución, aae, rca, rce, aaa, ae, ai, mecanica” [Internet], España, 2025, fecha de consulta 8 Nov 2023, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=iGC8QodP2L8&list=PLzR75LbGvgDOZKasSlTWbUrE71gyDtgdC&index=3>
- [16] psa-evolution, “Parametri caratteristici degli alberi a camme” [Internet], Italia, 13 Oct 2014, fecha de consulta 8 Nov 2023, disponible en: <https://psa-evolution.com/preparare-la-saxo/parametri-caratteristici-degli-alberi-a-camme>
- [17] ShamWerks, “DIY Camshaft measuring bench” [Internet], 2017, fecha de consulta: 3 Dic 2023, disponible en: <https://shamwerks.com/CamWerks-DIY>

[18] Amazon, “Motor paso a paso, Longrunner Nema 17 Bipolar de 42 mm (26 Ncm) 12 V, 0,4 A, para impresora 3D Hobby CNC 17HS13 0404S LQD06” [Internet], fecha de consulta: 16 Sep 2024, disponible en: <https://www.amazon.es/Motor-Longrunner-Bipolar-impresora-17HS13/dp/B072LVXVKW>

[19] EAZYTRONIC, “How to Operate Stepper Motor Using Arduino Tinkercad” [Internet], 2025, fecha de consulta: 9 En 2025, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=34RyZJz00y4&t=8s>

[20] MATLAB, “Introducción a MATLAB Support Package for Arduino Hardware” [Internet], fecha de consulta: 11 Oct 2024, disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/arduinoio-get-started-with-matlab-support-package-for-arduino-hardware.html>

[21] MATLAB, “Leer y escribir datos” [Internet] , fecha de consulta: 11 Oct 20, disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/arduinoio-read-and-write-data.html>



ANEXO: CÓDIGO COMPLETO



```
classdef app1 < matlab.apps.AppBase
```

```
% Componentes de la interfaz
```

```
properties (Access = public)
```

```
    UIFigure          matlab.ui.Figure
```

```
    ValueLabel        matlab.ui.control.Label
```

```
    SpeedGauge        matlab.ui.control.Gauge
```

```
    SpeedGaugeLabel   matlab.ui.control.Label
```

```
    DirectionSwitch   matlab.ui.control.Switch
```

```
    DirectionSwitchLabel matlab.ui.control.Label
```

```
    SpeedSlider        matlab.ui.control.Slider
```

```
    SpeedSliderLabel   matlab.ui.control.Label
```

```
    StopButton         matlab.ui.control.Button
```

```
    StartButton        matlab.ui.control.Button
```

```
    SaveButton         matlab.ui.control.Button
```

```
    UIAxes             matlab.ui.control.UIAxes
```

```
end
```

```
% Variables internas
```

```
properties (Access = private)
```

```
    TimerObj    % Temporizador
```

```
    StartTime  % Tiempo de inicio
```

```
TimeData    % Vector de tiempos

DialData    % Vector de valores del dial

end

% Callbacks de usuario

methods (Access = private)

% Al iniciar la app

function startupFcn(app)

    app.TimeData = [];

    app.DialData = [];

    app.StartTime = datetime('now');

% Configurar gráfico

title(app.UIAxes, "Perfil del árbol de levas");

xlabel(app.UIAxes, "Tiempo (s)");

ylabel(app.UIAxes, "Desplazamiento (mm)");

% Temporizador

app.TimerObj = timer( ...

    'ExecutionMode', 'fixedRate', ...

    'Period', 0.2, ...

    'TimerFcn', @(~,~)updatePlot(app));
```

end

% Botón START

function StartButtonPushed(app, ~)

app.TimeData = [];

app.DialData = [];

app.StartTime = datetime('now');

start(app.TimerObj);

end

% Botón STOP

function StopButtonPushed(app, ~)

stop(app.TimerObj);

end

% Botón GUARDAR

function SaveButtonPushed(app, ~)

if isempty(app.TimeData) || isempty(app.DialData)

uialert(app.UIFigure, 'No hay datos para guardar.', 'Advertencia');

return;

end

[file, path] = uiputfile('*.csv', 'Guardar archivo como');

if isequal(file, 0) || isequal(path, 0)

```
        return;

    end

    T = table(app.TimeData(:), app.DialData(:), ...

        'VariableNames', {'Tiempo_s', 'Desplazamiento_mm'});

    writetable(T, fullfile(path, file));

    uialert(app.UIFigure, 'Archivo guardado correctamente.', 'Éxito');

end

% Actualizar gráfico y datos simulados

function updatePlot(app)

    % Simular valor del dial (perfil tipo seno)

    valor = 2 * sin(2 * pi * seconds(datetime('now') - app.StartTime) / 10) + 5;

    tiempo = seconds(datetime('now') - app.StartTime);

    app.TimeData(end+1) = tiempo;

    app.DialData(end+1) = valor;

    plot(app.UIAxes, app.TimeData, app.DialData, '-b', 'LineWidth', 1.5);

    xlabel(app.UIAxes, 'Tiempo (s)');

    ylabel(app.UIAxes, 'Desplazamiento (mm)');

    title(app.UIAxes, 'Perfil del árbol de levas');
```

```
app.ValueLabel.Text = sprintf('Valor actual: %.2f mm', valor);

app.SpeedGauge.Value = app.SpeedSlider.Value;

end

% Cambia velocidad

function SpeedSliderValueChanged(app, ~)

    app.SpeedGauge.Value = app.SpeedSlider.Value;

end

% Cambia dirección

function DirectionSwitchValueChanged(app, ~)

    direction = app.DirectionSwitch.Value;

    disp(['Dirección seleccionada: ', direction]);

end

end

% Inicializar la app

methods (Access = public)

function app = app1

    createComponents(app)

    registerApp(app, app.UIFigure)

    runStartupFcn(app, @startupFcn)
```

```
        if nargout == 0

            clear app

        end

    end

end

function delete(app)

    if ~isempty(app.TimerObj) && isvalid(app.TimerObj)

        stop(app.TimerObj);

        delete(app.TimerObj);

    end

    delete(app.UIFigure)

end

end

% Crear componentes visuales

methods (Access = private)

function createComponents(app)

    app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');

    app.UIFigure.Position = [100 100 700 480];

    app.UIFigure.Name = 'Banco Medidor de Árbol de Levas';

    app.StartButton = uibutton(app.UIFigure, 'push', ...
```

'Position', [30 400 100 30], ...

'Text', 'Start', ...

'ButtonPushedFcn', @(btn, event) StartButtonPushed(app));

app.StopButton = uibutton(app.UIFigure, 'push', ...

'Position', [30 350 100 30], ...

'Text', 'Stop', ...

'ButtonPushedFcn', @(btn, event) StopButtonPushed(app));

app.SaveButton = uibutton(app.UIFigure, 'push', ...

'Position', [30 300 100 30], ...

'Text', 'Guardar', ...

'ButtonPushedFcn', @(btn, event) SaveButtonPushed(app));

app.SpeedSliderLabel = uilabel(app.UIFigure, ...

'Position', [30 250 50 22], ...

'Text', 'Speed');

app.SpeedSlider = uislider(app.UIFigure, ...

'Position', [100 260 150 3], ...

'ValueChangedFcn', @(sld, event) SpeedSliderValueChanged(app));

app.DirectionSwitchLabel = uilabel(app.UIFigure, ...

