

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías
Industriales

Diseño y puesta a punto de un sistema mecánico para
la calibración de transductores de par

Autor: Ricardo Jesús García Melgar

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías Industriales

Diseño y puesta a punto de un sistema mecánico para la calibración de transductores de par

Autor:

Ricardo Jesús García Melgar

Tutor:

Andrés Jesús Martínez Donaire

Profesor ayudante doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Diseño y puesta a punto de un sistema mecánico para la calibración de transductores de par

Autor: Ricardo Jesús García Melgar

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, desde mis padres y hermanos hasta mis tíos y abuelos, por todo el apoyo que me han dado siempre, apoyándome en los peores momentos y los mejores, aun estando lejos, y haciendo que esta carrera tan dura sea mucho más fácil.

Me gustaría agradecerles a mis compañeros Carlos Galán y Alberto Lériada todo su apoyo y ayuda. Gracias por todo lo que me habéis enseñado (desde el mundo de la calibración hasta personalmente) durante todo el tiempo que hemos pasado juntos. Sin ustedes, este TFG no hubiese sido posible y, además, el tiempo que en la empresa no hubiese sido igual.

También quiero agradecerle a mi tutor Andrés todo lo que me ha ayudado, estando siempre que lo he necesitado por muy ocupado que estuviese.

Por último, peor no por ello menos importante. Quiero agradecer a esas personas que día tras día han estado ahí apoyándome, compartiendo días de estudios, cervezas, comidas de tupper y sobretodo risas y bromas, porque como siempre recordaré “La vida son más cosas”.

Ricardo Jesús García Melgar

Sevilla, 2016

Resumen

En este proyecto se va a desarrollar y poner a punto un sistema mecánico. Con este sistema, se van a mejorar los resultados en la calibración de transductores de par que se obtenían con el proceso de calibración inicial.

Para iniciar este TFG, se analiza el banco de calibración con el que se contaba inicialmente, el cual era bastante simple, y que, sobretodo, los resultados que se obtenían no eran los adecuados. Después de las pruebas, se observó que lo que sucedía era que la unidad de lectura leía como torsión, el esfuerzo de flexión que soportaba el cuadradillo al colocarle todas las masas directamente sobre él.

En ese momento, se abren tres vías: Comprar un nuevo banco de calibración, pedir a una empresa externa que se encargue ella de solucionar el problema o diseñar un sistema mecánico propio. Se decide diseñar el sistema mecánico.

Para absorber el esfuerzo de flexión se decide poner un eje biapoyado. Para biapoyar el eje, se usan dos rodamientos. Además, se debe de tener en cuenta que el eje y el transductor deben de estar alineados. por esta razón, se decide dar libertad de posicionamiento al transductor. Para calibrar en ambos sentidos el par, se un sistema que permita girar todo el mecanismo de una manera bastante simple.

Se ha puesto de manifiesto en las pruebas realizadas al equipo diseñado que éste es adecuado para calibrar pares en el rango de 5 - 2700 Nm. Sin embargo, pares por debajo de ese umbral no pueden ser calibrados adecuadamente debido a la existencia de un rozamiento parásito inicial que lo impide.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
1.1 <i>La metrología en la actualidad</i>	3
1.2 <i>Fundamentos de un laboratorio metrológico</i>	4
1.3 <i>Objetivos del trabajo fin de grado</i>	6
2 Análisis de la Bancada de calibración	7
2.1 <i>Caracterización del sistema</i>	7
2.2 <i>Procedimiento de calibración</i>	8
2.3 <i>Calibración en el rango 4.5 Nm hasta 45 Nm</i>	10
2.4 <i>Calibración completa</i>	11
2.5 <i>Caracterización del sistema</i>	14
3 Diseño del sistema mecánico	17
3.1 <i>Análisis previo al diseño</i>	18
3.2 <i>Búsqueda de materiales</i>	20
3.2.1 <i>Elemento para permitir el giro</i>	21
3.2.2 <i>Elementos de posicionamiento</i>	24
3.2.3 <i>Cálculo y elección de cojinetes</i>	27
3.3 <i>Diseño de piezas</i>	29
3.4 <i>Tornillería</i>	38
4 Puesta a punto del sistema	39
5 Conclusiones y desarrollos futuros	53
5.1 <i>Conclusiones</i>	53
5.2 <i>Desarrollos futuros</i>	54
Referencias	55
Glosario	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Equivalencias de las primeras unidades métricas [3]	2
Tabla 2-1. Resultados pruebas biapoyo	11
Tabla 2-2. Análisis de IC y U en todos los transductores	12
Tabla 2-3. Valor del par corregido	14
Tabla 2-4. Valores de la longitud efectiva para la rueda	14
Tabla 3-1. Características de los distintos platos divisores	22
Tabla 3-2. Datos dimensionales del plato giratorio	24
Tabla 3-3. Coeficientes de fricción	27
Tabla 3-4. Valores de las constantes	28
Tabla 4-1. Valores para el transductor T6	40
Tabla 4-2. Valores para el transductor G1	40
Tabla 4-3. Valores para el transductor T1	40
Tabla 4-4. Valores para el transductor G2	41
Tabla 4-5. Valores para el transductor G3	41
Tabla 4-6. Valores para el transductor G4	41
Tabla 4-7. Valores para el transductor T2	42
Tabla 4-8. Valores para el transductor T2	42
Tabla 4-9. Valores del transductor T6 con el “empujoncito”	43
Tabla 4-10. Valores del transductor T1 con el “empujoncito”	43
Tabla 4-11. Valores del transductor G1 con el “empujoncito”	43
Tabla 4-12. Valores del transductor G3 con “empujoncito”	44
Tabla 4-13. Valores del transductor M5 con “empujoncito” y cero hechos fuera	44
Tabla 4-14. Caracterización del par del brazo	47
Tabla 4-15. Caracterización del par de la mariposa	47
Tabla 4-16. Valores para el transductor G2 con mariposa caracterizada	48
Tabla 4-17. Valores para el transductor G3 con mariposa caracterizada	48
Tabla 4-18. Valores para el transductor T5 con eje caracterizada	49
Tabla 4-19. Tabla de compatibilidad	49
Tabla 4-20. Tabla de compatibilidad	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Primeras unidades de medidas	2
Figura 1-2. Instalaciones de un laboratorio metrológico	4
Figura 1-3. Transductor de par	5
Figura 1-4. Símbolo de la Entidad Nacional de Acreditación	6
Figura 2-1. Banco de calibración descargado	7
Figura 2-2. Bancada de calibración con carga	8
Figura 2-3. Ejemplo de montaje para un transductor individual	8
Figura 2-4. Ejemplo de montaje para un transductor individual	9
Figura 2-5. Secuencia de calibración	9
Figura 2-6. Viga en voladizo	10
Figura 2-7. Comprobación del momento flector	10
Figura 2-8. Representación de las desviaciones del T6 en sentido antihorario	13
Figura 2-9. Representación de las desviaciones del T6 en sentido horario	13
Figura 2-10. Valores de la longitud eficaz para la rueda (T6)	15
Figura 2-11. Valores de la longitud eficaz para la rueda (P1)	15
Figura 2-12. Valores de la longitud eficaz para el disco de 2.5 inch	16
Figura 2-13. Prueba para forzar la flexión con el adaptador	16
Figura 3-1. Modelo del eje y apoyos	19
Figura 3-2. Plato divisor	21
Figura 3-3. Plato giratorio	23
Figura 3-4. Planos del plato giratorio	23
Figura 3-5. Anillo distanciador	24
Figura 3-6. Mesa de posicionamiento CP2	26
Figura 3-7. Mesa de posicionamiento MF-1	26
Figura 3-8. Dimensiones del rodamiento 2308 EKTN9	28
Figura 3-9. Pieza E00	30
Figura 3-10. Pieza E01	30
Figura 3-11. Pieza E02	31
Figura 3-12. Pieza E03	31
Figura 3-13. Pieza E04	32
Figura 3-14. Pieza E05	32
Figura 3-15. Pieza E06	33
Figura 3-16. Pieza E07	33
Figura 3-17. Pieza E08	34

Figura 3-18 Pieza E09	35
Figura 3-19 Modelo de simulación	35
Figura 3-20 Desplazamientos de la placa	36
Figura 3-21 Tensiones en la placa	36
Figura 3-22 Pieza E11	37
Figura 3-23 Sistema de calibración final en Catica v5	37
Figura 3-24 Sistema de calibración final	38
Figura 4-1. Calibración con mariposa	45
Figura 4-2. Calibración con disco de 5 inch	45
Figura 4-3. Calibración con disco de 2.5 inch	46

1 INTRODUCCIÓN

“El papel de la metrología en el progreso humano es invasivo, pero discreto, hasta el punto de que puede pasar tan desapercibido como la necesidad de un ambiente respirable para la inmensa mayoría de las especies vivientes.”

- Prof. Carlos Enrique Granados –

La metrología se define según la RAE como la ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas. Esta ciencia está situada horizontalmente en la base del conocimiento y es fundamental para la investigación y desarrollo, fabricación industrial, medicina, comercio, etc [1]. Cuanto más avanza la metrología, más avanza la ciencia. Este efecto es provocado porque al poder tener más precisión al medir, se pueden hacer investigaciones más minuciosas.

La metrología suele pasar desapercibida para la sociedad, esto se refleja muy bien en la cita del profesor Carlos Granados [2] que precede este capítulo, donde compara la metrología con el aire. Este último, está tan presente en la vida que el ser humano no llega a percatarse que está respirando, pero, sobretodo, lo importante que es, simplemente respira y vive. Con la metrología pasa algo similar, constantemente se está usando, tanto en el ámbito científico como en la vida cotidiana de las personas; como ejemplo, si un químico no pudiese medir con exactitud la cantidad de disolvente y de soluto que necesita para hacer una disolución, no podría analizar que ha sucedido, ni repetir el experimento; si un cocinero no pudiese pesar las cantidades de comidas, no sería capaz de hacer que la comida le quedase bien cocinada y tampoco sería capaz de repetirla. Estos ejemplos son sobre profesiones, pero al introducirse aún más en la vida cotidiana, se comprueba que, si no existiera la metrología, ¿cómo se haría un intercambio justo? Es decir, cómo se podría saber cuántos kg de carne equivalen a qué precio, o simplemente que realmente es lo que dicen y no una estafa. Como se observa en los ejemplos, la metrología aporta una precisión y una fiabilidad, con las cuales se pueda repetir de manera bastante exacta y a la vez se pueda confiar en que no hay error, es fiable.