'Position', [30 200 100 22], ...

```
'Text', 'Direction');
```

```
app.DirectionSwitch = uiswitch(app.UIFigure, 'slider', ...
```

```
'Items', {'Horario', 'Antihorario'}, ...
```

```
'Position', [120 200 45 20], ...
```

```
'ValueChangedFcn', @(sw, event) DirectionSwitchValueChanged(app));
```

```
app.SpeedGaugeLabel = uilabel(app.UIFigure, ...
```

```
'Position', [550 350 50 22], ...
```

```
'Text', 'Speed');
```

```
app.SpeedGauge = uigauge(app.UIFigure, 'circular', ...
```

```
'Position', [510 380 120 120]);
```

```
app.ValueLabel = uilabel(app.UIFigure, ...
```

```
'Position', [300 420 200 22], ...
```

```
'Text', 'Valor actual:');
```

```
app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
```

```
app.UIAxes.Position = [200 40 460 300];
```

```
app.UIFigure.Visible = 'on';
```

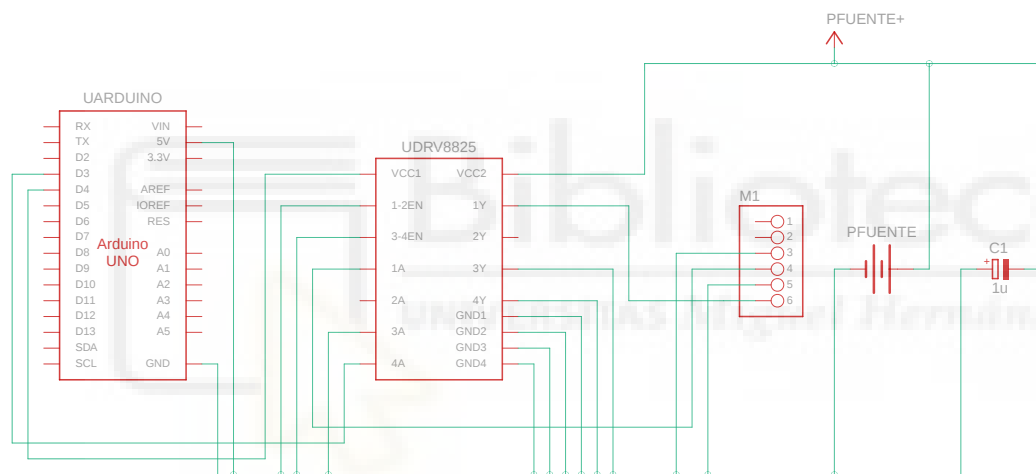
```
end
```

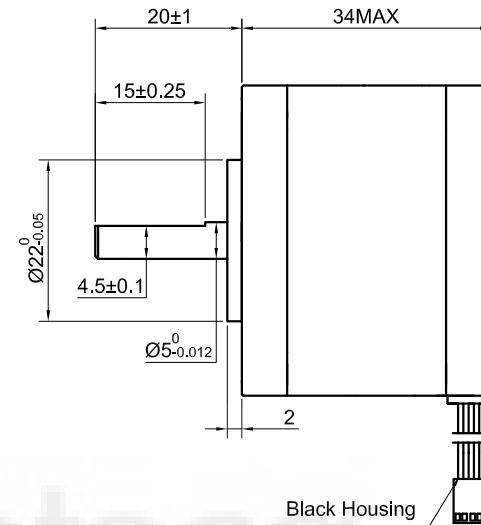
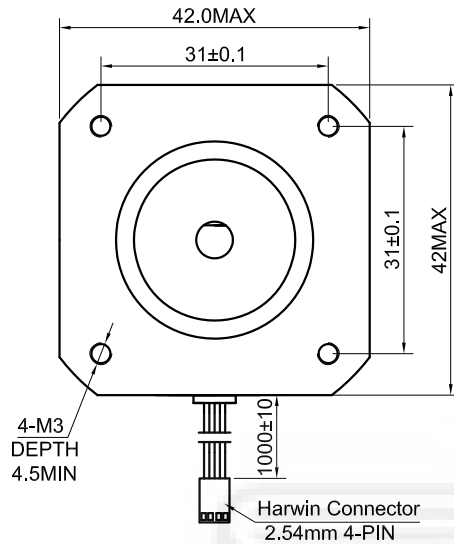
```
end
```

```
end
```

ANEXO: PLANOS





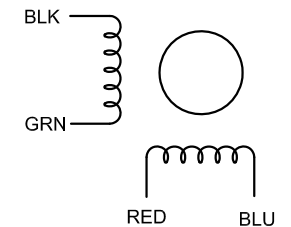


SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR
AMPS/PHASE		0.40
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		30.00±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		37.00±20%
HOLDING TORQUE(Nm)[lb-in]		0.26[2.26]
STEP ANGLE(°)		1.80
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5.00%
ROTOR INERTIA(g-cm ²)		38.00
WEIGHT(Kg)[lb]		0.28[0.62]
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C~50°C[14°F~122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		
AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)		

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	
2	A\ —	GRN	
3	B —	RED	
4	B\ —	BLU	

FULL STEP 2 PHASE-Ex. ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A\	B\		CCW
1	+	+	-	-		
2	-	+	+	-		
3	-	-	+	+		
4	+	-	-	+		