Para que exista humanidad, debe de haber negocios, intercambios e interacciones entre las personas. La metrología está presente desde este inicio, ya que los seres humanos tuvieron que ideársela para tener un sistema que sirviese para medir, así nació la metrología.

Al principio, los humanos tenían que usar su propio cuerpo a la hora de medir para poder contabilizar e intercambiar productos. Así aparecen las primeras unidades, el pie, muy útil para medir terrenos, el codo, muy útil para piezas que están a la altura de este, por ejemplo, piezas que se van a encontrar en un mostrador, el paso, con un principio parecido al pie, pero para terrenos mucho más grandes. Por último, para las medidas más pequeñas aparecen la palma y el dedo.

Como estas últimas referencias tienen diferentes grosores, por ejemplo, el dedo índice y el dedo pulgar; aparecen distintas formas como son la palma, la cuarta o palmo, el dedo y la pulga (véase la Fig.1-1).



Figura 1-1. Primeras unidades de medidas

En ese momento se dieron cuenta que se necesitaba relacionar todas las unidades. A causa de esto, aparecen las primeras relaciones métricas [3]:

- El pulgar es $4/3$ del dedo normal.
- La palma son 4 dedos.
- El pie consta de 4 palmas.
- El codo tiene 1 pie y medio o lo que es lo mismo, 6 palmas.

Una vez definidos las unidades básicas, el resto se basan en estas. Gracias a esto, las unidades pueden relacionarse en una tabla (véase tabla 1-1).

	Dedo	Pulgada	Palma	Pie	Codo	Vara
Línea	$1/9$	$1/12$				
Grano	$1/4$	$3/16$				
Dedo		$3/4$				
Pulgada	$4/3$			$1/12$		
Palma	4	3		$1/4$		$1/4$
Cuarta o Palmo	12		3	$3/4$		
Pie	16	12	4			
Codo	24		6	1,5		
Grado	40		10	2,5	$5/3$	
Vara	48		12	3	2	
Paso	80		20	5	103	
Braza	96		24	6	4	

Tabla 1-1. Equivalencias de las primeras unidades métricas [3]

1.1 La metrología en la actualidad

Conforme la metrología avanza, la humanidad crece. Esto se produce porque al avanzar la forma de medir, aparecen rangos de medida más amplios, con menores incertidumbres y tolerancias, pero sobretodo, mucho más exigentes, consiguiendo con esto, obtenerse resultados mucho más precisos y, por tanto, pudiendo obtenerse, por ejemplo, las propiedades del material analizado de una forma más exacta y fiable.

La metrología según ha ido evolucionando, se ha dividido en tres campos de estudio [4]. Estos campos de estudio se definen según el CEM como:

- **Metrología científica:** La rama de la ciencia que se ocupa de la organización y el desarrollo de los patrones de medida y de su mantenimiento.
- **Metrología legal:** Campo de la metrología que contempla las actividades por las que se establecen las exigencias legales sobre las medidas, unidades de medida, instrumentos de medida y métodos de medida, cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente.
- **Metrología industrial:** Es la ciencia que se centra en mejorar constantemente los sistemas de mediciones relacionados con la producción y calidad de los productos.

Otra de las evoluciones que ha tenido la metrología ha sido en sus patrones de referencia. Como se vio al principio de esta introducción, las unidades se basaban en partes del cuerpo. Los cuerpos son distintos para cada persona, lo que hacía que estas unidades tuviesen una muy mala precisión, es decir, cada unidad aun siendo teóricamente iguales, eran distintas o como se diría actualmente, tenían una gran incertidumbre.

La BIPM es el organismo encargado de generar las bases para unificar y así crear un sistema único y coherente de medidas, además de garantizar la trazabilidad con el SI. Esto lo hacen con la difusión directa de las unidades, por ejemplo, comparando patrones de distintos países.

Un patrón es la unidad de referencia, es decir, todas las unidades se comparan con esta. Existen varios tipos, primarios, secundarios, de referencia... Según el tipo que sea, este tendrá una precisión u otra. Estos patrones se han ido modificando según han ido pasando los años. Empezaron siendo cosas cotidianas y objetos físicos y poco a poco se están universalizando. A continuación, se presentan los distintos tipos de patrones de referencia que existen. [5]

- **Masa:** La unidad del SI es el kilogramo, la cual se define como el prototipo que se encuentra en el BIPM desde 1889, con forma de cilindro, con diámetro y altura de aproximadamente 39 mm, formado por una aleación de 90% de platino y 10% de iridio.
- **Longitud:** La definición del metro, unidad del SI para la longitud, es la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de un segundo.
- **Tiempo:** El tiempo se mide en segundos, el cual es la duración de $9,192631770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo.
- **Temperatura:** La unidad para medir la temperatura es el Kelvin, la cual es la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
- **Corriente:** La unidad eléctrica internacional es el amperio, el cual es la corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección transversal circular despreciable, y se coloca 1 m en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} Newton por metros de longitud.

1.2 Fundamentos de un laboratorio metrológico

Buscando la definición que da la RAE para la palabra laboratorio, se observa que es el lugar dotado de los medios necesarios para realizar investigaciones, experimentos y trabajos de carácter científico o técnico. Si a esta definición se le añade la definición dada al principio sobre metrología, se puede extrapolar que un laboratorio de metrología es aquel lugar dotado de los medios necesarios para realizar investigaciones, experimentos y trabajos sobre los elementos de medidas y pesas.

En un laboratorio metrológico (véase la Fig. 1-2) pueden llegar a existir distintos sectores como pueden ser el área dimensional, el área de presión... [6]



Figura 1-2. Instalaciones de un laboratorio metrológico

Haciendo un paréntesis en el fundamento de un laboratorio, se comenta que el área en el que se va a centrar este trabajo va a ser el área de momentos, más concretamente en la calibración de transductores de par (véase la fig. 1-3). Estos elementos son los encargados de recibir una señal, en este caso mecánica (un par), y transformarla en otra totalmente distinta, como puede ser una unidad eléctrica.

Estos elementos se usan como patrones a la hora de medir par ya que se puede cuantificar el valor mecánico. Son los elementos con los que se calibran las llaves dinamométricas, por ejemplo.

Existen varios tipos de transductores, pero los que se van a usar aquí, se basan en la extensometría [7]. Estos transductores tienen unas galgas extensiométricas situadas en una posición muy concretas en el cuadradillo y mediante un puente de wheatstone es capaz de transformar la señal física.



Figura 1-3. Transductor de par

Continuando con los fundamentos de los laboratorios, se debe de decir que tienen que haber unas condiciones muy concretas y controladas ya que, las operaciones que se realizan en estos centros son tan precisas que cualquier variación en alguna de estas condiciones, hace que el resultado varíe llegando a tener que invalidarlo.

Las condiciones a la que se refiere son: [6]

- Localización
- Temperatura
- Humedad
- Presión
- Limpieza del aire
- Vibraciones
- Ruidos
- Iluminación
- Alimentación eléctrica
- Puesta a tierra
- Mobiliario

Todo laboratorio tiene que estar acreditado por un órgano pertinente, y seguir lo que se denomina trazabilidad, esto es que el laboratorio de referencia, que en España es el CEM, acredita a otro de orden anterior. Éste último, puede acreditar a otro de un orden inferior y así sucesivamente, consiguiendo una cadena, la cual se denomina cadena metrológica. Pero, ¿qué significa estar acreditado? Esta pregunta se puede responder fácilmente, consiste en que el laboratorio determinado, tiene una declaración formal por una entidad independiente, de la competencia técnica de otro organismo para la realización de una tarea perfectamente determinada. [6]

Un laboratorio acreditado tiene garantizada la independencia y la competencia técnica de estos organismos para el correcto desempeño de sus actividades. Aun así, estos laboratorios deben de ser inspeccionados de manera regular por el organismo que lo certifica, para así corroborar que se cumplen las exigencias determinadas para

cada actividad.

El organismo a nivel nacional que se encarga de certificar es ENAC (véase la Fig. 1-4), éste es un organismo privado, independiente y sin ánimo de lucro, al cual puede acudir cualquier solicitante, sin importar el sector donde practica su actividad.

ENAC es la encargada de coordinar y dirigir a nivel nacional un sistema que esté acorde con las normas internaciones como pueden ser las ISO, además de las europeas EN (serie 45000).



Figura 1-4. Símbolo de la Entidad Nacional de Acreditación

1.3 Objetivos del trabajo fin de grado

La motivación que lleva a realizar este trabajo, es la de tener un sistema capaz de calibrar los numerosos transductores de par que se tienen en propiedad. Esto se quiere porque, una vez conseguido, la empresa obtendrá un importante ahorro de dinero ya que, calibrar estos elementos tan precisos en el exterior tiene un elevado coste. Además, al conseguir calibrar los transductores de par propios, se consigue calibrar cualquier transductor en ese rango, por tanto, se puede abrir una nueva línea de negocio, calibrando a otras empresas sus transductores. Para ello, la empresa compra un banco de calibración con el que empieza este trabajo, el cual se divide en tres partes.

Durante la primera parte, se va a analizar una bancada comercial. Comprobando si con ella se conseguiría la incertidumbre necesaria para los transductores propios y, por tanto, los de los clientes. En el caso de que no fuese así (ya se adelanta de que no se va a conseguir la incertidumbre deseada), se analizan las vías que se pueden tomar.

En la siguiente parte, se diseña el sistema mecánico ideado. Este sistema está pensado para mejorar la bancada comercial analizada en la primera parte, por lo tanto, es un sistema que se va a acoplar a la bancada y que va a aumentar la precisión de la medición, reduciendo así la incertidumbre en la calibración.

Una vez realizado el análisis y el diseño, llega el momento de poner a punto todo lo anterior. Por tanto, esta parte se centra en intentar entender el sistema que se ha diseñado, comprobando la nueva incertidumbre que se obtiene para cada punto del rango.

2 ANÁLISIS DE LA BANCADA DE CALIBRACIÓN

2.1 Caracterización del sistema

Antes de comenzar a realizar el análisis de la bancada, se comentará en que consiste el concepto de la calibración. Este concepto se puede explicar diciendo que la calibración es la relación entre el valor de salida y el de entrada, el cual es el que se quiere medir y que para el caso que incumbe a este TFG, el par o torsión.

Con otras palabras, se puede decir que para calibrar lo que se hace es una comparación entre el valor generado y la referencia, la cual tiene las mismas unidades que la señal de entrada. Para conseguir esto, se debe tener en cuenta que el par de referencia usado tiene que ser trazable, es decir, de un orden superior que el par que se está midiendo. Ejemplificando esto, se puede decir que el par que genera una llave dinamométrica se compara frente al par de un transductor, por tanto, este transductor a la hora de ser calibrado, se debe comparar con un elemento de orden superior como podría ser generando el par a través de pesas y brazos y así sucesivamente, siguiendo la cadena metrológica.

A continuación, se presenta el sistema base (véase la Fig. 2-1 y 2-2) del que se va a partir. Este es un sistema de palanca patrón de carga directa [8], es decir, para definir el par se hace a través de unas masas de valor conocido situados en el campo de gravedad terrestre sostenidas por un brazo de palanca de longitud conocida. El elemento a calibrar está soportando directamente la palanca, la cual está acoplada al sistema calibrado a través de elementos rígidos (cuadradillos).



Figura 2-1. Banco de calibración descargado

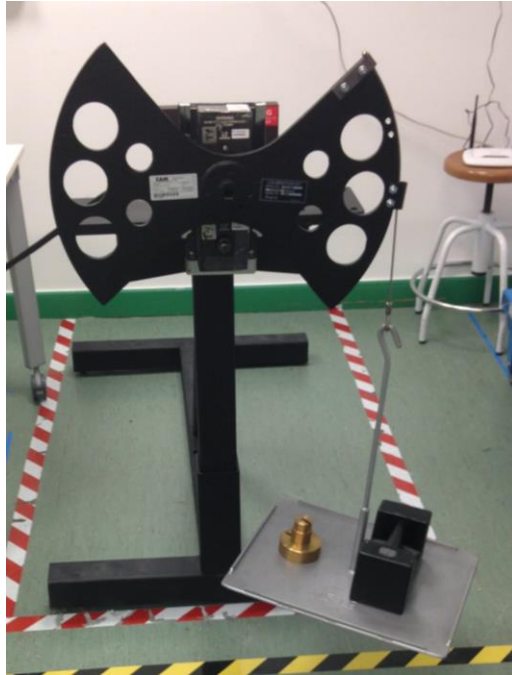


Figura 2-2. Bancada de calibración con carga

2.2 Procedimiento de calibración

Antes de comenzar la calibración, el equipo a calibrar debe de haber alcanzado la estabilización térmica, esto se consigue dejando el equipo con todos sus elementos al menos una hora en la habitación donde se va a realizar la calibración. Además, todos los elementos deben de permanecer al menos 30 min conectados y encendidos para que el funcionamiento eléctrico sea el idóneo.

Las condiciones ambientales no solo afectan a la hora de la estabilización del equipo, sino también pueden hacer que varíen los resultados finales. Por esta razón, la sala donde se vaya a realizar la operación debe de encontrarse en un rango de temperatura $20,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$ y con una humedad menor al 70 %HR. Además, durante el proceso de calibración, la temperatura de la sala no debe de variar más de 1 °C .

La calibración del transductor se va a realizar en sentido horario y antihorario. Tomando el punto inicial y el final, además de tres puntos intermedios al 30%, 50% y 70% de la capacidad de medida del instrumento.

El instrumento a medir se debe de colocar en la bancada de forma que, a la hora de colocar el peso, este esté en una zona libre, sin entrar en contacto con ningún elemento (véase la Fig. 2-3 y 2-4). Una vez colocado todo en su sitio, se asegurarán con unos pernos para mayor seguridad y estabilidad.

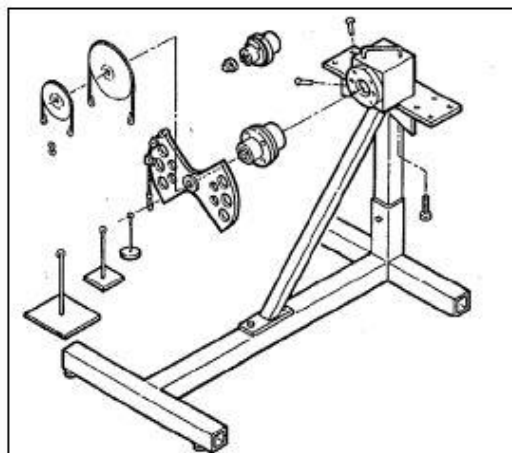


Figura 2-3. Ejemplo de montaje para un transductor individual

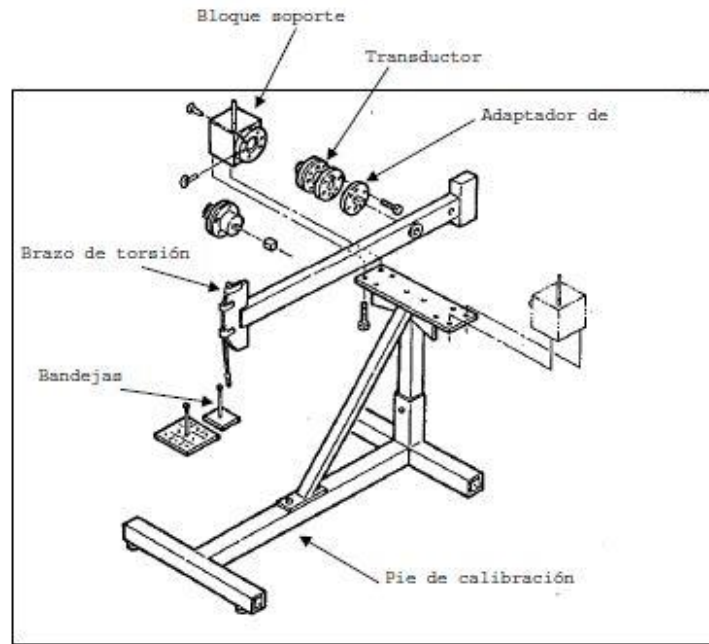


Figura 2-4. Ejemplo de montaje para un transductor individual

Una vez montado el transductor en el pie de calibración de la forma correcta, se deja estabilizar durante 5 minutos, se le coloca el brazo adecuado para la calibración y se pone el equipo a 0, para esto se pulsa el botón Zero Tare que trae la máquina.

A continuación, se realizan tres precargas, es decir, se lleva al máximo el transductor tres veces para conseguir lo que se denomina “despercezar el transductor”. Este proceso hay que hacerlo ya que a las bandas extensiométricas les cuesta más deformarse cuando vienen de estar mucho tiempo sin ser usadas, que cuando ya han sido usadas.

Una vez realizadas las tres precargas, se le quitan las pesas y brazos y se vuelve a poner el sistema a cero. A partir de aquí se comienza la calibración.

La calibración se realizará en ambos sentidos y en las cuatro posiciones, es decir, a 0° , 90° , 180° y 270° girando siempre el transductor en sentido horario. En la posición de 0° , se realiza una subida, una bajada y una nueva subida, en el resto de puntos únicamente se realizará una subida y una bajada (véase la Fig. 2-5).

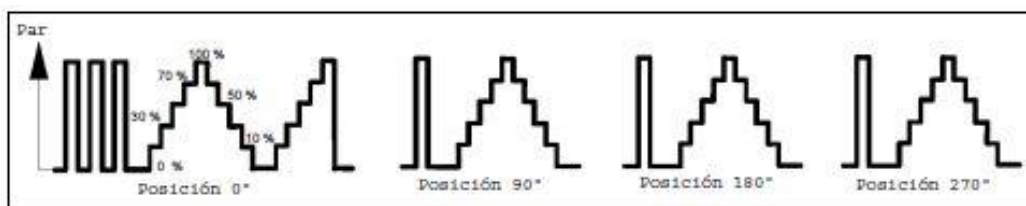


Figura 2-5. Secuencia de calibración

El realizar estas subidas y bajadas no se realizan por azar, con las dos subidas de la posición 0° se analiza la componente de la incertidumbre de la repetitividad. Comparando la primera subida con el resto de subidas en el resto de posiciones, se analiza la componente de la reproducibilidad, y comprando la subida con la bajada, lo que se analiza es la componente de la histéresis. Valores muy importantes a la hora del estudio de la incertidumbre de la medida.

2.3 Calibración en el rango 4.5 Nm hasta 45 Nm

Este rango de calibración no era un rango muy conflictivo, por esa razón se comenzó a calibrar por aquí. Efectivamente, en la primera posición, no se apreciaba nada extraño, pero una vez que se produce el primer giro y el transductor se coloca en la posición de 90° , empiezan a aparecer los problemas.

Conforme el par aumentaba, se empezaban a generar unas diferencias bastantes amplias entre los sentidos horarios y antihorarios, llegando a obtenerse en el fondo de escala un valor de 45.411 Nm en el sentido horario y 44, 600 Nm para el sentido antihorario. Observándose como la diferencia entre ellos está cercana al Newton metro, pero lo que es peor, ambas medidas difieren en ambos sentidos alrededor de 0.5 Nm del valor teórico, el cual era 45.040 Nm. Esta diferencia entre los valores tan similares, pero en sentidos contrarios, hace pensar que puede estar producida por una fuerza externa a la calibración en si, como puede ser la flexión.