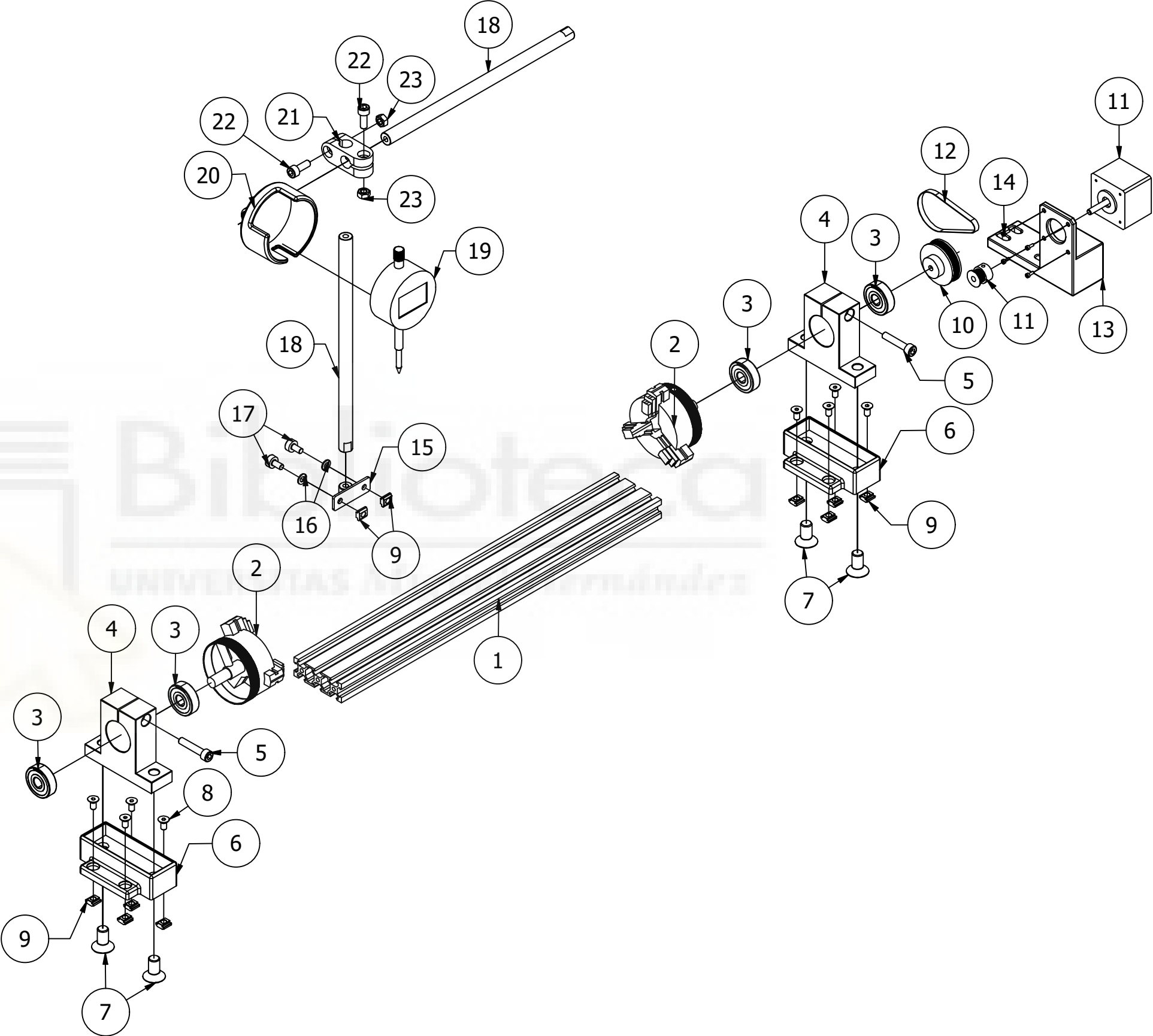
STEPPERONLINE®

	APVD		8.18.2018
	CHKD		
1:1	DRN		
SCALE	SIGNATURE	DATE	

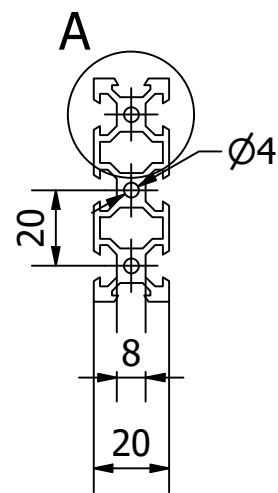
STEPPER MOTOR

17HS13-0404S1

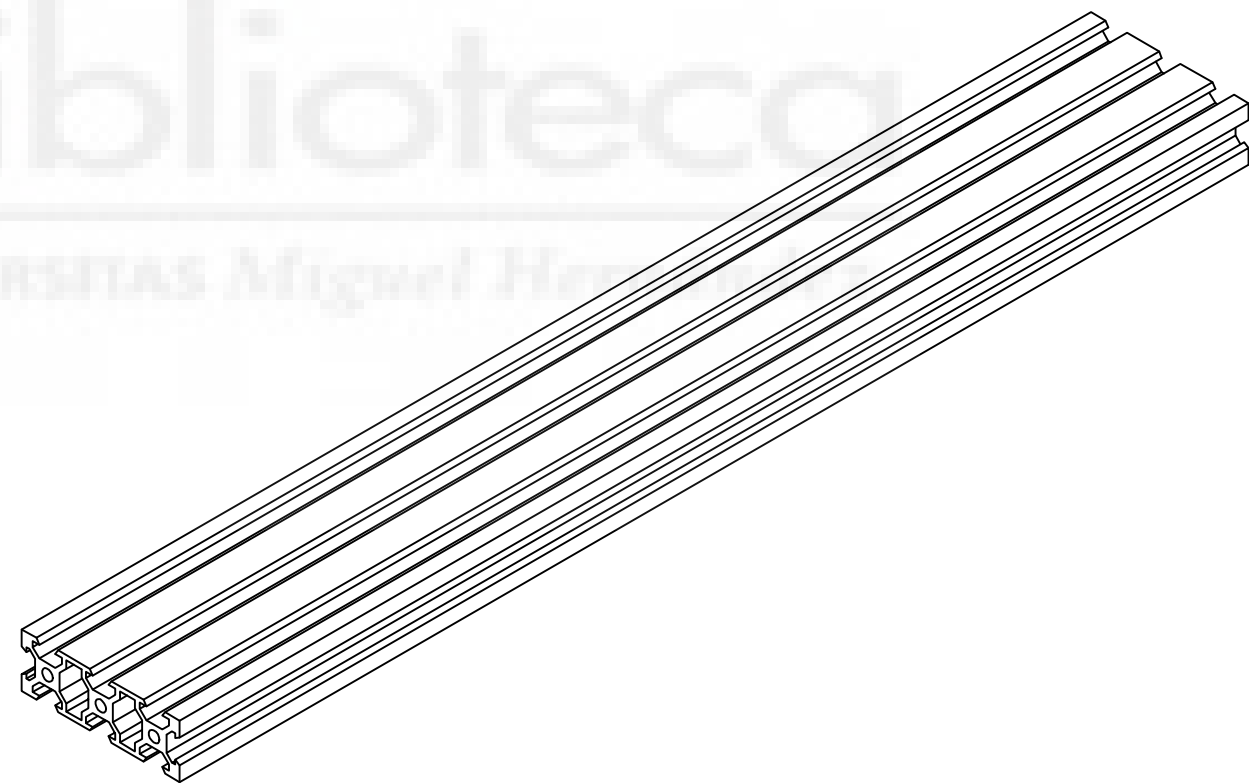
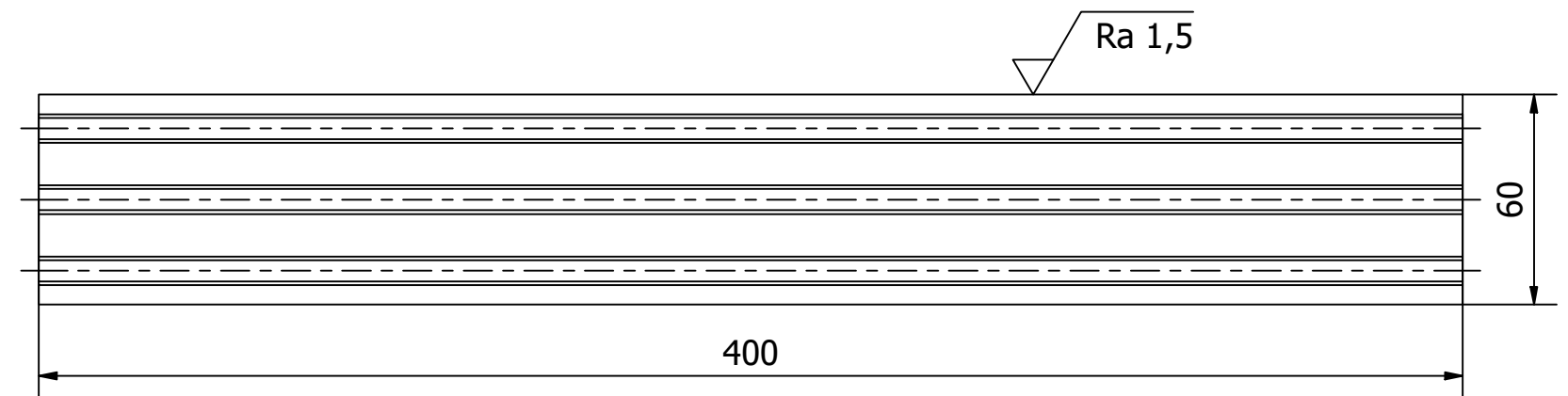
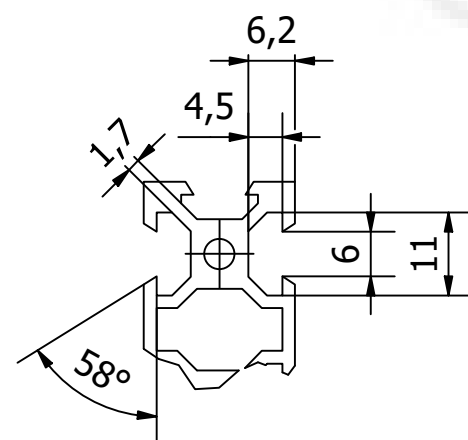
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Base
2	2	Ensamblaje Mandril
3	4	Rodamiento 6200h-2rs
4	2	Soporte Mandril
5	2	ISO 4762 - M6 x 30
6	2	Adaptador soporte mandril
7	4	Tornillo M10 x 20
8	8	Tornillo M5 x 10
9	10	TUERCA T M5
10	1	Polea Grande
11	1	Ensamblaje Motor
12	1	Correa polea
13	1	SOPORTE MOTOR
14	4	Tornillo M2 x 6
15	1	Soporte varilla
16	2	Arandela M5
17	2	Tornillo M5x10 ALLEN
18	2	Varilla
19	1	Potenciometro
20	1	Soporte Dial 3D
21	1	Sujecion Varilla
22	2	Tornillo M6 x 16
23	2	Tuerca Hexagonal M6



Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 04/06/2025	Escala 1:4
 Universidad Miguel Hernández				Banco medidor árboles de levas 	
Explosionado				Edición 1	Hoja 1 / 1