Los brazos y los pesos se cuelgan directamente sobre el cuadradillo. Si modelásemos el cuadradillo con el peso en el extremo, se haría mediante una viga en voladizo (véase la Fig. 2-6), lo que quiere decir que su base soporta un esfuerzo de flexión, además del efecto de torsión que se desea. El efecto de flexión provoca en el cuadradillo una pequeña deformación que al trabajar con sistemas tan sensibles como son las bandas extensiométricas, lo entienden como torsión, lo que hace que se obtenga una medida errónea.

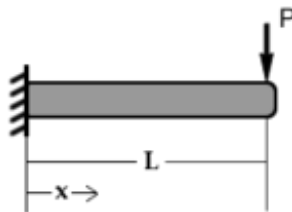


Figura 2-6. Viga en voladizo

En este momento, lo que se realiza es un experimento para comprobar el efecto de la flexión. Este experimento consiste en colocar las masas directamente sobre el cuadradillo (véase la Fig. 2-7), con esto se conseguiría que el par fuese nulo y, por tanto, la unidad de lectura no debería medir par. Pero eso no es lo que sucedió, se observó que, al colocarle la bandeja y las masas, con un peso total de aproximadamente 23 kg, la unidad de lectura medía un par alrededor del 0.3 y 0.5 Nm, lo que demuestra cómo se falsea el valor medido y corrobora lo dicho antes.

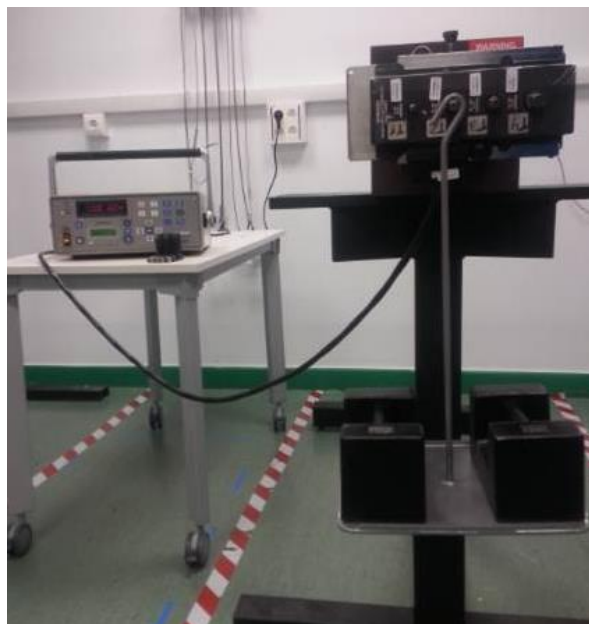


Figura 2-7. Comprobación del momento flector

Una vez realizado este experimento, se prueba a hacer lo contrario, intentar evitar la flexión, para eso se usa un trípode donde poder biapoyar el cuadradillo a través del adaptador, este adaptador se apoya en el trípode a través de un pequeño rodamiento, con esto, lo que se obtiene es la libertad de giro. Una vez montado el sistema se nivela el eje.

Una vez montado el sistema del experimento, se vuelve a repetir la prueba, obteniendo esta vez un valor de 0 Nm en la unidad de lectura. Con esto se corrobora que es el momento flector el que está falseando la señal y es el que hay que evitar por todos los medios.

Para comprobar como afecta este biapoyo a la calibración en sí, se decide tomar los dos últimos puntos, donde se observó que existía un mayor efecto la flexión (véase la tabla 2-1).

Con los datos medidos en esta prueba, se comprueba la importancia de la flexión en el método que se está utilizando ya que, con el biapoyo, aun siendo muy rudimentario, hace que el error obtenido en las medidas disminuya enormemente.

	Par Generado	Horario	Antihorario
Precargas	45.034	45.057	45.005
	45.034	45.064	45.008
	45.034	45.071	45.004
Subida	33.341	33.341	33.414
	40.058	40.087	40.115
Bajada	40.058	40.100	40.086
	33.341	33.341	33.456

Tabla 2-1. Resultados pruebas biapoyo

2.4 Calibración completa

Una vez estudiado el problema y visto que la flexión afecta, sobre todo cuando se realizan los giros. Se pasa a calibrar todos los transductores tal y como se haría si no hubiese ningún problema. Con esto, se consigue ver donde se tiene el mayor problema ya que, se pueden analizar todos los datos. Los datos en los que hay que fijarse son la compatibilidad con el laboratorio de referencia¹ y si se cumple el alcance querido.

Para ello se va a crear una tabla (véase la tabla 2-2) donde se va a poder observar los puntos en los que no se cumple el IC y los puntos en los que no cumplimos la incertidumbre. Los puntos que se toman a la hora de calibrar son los mismos puntos que se han tomado el laboratorio de referencia, es decir, 6 puntos en vez de los 5 dichos en el procedimiento.

¹ Para saber lo bueno o malo que es un laboratorio, se tiene que comparar con otro laboratorio, el cual es la referencia para él. Esta comparación se realiza calculando un índice de compatibilidad, el cual debe de ser menor que 1 para que sean compatibles.

T6	Sentido horario	IC	3 Últimos puntos
		Correcto U	En todos
	Sentido Antihorario	IC	Ningún punto
		Correcto U	4 Últimos puntos
T1	Sentido horario	IC	5 Últimos puntos
		Correcto U	3° y 6° Punto
	Sentido Antihorario	IC	En todos
		Correcto U	Todos menos 1° y 6°
T2	Sentido horario	IC	Todos menos 1°
		Correcto U	Ninguno
	Sentido Antihorario	IC	Todos
		Correcto U	Ninguno
T3	Sentido horario	IC	Todos
		Correcto U	4 Últimos puntos
	Sentido Antihorario	IC	Todos
		Correcto U	Todos menos 1°
T4	Sentido horario	IC	Todos menos 1°
		Correcto U	Todos
	Sentido Antihorario	IC	Todos
		Correcto U	Todos
T5	Sentido horario	IC	3 Últimos
		Correcto U	3 Últimos
	Sentido Antihorario	IC	Todos
		Correcto U	Todos

Tabla 2-2. Análisis de IC y U en todos los transductores

Analizando estos resultados, se observa como el mayor problema se encuentra en los transductores con el rango menor, es decir, en los pares bajos, donde no se cumplen ni el índice de compatibilidad ni la incertidumbre declarada a ENAC.

A continuación, se analiza cómo se comportan las desviaciones (véase las Fig. 2-8 y 2-9), para eso se comparan con las desviaciones que tiene el laboratorio de referencia sacando la diferencia de desviaciones, el cual representaría el efecto que genera el problema.

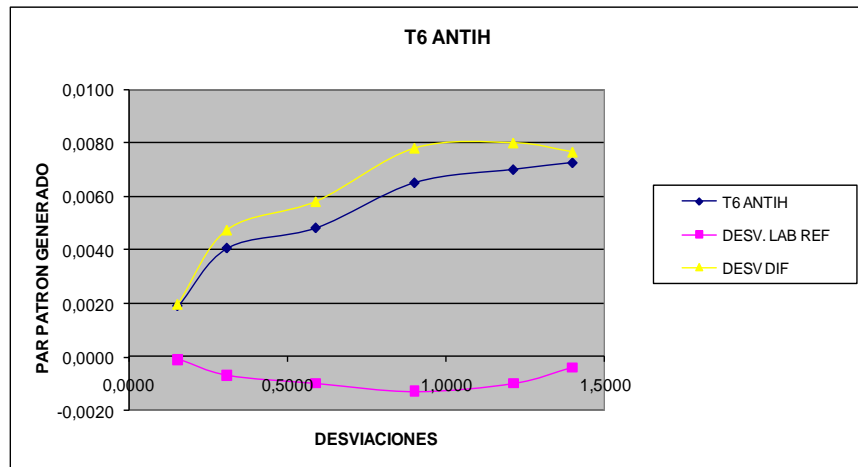


Figura 2-8. Representación de las desviaciones del T6 en sentido antihorario

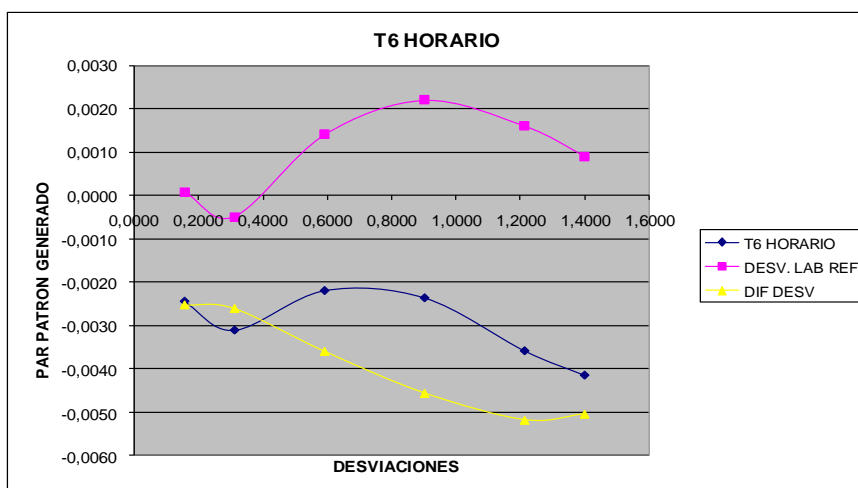


Figura 2-9. Representación de las desviaciones del T6 en sentido horario

Comparando ambas gráficas se pueden sacar algunas características:

- El comportamiento en sentido horario y antihorario es independiente y completamente distinto, lo que lleva a pensar que la forma de colocación y soldaduras de las galgas extensométricas hacen que se comporten de forma independientes, esto se puede extrapolar a otros transductores, es decir, cada transductor se va a comportar de una forma independiente ya que la forma constructiva y la posición de las galgas serán totalmente distintas.
- Se observan como aproximadamente las desviaciones que se han obtenido en los ensayos se comportan de manera similar a las del laboratorio de referencia, solo que, observando la diferencia entre desviaciones, se comprueba como las propias van creciendo conforme aumenta la carga, lo que vuelve a hacer pensar que la flexión está teniendo un papel muy importante en la toma de datos, al igual que pasó con el T2.