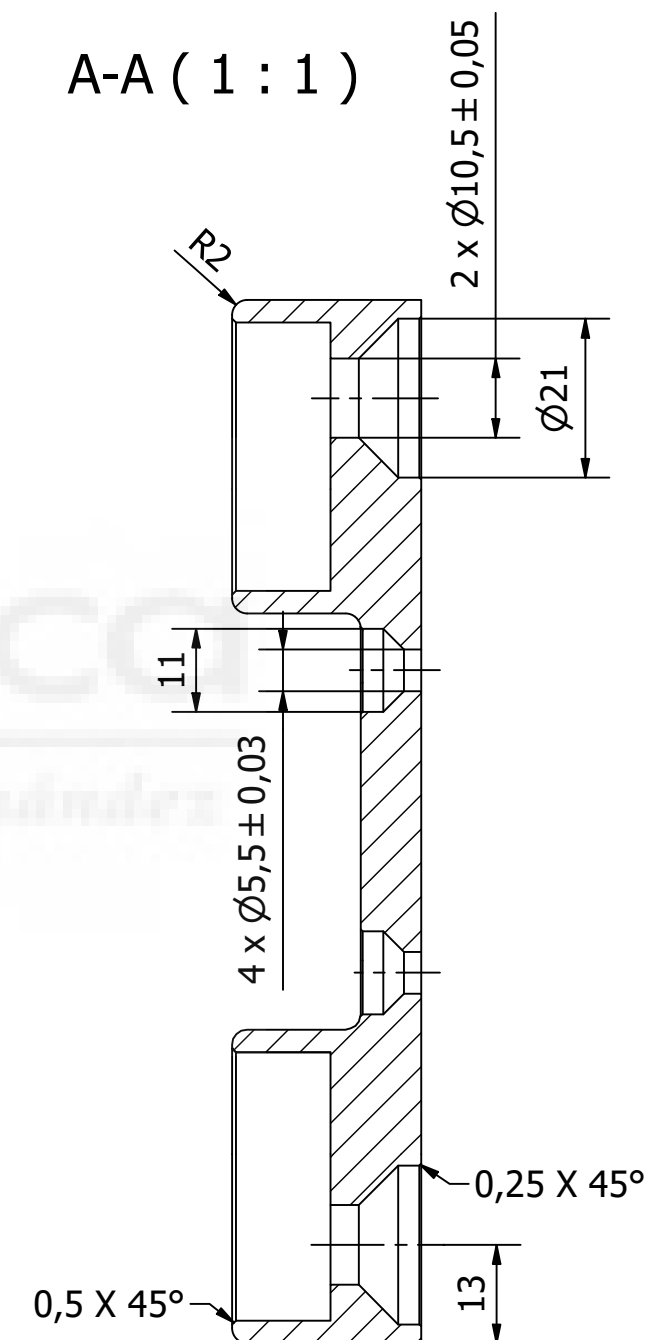
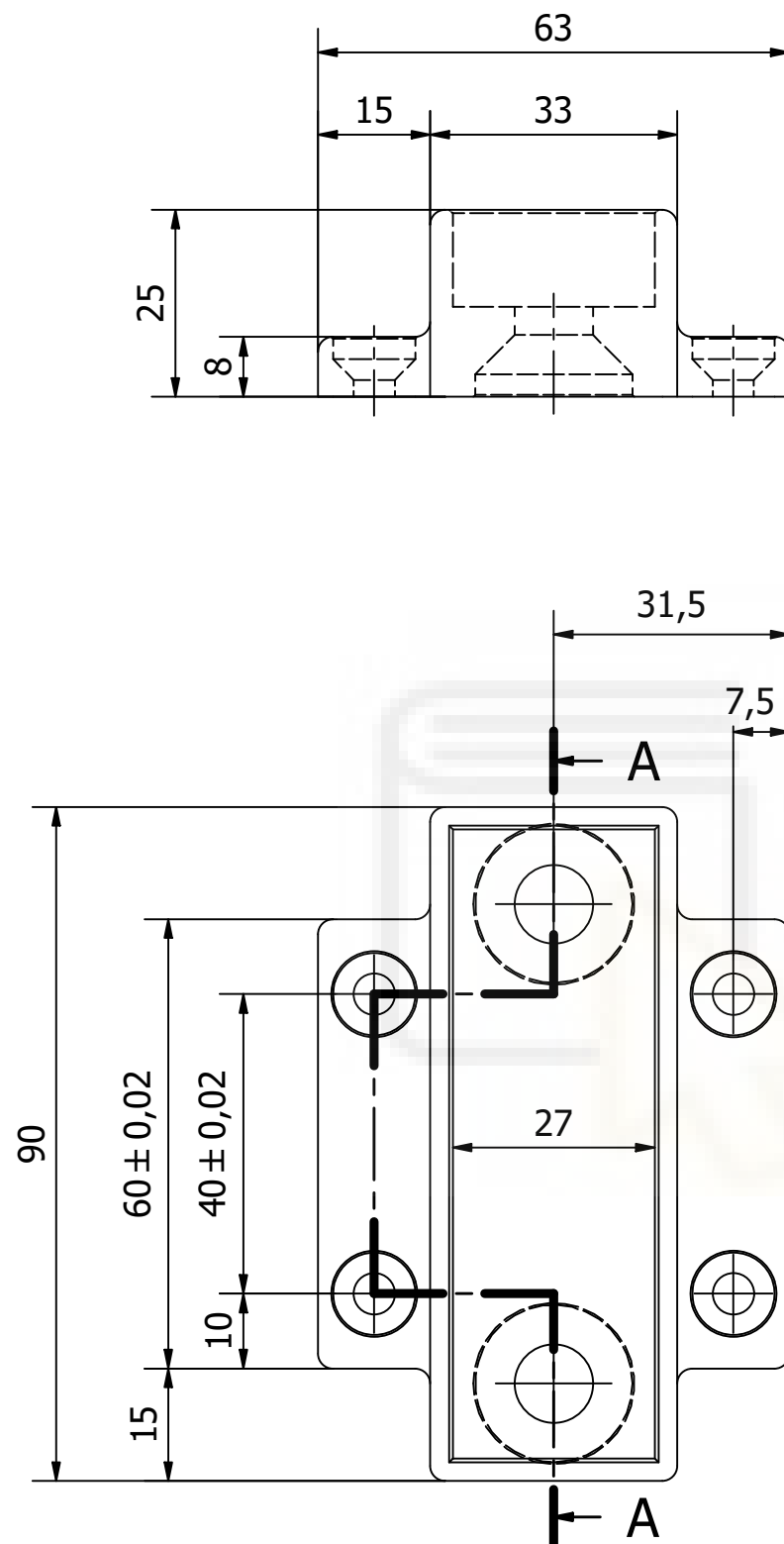


Detalle A (1 : 1)



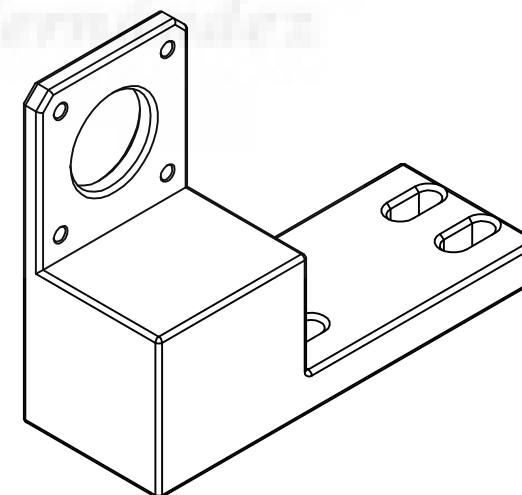
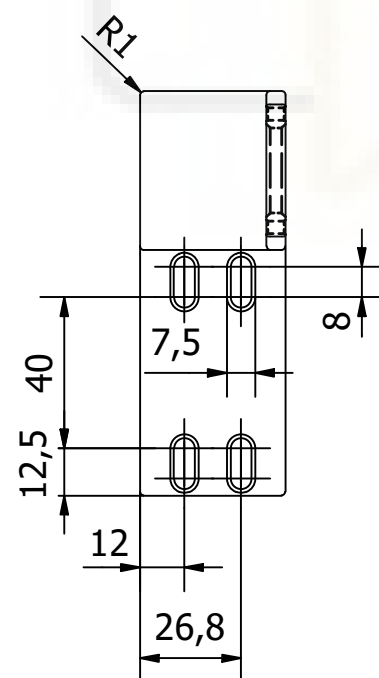
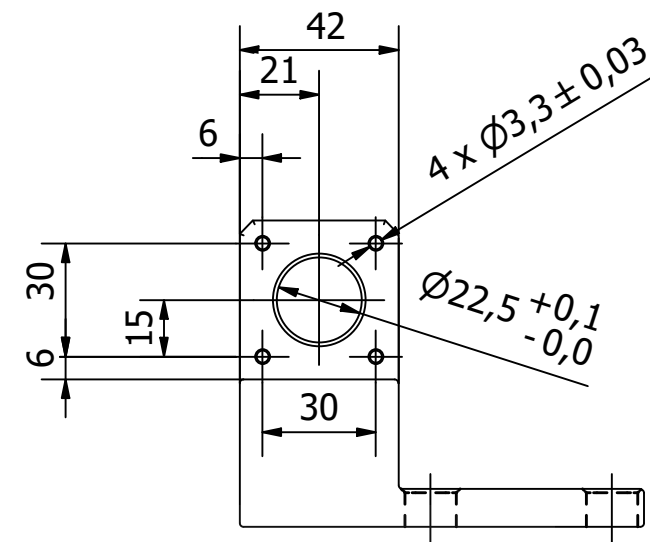
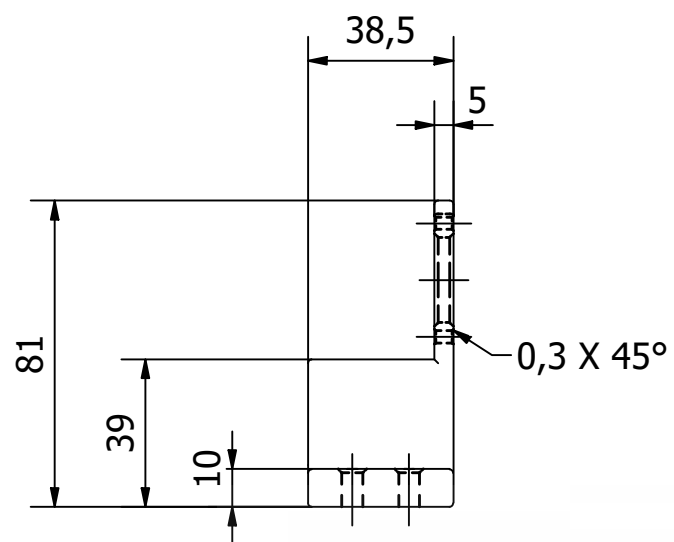
Tolerancias generales: EN 12020-2: $\pm 0,2$ mm

Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material Aluminio	Fecha 23/04/2025	Escala 1:2
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
Base Banco				Edición 1	Hoja 1 / 1	



Todos los bordes externos tienen un acabo de $r=2$ mm
 Todos los alojamientos de tornillos tienen acabado de $0,25 \times 45^\circ$

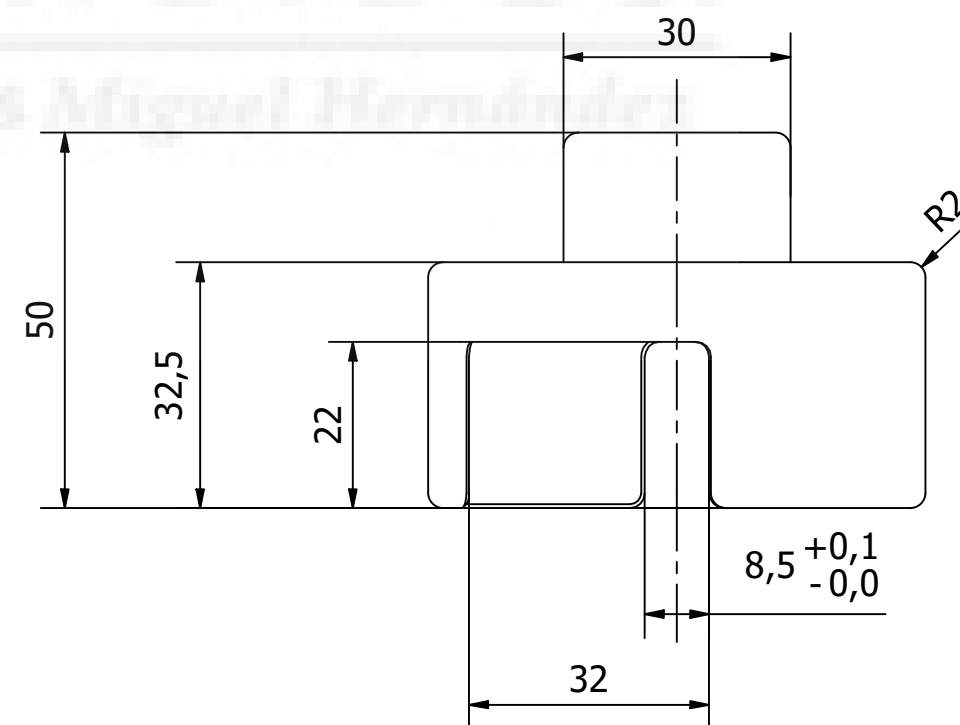
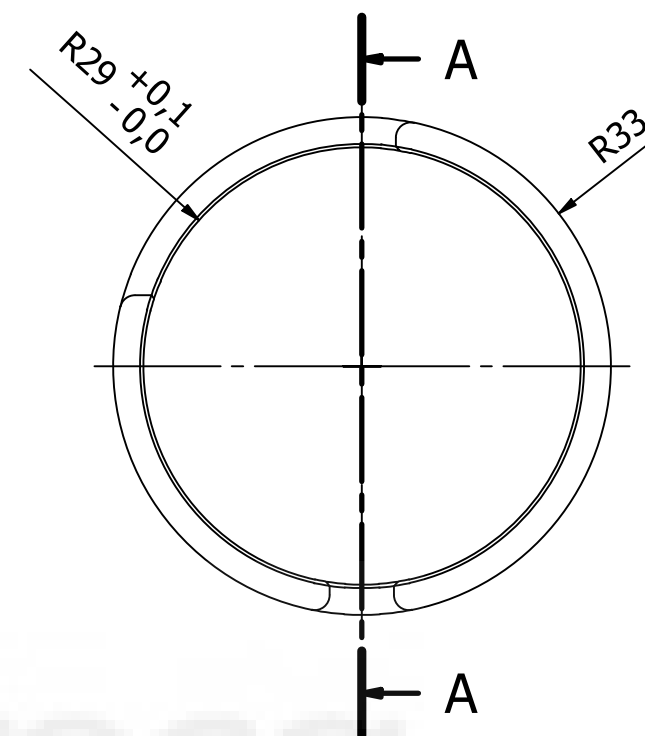
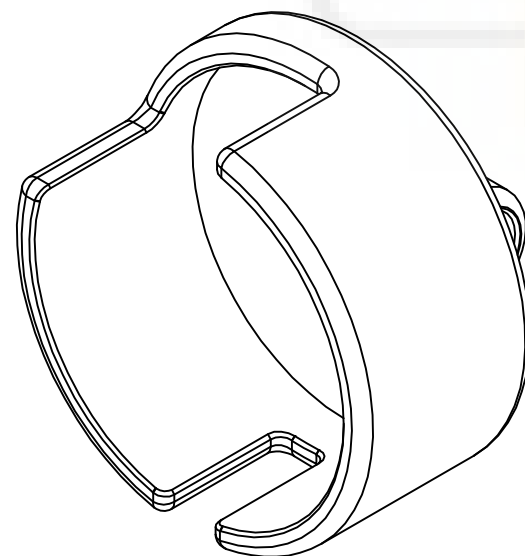
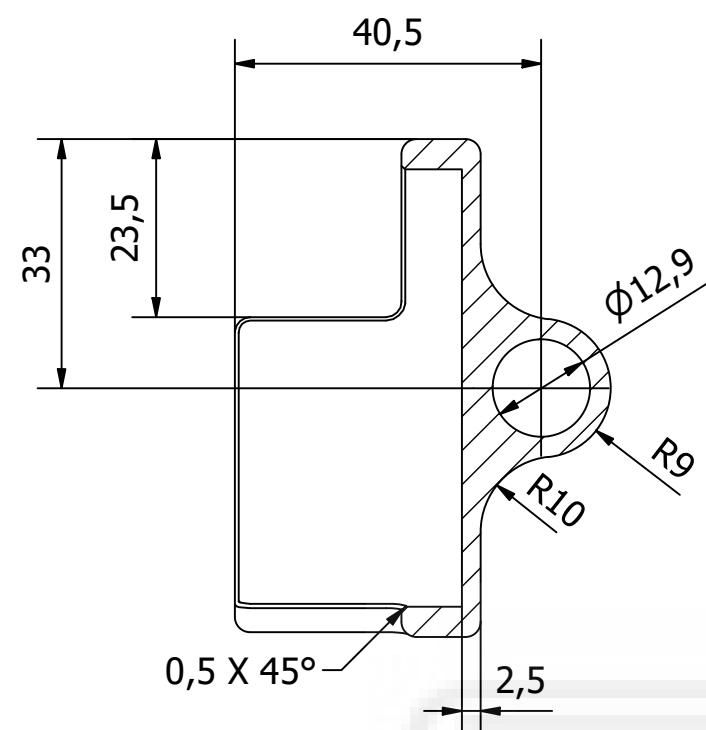
Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material PETG	Fecha 23/04/2025	Escala 1:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
Acoplamiento				Edición 1	Hoja 1 / 1	