Una vez visto esto, se investiga para encontrar una posible solución, y se observa como en el acta de la reunión del SUBCOMITÉ TÉCNICO DE CALIBRACIÓN N° 5 el día 16-10-2007 dice que la flexión hace que la incertidumbre se vea bastante afectada. Además, se debe caracterizar el equipo, tal y como se dice en el siguiente

párrafo: “La medida de la longitud del brazo se puede realizar por medios dimensionales, y en ese caso la calibración deberá ser completada con una caracterización empleando un instrumento de medida de par calibrado por un laboratorio de nivel superior, para determinar la diferencia con la longitud efectiva del brazo de palanca entre acoplamientos y su variación en función de la carga, y de las influencias del acoplamiento directo.”

2.5 Caracterización del sistema

En este apartado se va a intentar caracterizar el sistema para poder obtener resultados compatibles con el laboratorio de referencia. Lo que realmente se caracteriza es la longitud del disco con el que se calibra el T6, es decir, la longitud calibrada se modifica para obtener los resultados que se desea. Aquí hay que decidir cómo hacer la caracterización del disco, ya que se puede hacer por tramos o por puntos.

Se toma la decisión de hacer la caracterización punto a punto, es decir, con un polinomio interpolador, para ello, se calcula la longitud efectiva para cada punto en el que se ha hecho una medida y con eso se puede generar una ecuación la cual pase por cada punto medido.

Se saca el valor de la longitud específica de la rueda de 2,5 pulgadas, con la que se calibró el T6, en el sentido horario. Primero se corrige el valor obtenido con la desviación del laboratorio de referencia (véase la tabla 2-3), esto se realiza sumando al valor medio obtenido la desviación obtenida por el laboratorio de referencia.

Valor medio (N m)	Desviación laboratorio referencia	Valor medio corregido (N m)
0,1532	0,00008	0,1531
0,3082	-0,0005	0,3087
0,5892	0,0014	0,5878
0,9003	0,0022	0,8981
1,2104	0,0016	1,2088
1,3966	0,0009	1,3957

Tabla 2-3. Valor del par corregido

Una vez obtenido un valor medio corregido, se calcula la longitud efectiva. Para ello, se divide el valor medio corregido entre la multiplicación de la suma de masas total por la gravedad (9.8 m/s^2) (véase la tabla 2-4 y la Fig. 2-10).

Valor medio corregido (N m)	Suma masas (kg)	L eficaz (m)
0,1531	0,2500	0,06247755
0,3087	0,500	0,06298980
0,5878	0,950	0,06313641
0,8981	1,450	0,06320197
1,2088	1,950	0,06325222
1,3957	2,250	0,06329478

Tabla 2-4. Valores de la longitud efectiva para la rueda

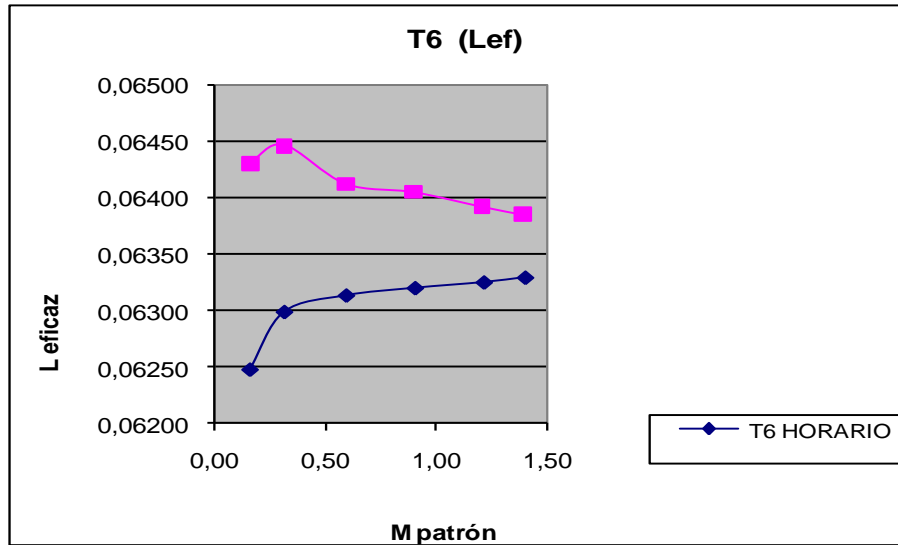


Figura 2-10. Valores de la longitud eficaz para la rueda (T6)

Todo esto se repite cada vez que se calcule la longitud eficaz para cualquier brazo o rueda y para cualquier sentido.

Ya se tendría caracterizado el disco de 2,5 inch, además, esta caracterización debería valer para cualquier rango similar al del T6. Para comprobar esto, se calibra el P1, y realizando los mismos pasos que antes se debería obtener unas longitudes y comportamiento similar a lo obtenido con el T6 (véase la Fig. 2-11)

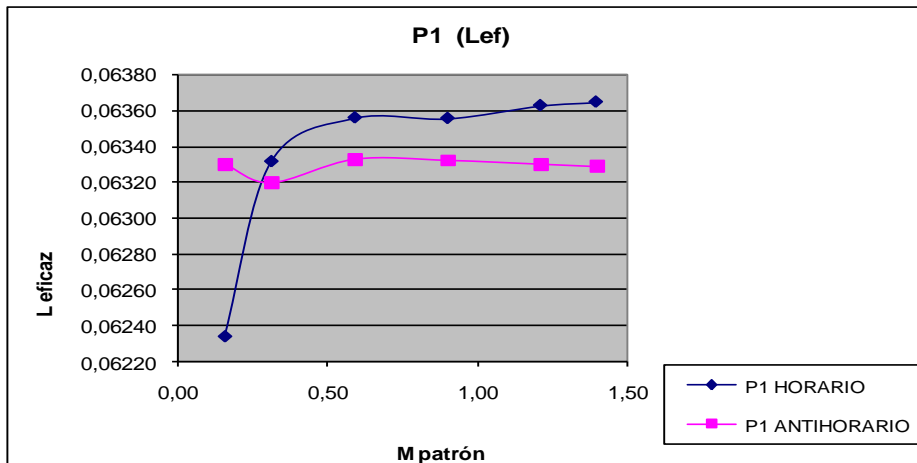


Figura 2-11. Valores de la longitud eficaz para la rueda (P1)

Una vez sacado los valores para el P1, se puede ver que el comportamiento es totalmente distinto para un transductor que, para el otro, aunque podría ser porque el P1 se ha calibrado con el disco al revés, con lo que se reduce la distancia a la que hacemos la calibración, disminuyendo así, teóricamente, el efecto de la flexión. Por esta razón, se realizan un par de pruebas más, una calibración igual que el P1, llamada sin distancia, y otra calibración con un adaptador, aumentando bastante el efecto de la flexión.

Una vez hechas las pruebas y sacadas las longitudes, se representan todas en la misma gráfica para poder compararlas mejor (véase la Fig. 2-12).

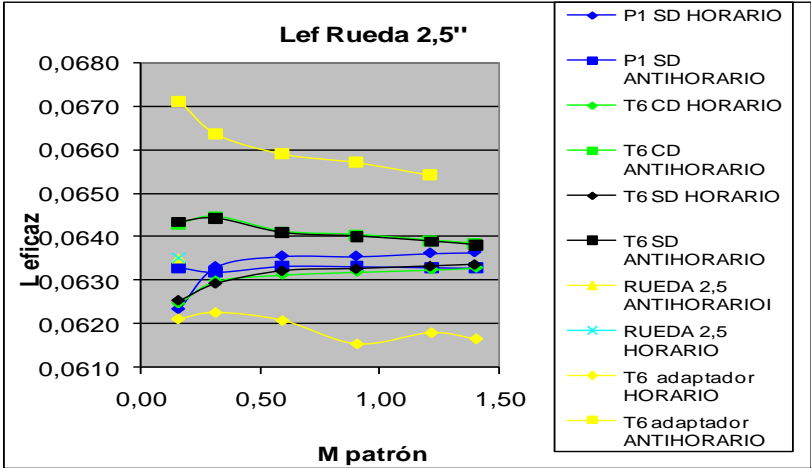


Figura 2-12. Valores de la longitud eficaz para el disco de 2.5 inch

En este gráfico se observa como para el T6, no hay diferencia al calibrar sin nada de distancia o con unos pocos centímetros de separación (de la manera que se debería calibrar), pero una vez forzada el esfuerzo de flexión aumentando la distancia bastantes centímetros, usando el adaptador (véase Fig. 2-13), si se ve muy afectado. Aunque lo más característico de esta gráfica, es ver como el P1 se comporta totalmente distinto al T6, lo que lleva a pensar que se ha de caracterizar el disco para cada transductor que se quiera usar, es decir, no se puede hacer una caracterización general. Esto significa que no se va a poder caracterizar el equipo y por tanto se va a tener que usar otras vías para continuar.