Todos los bordes externos tienen un acabado de $r=1\text{ mm}$
 Todos los alojamientos de tornillos tienen un acabado de $0,3 \times 45^\circ$

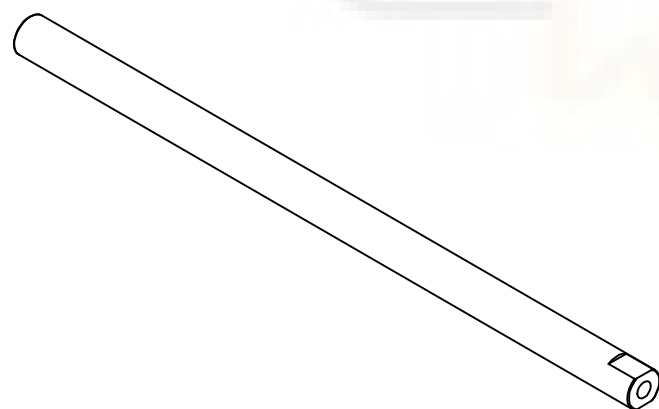
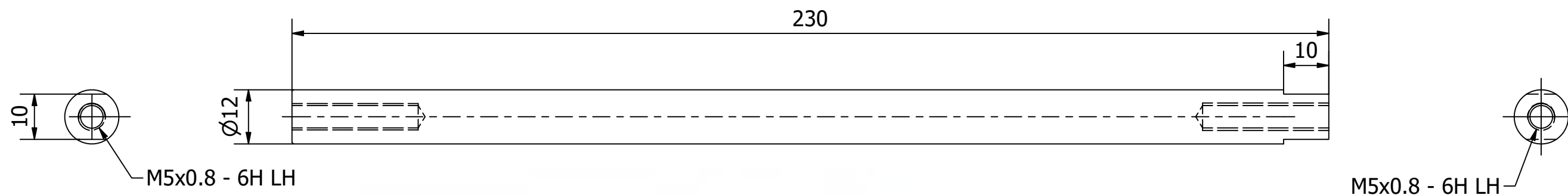
Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material PETG	Fecha 29/05/2025	Escala 1:2
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
SOPORTE MOTOR				Edición 1	Hoja 1 / 1	

A-A (1 : 1)

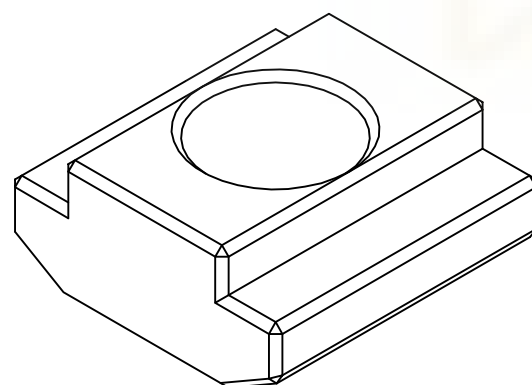
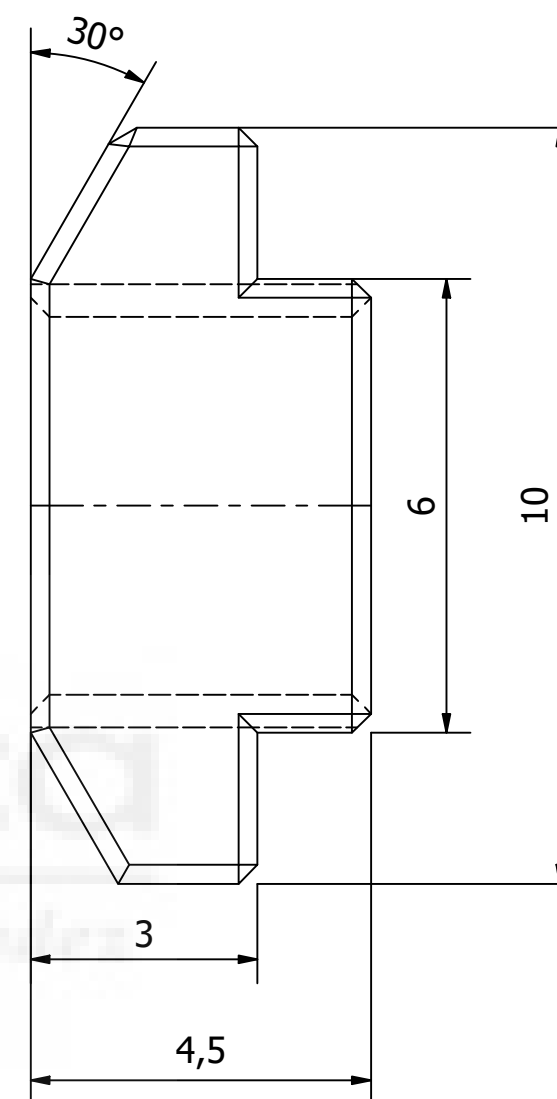
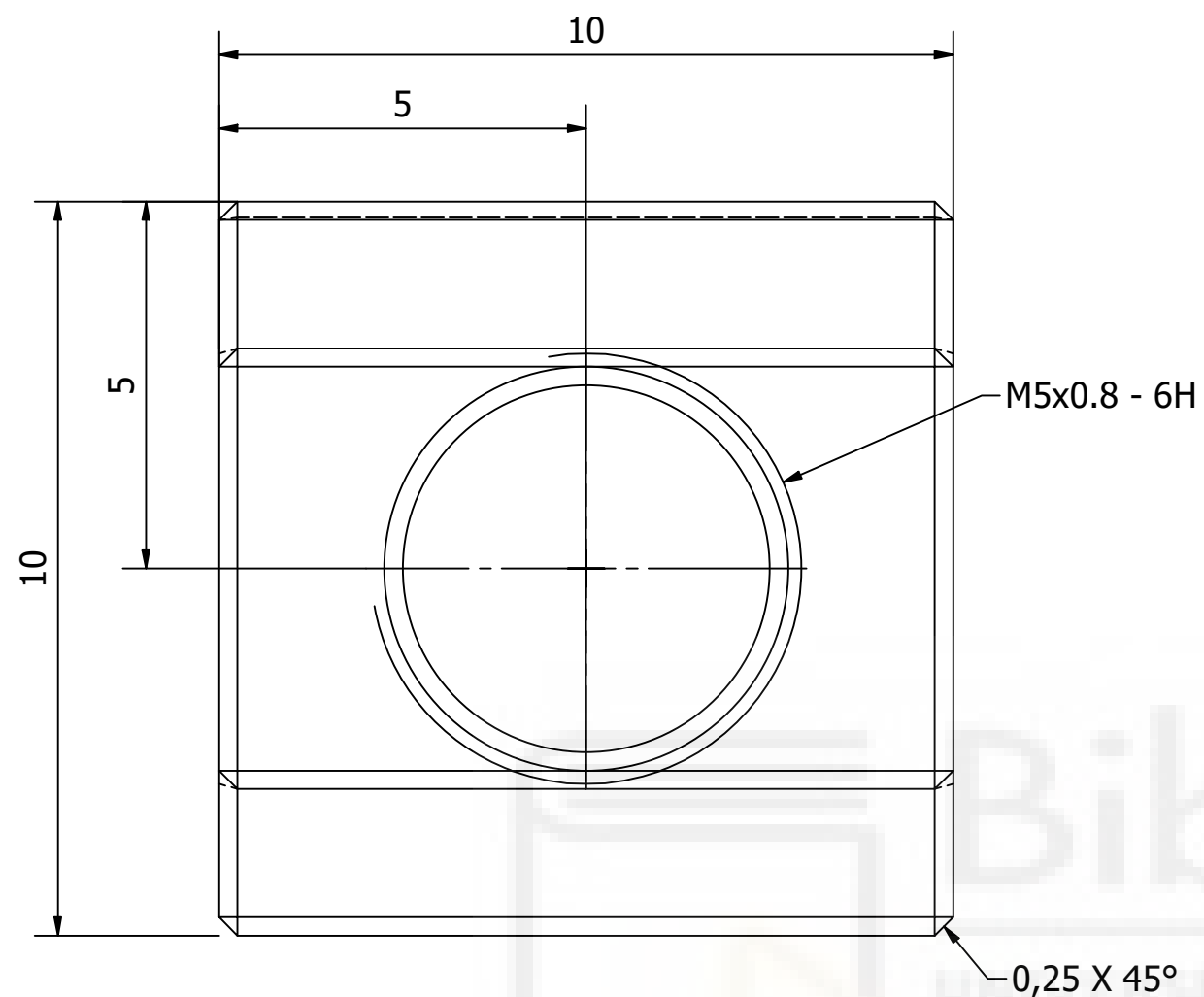