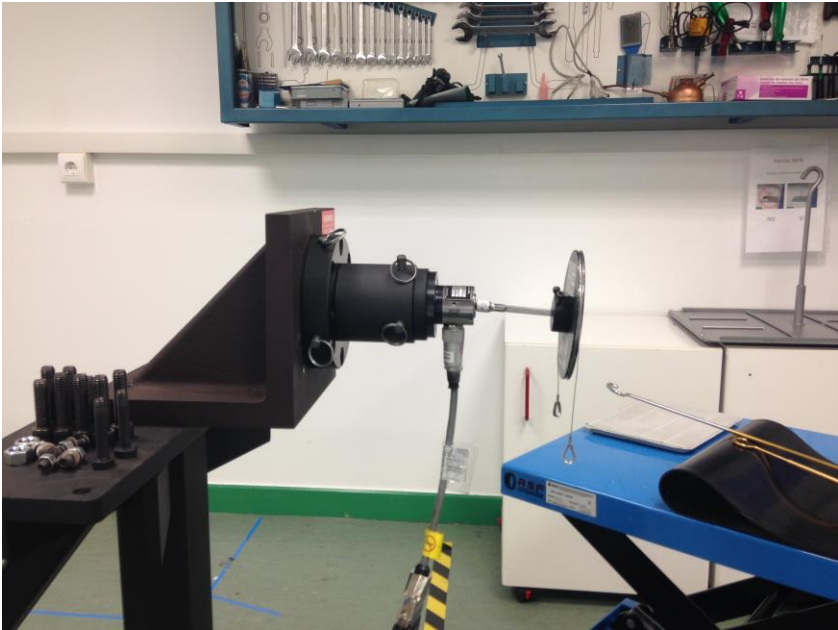


Figura 2-13. Prueba para forzar la flexión con el adaptador

3 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

Una vez observado que caracterizando los discos y brazos no se consigue un avance significativo, es más, sería mucho más tedioso y, por tanto, costoso, ya que habría que analizar cada transductor que se quiera calibrar para poder caracterizar los brazos expresamente para ellos. Esto es imposible de hacer para los equipos clientes ya que se necesitarían datos que no se suelen tener como por ejemplo los certificados de calibración de los laboratorios anteriores.

En este momento hay que tomar una decisión, para ello hay que responderse a la siguiente pregunta: ¿qué camino he de seguir? Las opciones son tres.

- Quedarse con el sistema actual, caracterizando los discos, ruedas y brazos para los transductores propios y no calibrar al exterior.
 - Esta opción presenta la ventaja de que no supondría un sobre coste a la empresa ya que todos los elementos ya se tienen disponibles.
 - La desventaja que se tiene es que al estar acreditado por ENAC, esta entidad obliga al laboratorio a participar en intercomparaciones, para las cuales no se estaría preparado, ya que no se tendría la caracterización del sistema para esos transductores, además, no daría tiempo para hacerla.
- Buscar un sistema de calibración totalmente nuevo y comercial.
 - La ventaja de esta opción es que la empresa a la que se encargue la máquina se encargaría del montaje y de la instalación.
 - La desventaja principal es el elevado coste que suponen estos bancos de calibración comerciales (entre 75 000 y 100 000 €), este coste se debe a que la precisión y exactitud deben de ser muy altas al calibrarse transductores.
- Diseñar, montar y poner a punto un sistema para mejorar lo que se tiene.
 - Esta opción tiene la ventaja que se va a usar lo ya comprado, por tanto, no se perdería la inversión primera, además de que el sobre coste que supone no es tan elevado como en la opción anterior (alrededor de 10 000 €).
 - La desventaja es que se tendría a un par de operarios centrados en esto exclusivamente, sin poder dedicarse a más partes de la empresa, además de que, al no tener experiencia en el diseño de este tipo de elementos, podrían producirse otros defectos no tenidos en cuenta.

3.1 Análisis previo al diseño

De las tres vías expuestas anteriormente, en función de las ventajas y desventajas analizadas, se decide tomar la tercera: diseñar el sistema mecánico.

En función de ello, se comienza analizando las distintas necesidades que hay que cubrir, las cuales se van a mencionar a continuación:

- Flexión
 - Es el efecto más importante y donde hay que centrarse. Según se vio en el análisis del sistema, el peso muerto colocado directamente sobre los cuadradillos de los transductores provoca una flexión la cual genera que la unidad de lectura no lea correctamente el par generado.
 - La solución para evitar este problema es biapoyar la zona que recibe el peso muerto, para que así, los apoyos absorban la carga axial y el momento flector.
 - Estos apoyos deben de permitir el giro ya que se quiere transmitir al cuadradillo el giro del eje, es decir, la torsión o par. Además, hay que tener en cuenta que estos, deben de tener un rozamiento mínimo, por no decir que no debería de existir rozamiento en el sistema.
 - Para los apoyos, se decide usar unos cojinetes, estos permiten el giro y además pueden absorber el momento flector. La decisión del tipo de cojinete se hará un poco más adelante, pero lo que, si se tiene claro, es que el rozamiento debe de ser mínimo.
- Posición del sistema
 - Hay que decidir cómo va a ser la forma del sistema, ya que la forma esta puede llegar molestar a la hora de colocar las bandejas con las masas, las cuales, como se dijo anteriormente, deben de estar totalmente libres.
 - Existen dos alternativas, una bancada externa la cual se acerque y aleje manualmente o un sistema compacto que se apoye en el banco de calibración que ya se tiene en propiedad.
 - La bancada externa constaría de una estructura externa, la cual tendría los discos colocados entre los dos rodamientos. Esto haría muy complicada la extracción de estos para poder calibrar las distancias. Otro posible inconveniente es que al estar apoyado en el suelo puede llegar a molestar a la hora de calibrar.
 - El sistema compacto constaría de una placa, sobre la cual se montaría todo el sistema y, además, estaría apoyada directamente sobre el banco de calibración como se ha comentado anteriormente, esto genera un espacio totalmente libre en la zona de calibración. El gran posible inconveniente de este sistema es que el momento flector se siga transmitiendo ya que el esquema que seguiría el sistema sería: Discos – cuadradillo del eje – cojinetes – transductor; con este esquema hay que comprobar que el transductor solo recibe torsión.

Una vez planteado las dos grandes necesidades a solventar, hay que volver a tomar una decisión, ¿qué tipo de sistema se debe escoger? Para resolver esta pregunta lo primero que hay que comprobar es si la forma de colocar los apoyos del sistema compacto es la correcta. Si es así, se elegirá este sistema, ya que es el que menos inconvenientes y más simple es de fabricar.

Para analizar la posición de los apoyos, lo primero que se debe de hacer es modelar el sistema (véase la Fig. 3-1). De izquierda a derechas se observa el que el primer apoyo equivaldría al transductor, el cual recibiría la fuerza F_a , los siguientes dos apoyos representan ambos cojinetes, los cuales reciben F_b y F_c , y el extremo en voladizo representa el lugar donde se coloca el disco o brazo con todo el peso muerto, representado con la letra P.

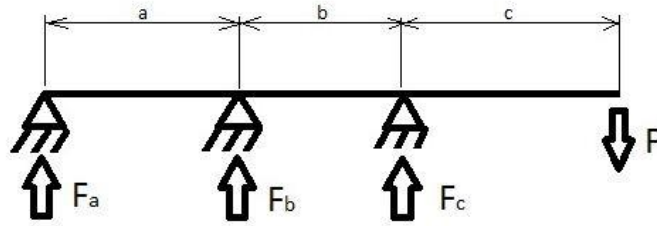


Figura 3-1. Modelo del eje y apoyos

Una vez modelado el sistema, se realizan equilibrios de momentos y fuerzas para poder calcular cual es el valor que corresponde a cada esfuerzo, esperando que el F_a sea cero.

$$\begin{aligned}\sum M_a = 0 &\rightarrow F_b a + F_c (a + b) - P (a + b + c) = 0 \\ \sum M_b = 0 &\rightarrow -F_a a + F_c b - P (b + c) = 0 \\ \sum F_{vertical} = 0 &\rightarrow F_a + F_b + F_c - P = 0\end{aligned}$$

Se comprueba que en este momento el conjunto de ecuaciones obtenido. El sistema consta de tres incógnitas (F_a , F_b y F_c) y tres ecuaciones (los dos equilibrios de momentos y el equilibrio de fuerzas verticales), por tanto, el sistema está totalmente determinado.

Una vez planteado el conjunto de ecuaciones, comprobado que el balance de incógnitas y ecuaciones es correcto, se pasa a resolverlo. Operando se llega a los siguientes resultados.

$$\begin{aligned}F_a &= 0 \\ F_b &= P \left(1 - \frac{b+c}{b}\right) \\ F_c &= P \frac{(b+c)}{b}\end{aligned}$$

De estos resultados se sacan varias conclusiones:

- El cojinete que más esfuerzo soporta es el que se sitúa en la posición más cercana al voladizo, llevándose la carga restante, en sentido contrario, el otro cojinete.
- Un dato muy importante es la distancia c , es decir, la distancia del eje que se encuentra en voladizo. Esta distancia es la que genera la variación de esfuerzos soportados para los cojinetes, además de ser la distancia que más aumenta el efecto.
- Para finalizar se observa como a la zona del transductor no le llega el efecto del peso, lo que se buscaba a la hora de colocar el biapoyo, ya que así se consigue evitar la deformación del cuadradillo.

Una vez analizado la posición de los cojinetes, la decisión que se toma es optar por el sistema compacto, que además de las ventajas dichas antes de este análisis, permite usar los discos y brazos que ya se poseen. Además de poder reutilizar estos, la forma de usarlos es similar al método antiguo, solo que, en vez de acoplarlos al cuadradillo del transductor, se acoplan al eje, el cual se encuentra biapoyado por los cojinetes. Esto va a facilitar mucho la adaptación al nuevo sistema de calibración, además, las técnicas que el operario adquirió calibrando con el procedimiento antiguo las va a poder implementar en este, haciendo que su adaptación sea más rápida.

Una vez decidido el sistema que se va a escoger, hay que seguir analizando que más inconvenientes podrían llegar a aparecer. Para ello hay que observar la forma de calibrar anterior analizando que se hacía y como se hará en el nuevo sistema.

Al hacer esto, se recuerda que lo primero que se hacía al montar el antiguo sistema de calibración era unir los discos al transductor. Este punto ya se vio en el análisis del sistema de calibración. Pero la parte que no se comentó fue como unir el transductor al eje. Esta unión es de vital importancia ya que, si el transductor no se encuentra correctamente alineado con el eje, puede producir deformaciones en el cuadradillo, las cuales se están

intentando evitar al diseñar este sistema, pero lo peor es que incluso puede llegar el punto donde la desalineación provoque daños al cuadradillo con las galgas, estropeando el transductor.

Este problema debe de ser prioritario y para solucionarlo lo que se debería tener es libertad de movimientos a la hora de situar el transductor donde se desee, es decir, debería existir tres grados de libertad, eje x, eje y y eje z.