Los bordes externos tienen un acabado de $r = 2 \text{ mm}$
Los bordes interno tienen un acabado de $0,5 \text{ mm} \times 45^\circ$

Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material: PETG	Fecha 29/05/2025	Escala 1:1
Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
Soporte Dial 3D				Edición 1	Hoja 1 / 1	

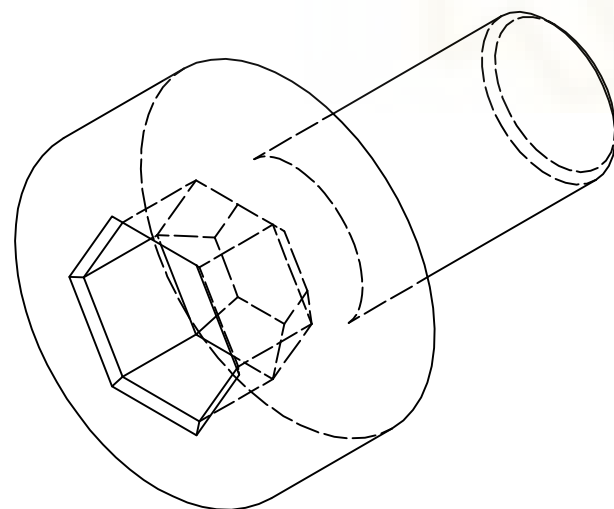
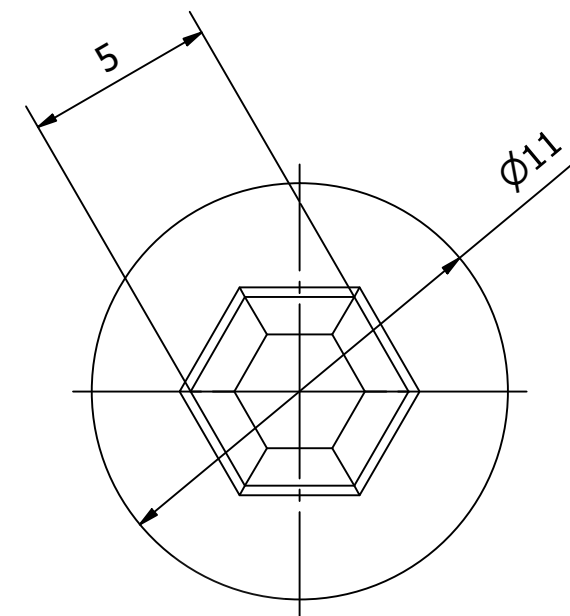
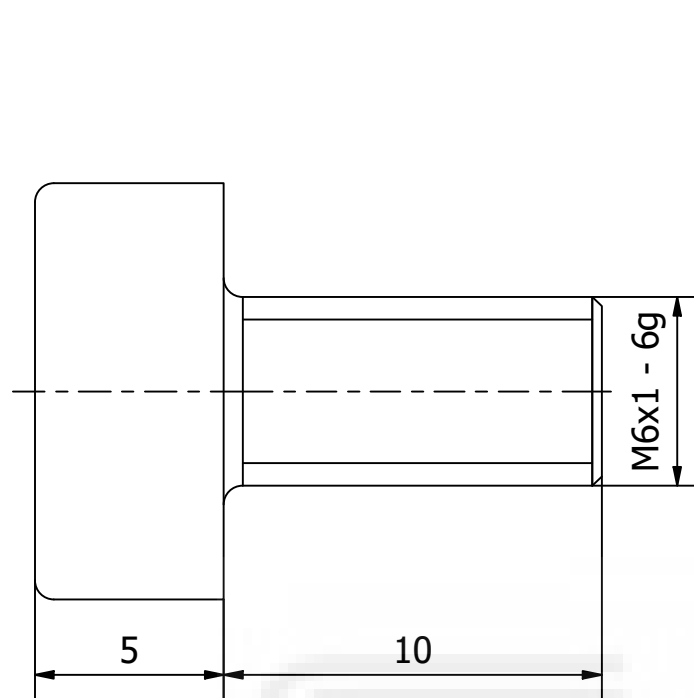


Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material Aluminio 6061	Fecha 31/05/2025	Escala 1:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
Varilla				Edición	Hoja 1 / 1	

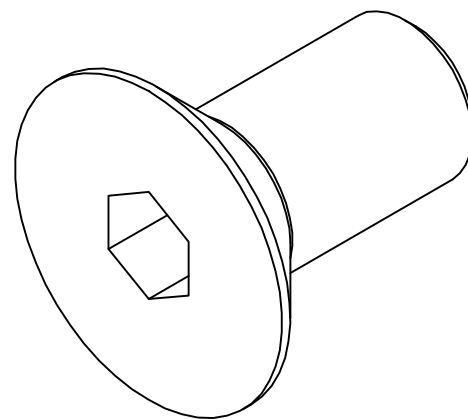
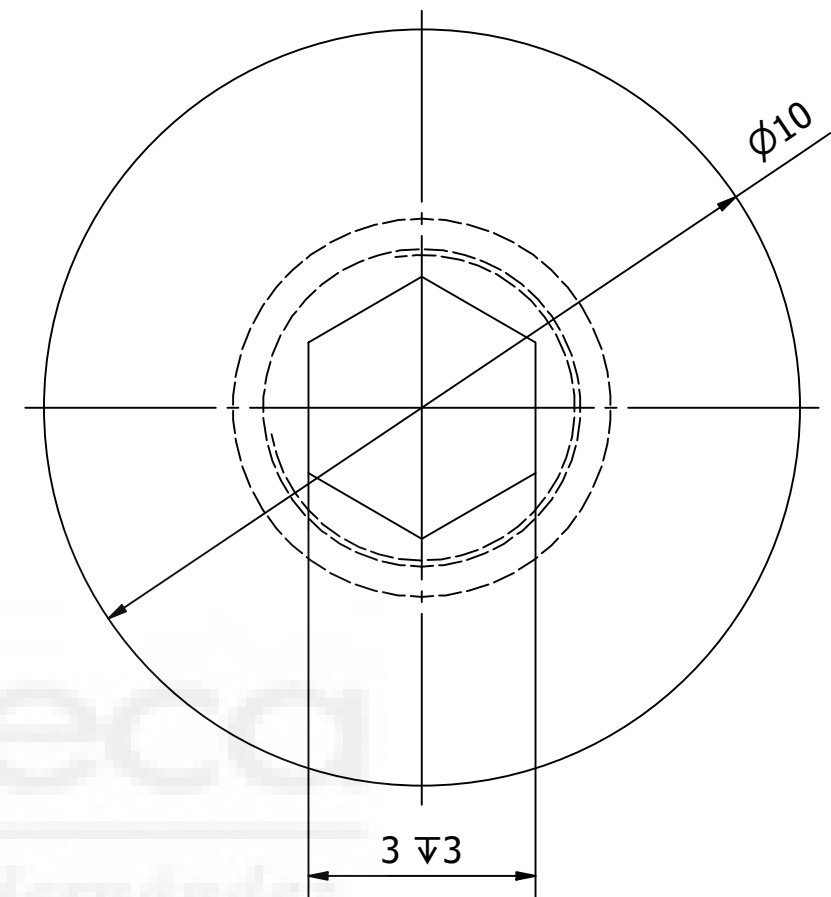
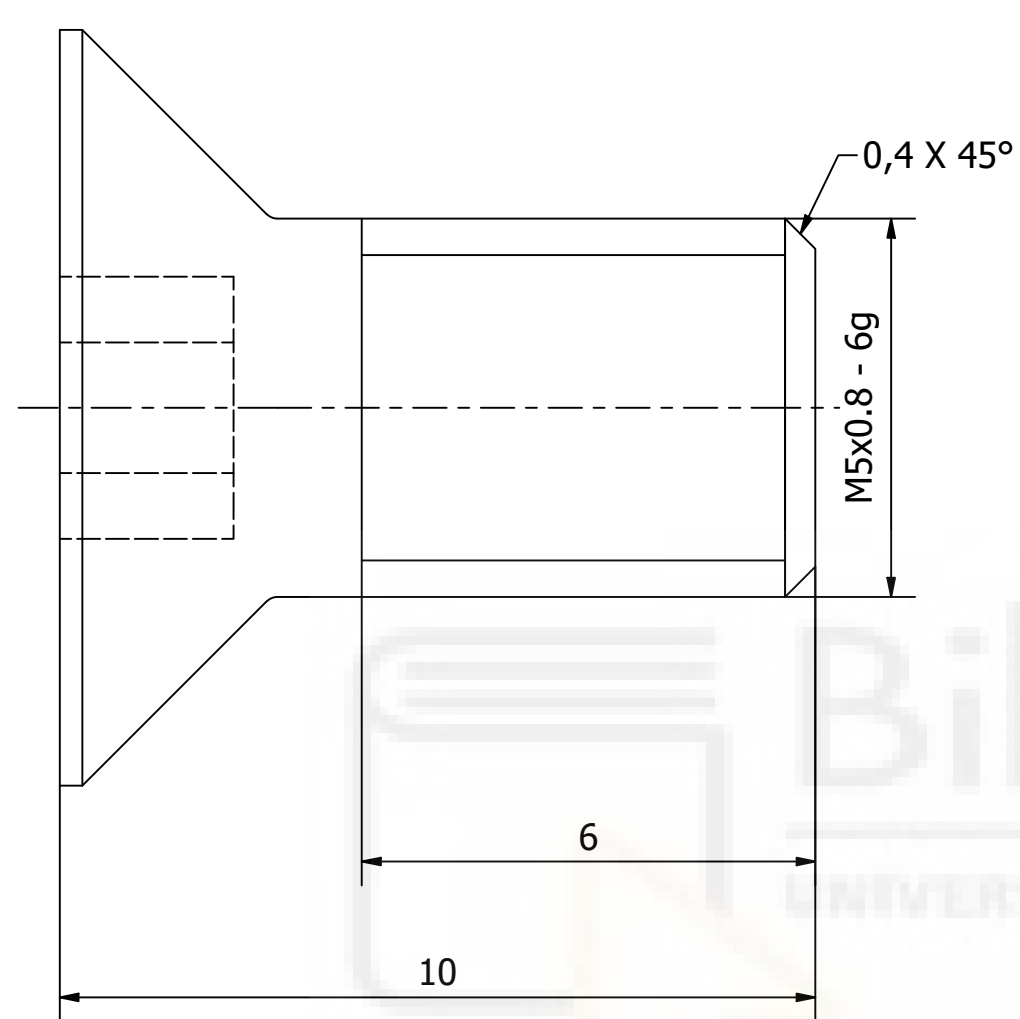


Todos los bordes externos y alojamiento de tornillo tienen un acabado de 0.25 x 45°

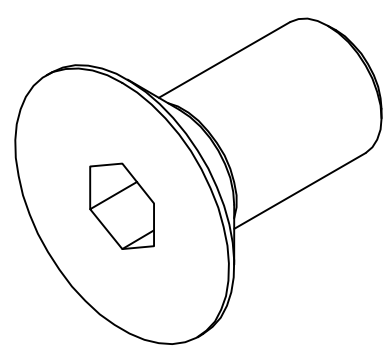
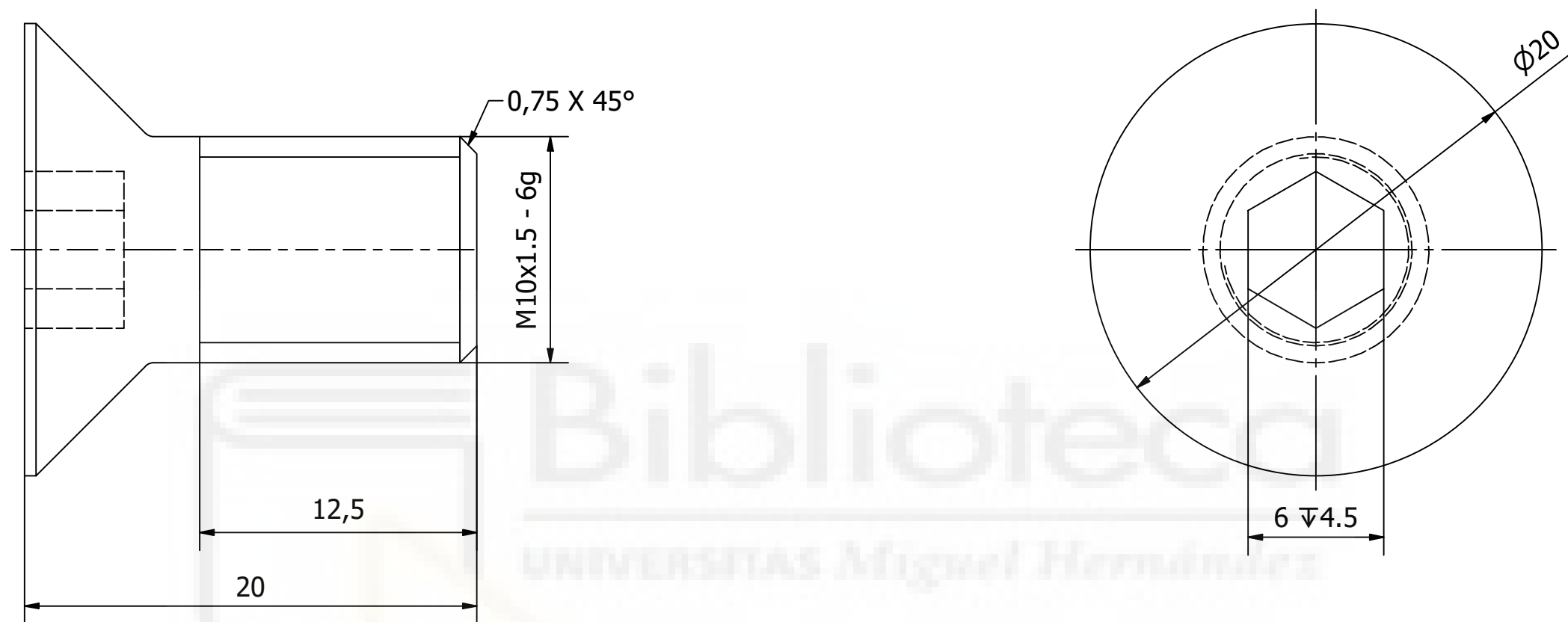
Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material Acero AISI 304	Fecha 31/05/2025	Escala 10:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
				TUERCA T M5		Edición 1 / 1



Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material: Acero AISI 304	Fecha 31/05/2025	Escala 5:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
				Tornillo M5x10 ALLEN		Edición 1 / 1



Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material Acero AISI 304	Fecha 31/05/2025	Escala 10:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
Tornillo M5x10 AVELLANADO				Edición	Hoja 1 / 1	



Diseño de A. Alcázar	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Material: Acero AISI 304	Fecha 31/05/2025	Escala 4:1
 Universidad Miguel Hernández				Banco de pruebas		
				Tornillo M10x20 AVELLANADO		Edición 1 / 1



16100-2Z

Deep groove ball bearings

Bearing data

[Tolerances,](#)

Normal (metric), P6, P5, Normal (inch),

[Radial internal clearance,](#)

Matched bearing pairs, Stainless steel

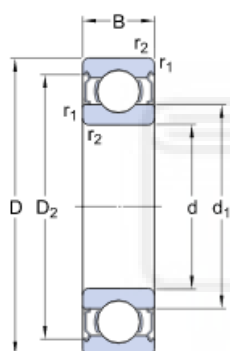
d < 10 mm, Other bearings

Bearing interfaces

[Seat tolerances for standard conditions,](#)

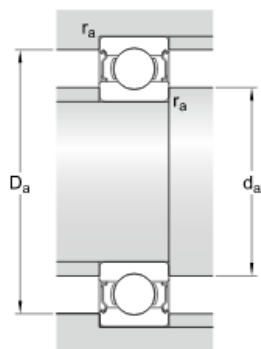
[Tolerances and resultant fits](#)

Technical specification



DIMENSIONS

d	10 mm
D	28 mm
B	8 mm
d ₁	≈ 17 mm
D ₂	≈ 24.72 mm
r _{1,2}	min. 0.3 mm



ABUTMENT DIMENSIONS

d _a	min. 14.2 mm
d _a	max. 16.6 mm
D _a	max. 23.8 mm
r _a	max. 0.3 mm