Para conseguir esto, se puede usar una mesa de posicionamiento, es decir, las llamadas mesas de carros cruzados guiados, para esto, lo ideal es buscar que mesas hay en el mercado. Para buscar estas mesas, hay que plantearse como se quieren los grados de libertad. Observando el sistema, se comprueba que donde se va a requerir mayor libertad es en los ejes y y z, ya que es en el plano vertical donde se va a cuadrar el transductor frente al eje. El eje x solo se usa para poder acercar el instrumento al eje, haciendo que uno encaje sobre el otro.

Una vez hecho este análisis, se puede extrapolar que se deben buscar dos mesas, una lineal y otra con libertad de movimientos en un plano. Una vez encontradas estas, a través de una escuadra u otro elemento que se analizará más adelante, se colocarán ambas mesas perpendiculares, dejando la libertad de movimientos en el plano para el plano vertical.

Lo último que se observa es que los transductores se deben de calibrar en ambos sentidos, horario y antihorario, además, la calibración siempre se debe de hacer entre las patas de la bancada de calibración por seguridad.

En el sistema antiguo, esto se conseguía anclando las escuadras en la parte izquierda o derecha, pero con el nuevo sistema, el eje se encontraría fijo. Por tanto, hay que buscar un elemento para poder hacer que todo el sistema gire, este elemento no tiene por qué ser preciso, pero si tiene que asegurar que el eje se pueda colocar en el lado contrario para hacer el cambio de sentido del transductor. Otra característica que debe de tener es que debe de mantener fijo el sistema, impidiendo que se pueda mover durante la calibración.

En este momento, ya se tienen unas pautas bastante concretas que se deben de seguir a la hora de hacer el diseño. A continuación, se van a enumerar para así tener un pequeño resumen de las principales características que debe de tener el nuevo sistema. Decir también que estas características son importantes, pero no imprescindibles, es decir, si a la hora de generar el diseño no se puede implementar, se pueden cambiar sin ningún tipo de problema.

- Se escoge el sistema compacto.
- Los cojinetes se van a colocar seguidos, intentando reducir la parte del voladizo lo máximo posible.
- Los cojinetes que se elijan deben de tener un rozamiento despreciable en su funcionamiento.
- Se van a buscar unas mesas de posicionamientos para tener precisión a la hora de posicionar el transductor.
- Se debe de tener un elemento que permita el giro de todo el sistema.

3.2 Búsqueda de materiales

Esta parte se realiza buscando en internet y poniéndose en contacto con las distintas empresas. Estas empresas se han encargado de entregar los datos necesarios para saber si los elementos deseados cumplían las requerimientos que necesarias.

Los elementos que se han decidido buscar de forma comercial, son los siguientes:

- Elemento para permitir el giro
- Elementos para posicionar el transductor
- Cojinetes

3.2.1 Elemento para permitir el giro

Este elemento es bastante importante para el nuevo sistema ya que es el que va a permitir que se pueda calibrar en ambos sentidos. Aun así, este elemento no tiene por qué tener unas grandes características.

Las especificaciones de este elemento son las siguientes:

- Debe de girar de una manera cómoda.
- No debe de tardarse mucho tiempo en girar aproximadamente 180°.
- Debe de mantenerse fijo en la posición que se desee.
- No tiene por qué ser precioso.
- Debe de soportar el par que se va a generar.

El primer elemento comercial en el que se pensó fueron los platos divisores (véase la Fig. 3-2). Estos elementos se usan mucho en mecanizado y sirven para girar con precisión una pieza. Para el diseño que se está realizando vendría muy bien la robustez de estos platos ya que, al ser diseñados para el mecanizado, son capaces de soportar esfuerzos muy grandes, sobretodo de presión.

Estos elementos quizás son un poco lentos para el uso que se le daría ya que, al ser para mecanizados, se centran en la precisión. Aunque la robustez haría que cuando se fije una posición, esta se mantuviese durante toda la calibración, algo muy importante.

Al ser una pieza no muy importante se puede buscar en piezas de segunda mano, ahorrando algo de dinero. Además, su uso va a ser muy puntual haciendo que la pieza no sufra demasiado. Aun de segunda mano, los precios de estos elementos son elevados y los más baratos, pueden que tengan un radio muy pequeño para soportar todo el peso del sistema.



Figura 3-2. Plato divisor

Otra opción que se barajó, fue la de en vez de comprar el sistema, diseñarlo. Para esto se planteó que su forma constase de dos partes, una fuese una placa con un cilindro en el medio hueco y la otra pieza igual, pero con un cilindro de menor radio, los cuales al unirlos solo permitirían la libertad de giro. Este sistema tiene el gran problema de la fricción entre ambos aceros, por tanto, habría que buscar algún material deslizante y que protegiese la vida de los aceros. Otro gran problema es dimensionar el sistema para que soporte todo el peso y todo el par que va a absorber.

Siguiendo esta idea, se decide buscar algún sistema que tuviese este funcionamiento. Navegando por internet, se encuentra la empresa *Igus*®, una empresa que comienza en 1964 en un garaje de Colonia y se dedica a proveer piezas técnicas pesadas de plásticos. En 1983, comenzó a especializarse en productos propios como pueden ser sistemas de cadenas porta cables o cojinetes deslizantes. [9]

Dentro de su amplio catálogo, aparece el *iglidur*® *PRT* – *Plato giratorio*. Este elemento es un cojinete de fricción, el cual está formado por acero, el alojamiento, y un sistema propio de fricción, el cual hace que este plato giratorio no tenga que tener mantenimiento ni lubricación. Algo que aporta muchas ventajas ya que, al estar debajo de todo el sistema, si hiciese falta desmontarse para su mantenimiento, sería muy tedioso.

Lo primero que se observa son las características que aporta la web para cuando usarlos o no.

Se comprueban las características que puede cumplir el sistema que use este cojinete.

- Cuando se busca una solución lista para instalar; algo que ahorra tiempo en el montaje posterior.
- Sistema de Cojinetes robusto y resistente a la corrosión para cargas altas; el elemento soportara un gran peso y un gran par.
- Con momentos de inversión extremos; el par podría producir esto.
- Para aplicaciones sin mantenimiento ni lubricante; ya se ha comentado que esto no es necesario, pero ahora tiempo de montaje y, por tanto, coste final.
- Para velocidades bajas y medias; el elemento trabajará en estático, moviendo únicamente con el sistema descargado.

A continuación, se comprueba que realmente se pueden usar ya que, de las características que durante el trabajo no se van a tener ninguna de las características con las que el sistema deja de funcionar bien. Estas características son las siguientes:

- Para rotaciones rápidas y continuas; ya se ha comentado que el sistema trabajará en estático.
- Con temperaturas por encima de los 180°C; la temperatura de trabajo será aproximadamente unos 20°.
- Cuando, bajo altas cargas, se dispone sólo de una fuerza de accionamiento reducida; esto se evita al trabajar en estático, el sistema no tiene que tener fuerza de accionamiento.
- Para mayores exigencias a nivel de redondez y de precisión; una de las principales características que no debía porque tener el elemento, es la precisión y redondez.

Una vez visto esto, se pasa a comprobar que modelo es el que mejor cumple los requerimientos de par soportado y fuerza, además, de ver la forma constructiva de este cojinete para comprobar si hace falta algún elemento extra y mirar el sistema de anclado. Para comprobar estas características, hay que buscar en su web el catálogo de los diferentes modelos de plato divisor y ver cuál es el que mejor se engloba a lo que se pide.

En el catálogo aparece una tabla con todas las propiedades de cada modelo (véase la tabla 3-1). De las propiedades que se muestran, las que interesan para la selección del tamaño correcto son la carga máxima axial estática y, sobre todo, el par máximo admitido.

Properties PRT-01-	Unit	-20	-30	-50	-60	-100	-150	-200	-300
Weight	kg	0.2	0.4	1.0	1.1	1.3	2.2	3.2	7.6
Max. axial load, static	N	15,000	27,000	40,000	50,000	55,000	80,000	100,000	150,000
Max. axial load, dynamic	N	4,000	7,000	10,000	15,000	16,000	25,000	30,000	90,000
Max. radial load, static	N	2,300	5,000	8,000	10,000	16,000	25,000	35,000	45,000
Max. radial load, dynamic	N	600	1,500	2,500	3,000	5,000	8,000	10,000	27,000
Max. rotat. speed dry running	1/min	300	250	200	200	150	100	80	50
Rigidity, axial	N/µm	80	100	250	300	400	450	500	500
Rigidity, radial	N/µm	10	50	60	65	65	65	65	65
Max. perm. tilting moment	Nm	100	200	600	800	1,500	2,000	3,800	5,000

Tabla 3-1. Características de los distintos platos divisores

Para el cálculo de la máxima carga axial, habría que llevar el sistema al límite máximo. Para esto se debe de sumar el peso del sistema y la masa que se le añade a la hora de calibración.

- Peso del sistema: no se cree que supere los 70 kg.
- Máximo peso del sistema: contando el brazo de más peso con la suma de masa total, aproximadamente unos 300 kg.

$$Carga\ máxima\ axial\ estática = (70 + 300) * 10 = 3\ 700\ N$$

Ahora se comprueba el máximo par permitido. Sabiendo que el par máximo que soporta el sistema es el par

máximo que se calibra, este es 2 700 Nm que por seguridad se mayora, llegando a 3 000 Nm.

Con estos dos datos, ya se puede elegir el tamaño del plato giratorio. Para elegirlo se observa como el primer modelo que cumple con ambos requisitos es el 200 (véase la Fig. 3-3).



Figura 3-3. Plato giratorio

Este elemento tiene como características un diámetro exterior de 300 mm, un peso de 3.2 kg, un diámetro interno de 200 mm y muchas más características (véase la Fig. 19 y la tabla 7).

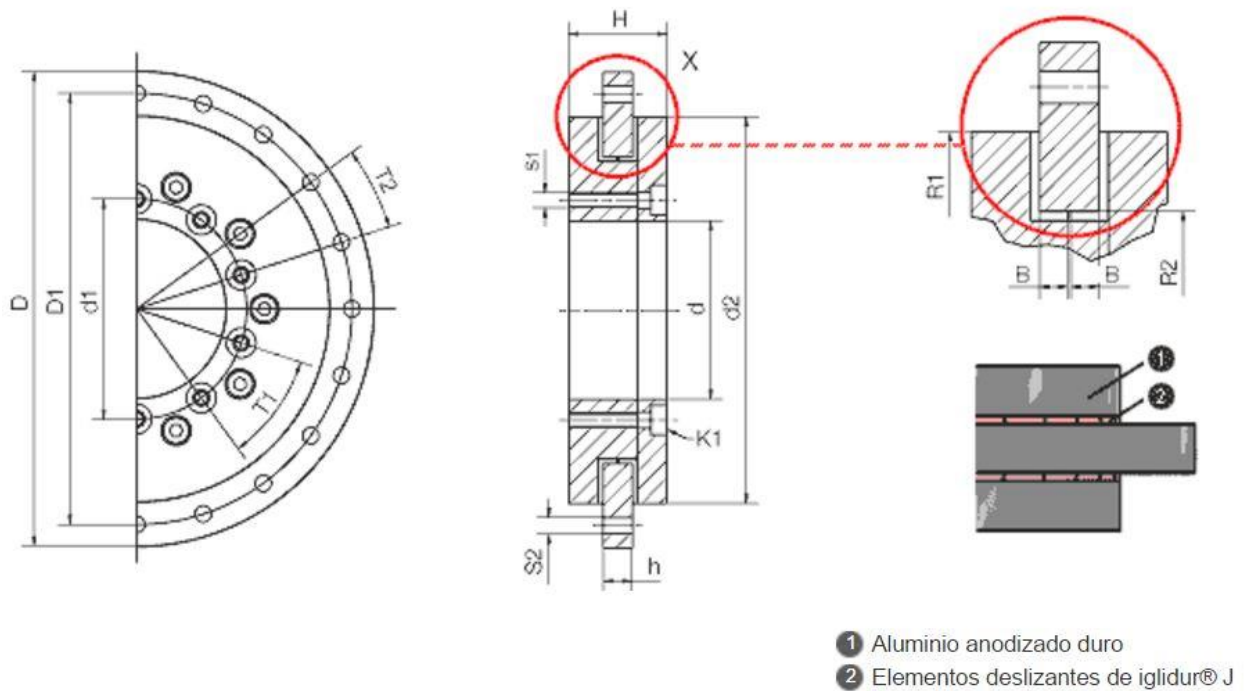


Figura 3-4. Planos del plato giratorio

Part Number	D*	D1	d1	d	d2 ±0.2	H	h	T1	T2	S1	S2	K1 for screw	R1	R2	B
PRT-01-20	80	70	31	20	60	24	8	3 x 120°	6 x 60°	M4	4.5	DIN 7984 M4	30	20	3.5
PRT-01-30	100	91	42.5	30	82	29	10	8 x 45°	8 x 45°	M4	4.5	DIN 7984 M4	41	29	4.5
PRT-01-50	150	135	65	50	120	33	10	8 x 45°	16 x 22.5°	M6	6.6	DIN 912 M6	11.4	33	11.6
PRT-01-60	160	145	74	60	130	33	10	10 x 36°	20 x 18°	M5	5.5	DIN 912 M5	65	51.5	4.5
PRT-01-100	185	170	112	100	160	34	12	12 x 30°	16 x 22.5°	M5	5.5	DIN 912 M5	80	69	5.5
PRT-01-150	250	235	165	150	220	35	12	12 x 30°	16 x 22.5°	M5	5.5	DIN 912 M5	110	96.5	5.5
PRT-01-200	300	285	215	200	274	38	15	12 x 30°	16 x 22.5°	M6	6.6	DIN 912 M6	137	124	7.0
PRT-01-300	450	430	320	300	410	42	15	12 x 30°	16 x 22.5°	M8	9.0	DIN 7984 M8	205	186.6	7.0

Tabla 3-2. Datos dimensionales del plato giratorio

Como se observa en el plano, el plato giratorio consta de dos elementos entre los cuales se produce el giro relativo, es decir, el plato se puede fijar con el anillo exterior y que rote el resto o se puede fijar el bloque y hacer que el anillo sea lo que gire.

Para la aplicación que aquí se tiene, se necesita anclar el disco exterior y que lo que gire sea el cuerpo, ya que es una placa plana lo que se va a situar sobre el plato. Para poder anclar esto se observa en el catálogo que la propia empresa tiene, tienen distanciadores (véase la Fig. 3-5) por tanto, se decide comprar uno de estos también, para así ahorrar el tiempo en el diseño y evitar los posibles problemas de tolerancias entre el distanciador y el plato giratorio.



Figura 3-5. Anillo distanciador

Por tanto, ya está decidido el plato giratorio que se va a recoger, además de incluir el distanciador en la compra. Otra de las cosas que se deciden es no usar ningún elemento como freno ya que, el elemento permite el giro, pero tiene mucha fricción y se decide esperar a ver si con el mismo peso que va a tener el sistema se queda anclado, sino es así, pues se diseñará algún elemento para bloquear el cojinete cuando se desee.

3.2.2 Elementos de posicionamiento

En este apartado, se va a hablar sobre las características del sistema de posicionamiento que se ha decidido comprar. Para comenzar, se recuerda por qué es tan importante este elemento. Como ya se dijo al principio, el sistema que se está diseñando tiene como función principal eliminar la flexión del cuadradillo, efecto que provoca que el cuadradillo del transductor se deforme, lo que genera que la lectura errónea.

Si se mantiene una sola posición para colocar el transductor, es decir, si no se le da libertad a la posición de anclaje, puede provocar que el eje y el cuadradillo no estén alineados. Esta falta de alineación provocaría una deformación.

Para darle la libertad de movimientos necesaria, se decide buscar unas mesas posicionales. Para un buen posicionamiento del transductor, es necesario tener como mínimo 3 grados de libertad. El transductor debería

poder moverse sin ninguna restricción por el plano vertical y además, debería poder moverse linealmente en el plano horizontal, pudiendo acercarse al eje o separarse.

Investigando por internet, se observa como una sola mesa con todas estas características es muy difícil de encontrar, por tanto, se decide separar los grados de libertad. Por un lado se buscará una mesa con libertad de movimientos en el plano y otra con libertad de movimiento lineal.

Analizando los distintos tipos de transductores que se tienen y que existen en el mercado, se deciden unas características mínimas. Comprobando los tamaños, se llega a decidir que como mínimo el plano tenga una variación de ± 25 mm y el eje lineal una variación de ± 50 mm, es decir, la mesa que posicione el plano debe de tener unas carreras de 50 mm en ambos ejes y la lineal una carrera de 100 mm.

Después de ver distintas empresas y productos, se llega a la compañía *Bazus SA*, una compañía fundada en 1810. La cual ha ido evolucionando y creciendo en la forma de trabajar el hierro, pasando de ser forjadores, herreros y fabricantes de maquinaria, a ser una empresa líder en la fabricación de mesas de coordenadas. [10]

Esta empresa tiene un catálogo muy amplio en este tipo de mesas, por lo que se decide usar la CP1 para el eje lineal y el MF-mini-100 para el plano, esta decisión se basa en las siguientes características:

- Para el CP1
 - Recorrido en el eje x: 110 mm
 - Resolución: 0.05 mm
 - Peso máximo: 105 kg
 - Máxima presión de trabajo: 700 kg

Como se puede observar, esta mesa lineal es la que cumple los requisitos sin pasarse, es decir, es la mínima mesa lineal que se podría comprar de este fabricante. El punto más restrictivo que se tiene a la hora de decidir que mesa escoger es el recorrido, ya que la resolución con que sea pequeña es válida y la presión de trabajo va a ser unos 300 kg, estando mayorada, y el peso en descarga no va a ser mayor de 80 kg.

- Para el MF-100-mini
 - Recorrido en el eje x e y: 100 mm
 - Resolución: 0.025 mm
 - Peso máximo: 40 kg
 - Máxima presión de trabajo: 250 kg

Al igual que para la CP1, esta mesa de carros cruzados es la mínima del catálogo de la empresa que cumple todos los requisitos necesarios. Es una mesa con el recorrido mínimo que se desea, la resolución es bastante alta, algo que va a permitir que el posicionamiento sea bastante bueno, el peso máximo que puede soportar no afecta ya que, esta mesa se colocará en vertical y no tendrá nada encima. La presión de trabajo tenderá a cero, ya que, ahí irá colocado el transductor, por tanto, se evitará que le llegue ninguna fuerza.

Una vez analizadas todas las características dadas por el catálogo, se observa como en ningún lugar indica el par que puede resistir estas mesas. Por tanto, se decide llamar a la empresa, contarle la aplicación que se está diseñando y preguntarle si sería posible el montaje de las mesas como se desea, es decir, la lineal en horizontal y la de dos ejes en vertical, unidas por una escuadra y, además, se le pregunta si estas mesas aguantarían un par de 3 000 Nm. La respuesta de la empresa fue habían simulado lo que se le había contado y que la forma con la que se desea montar es válida, pero que para aguantar ese par se deberían cambiar a las mesas posicionales CP2 (véase la Fig. 3-6) y MF-1 (véase la Fig. 3-7), además, propone la forma para diseñar la escuadra con los espesores que han simulado.

Las características de estas mesas de carros cruzados, las cuales se deciden adquirir finalmente, son las siguientes:

- Para el CP2
 - Recorrido en el eje x: 170 mm
 - Resolución: 0.05 mm

- Peso máximo: 270 kg
- Máxima presión de trabajo: 900 kg
- Para el MF-1
 - Recorrido en el eje x: 190 mm
 - Recorrido en el eje y: 130 mm
 - Resolución: 0.05 mm
 - Peso máximo: 105 kg
 - Máxima presión de trabajo: 700 kg

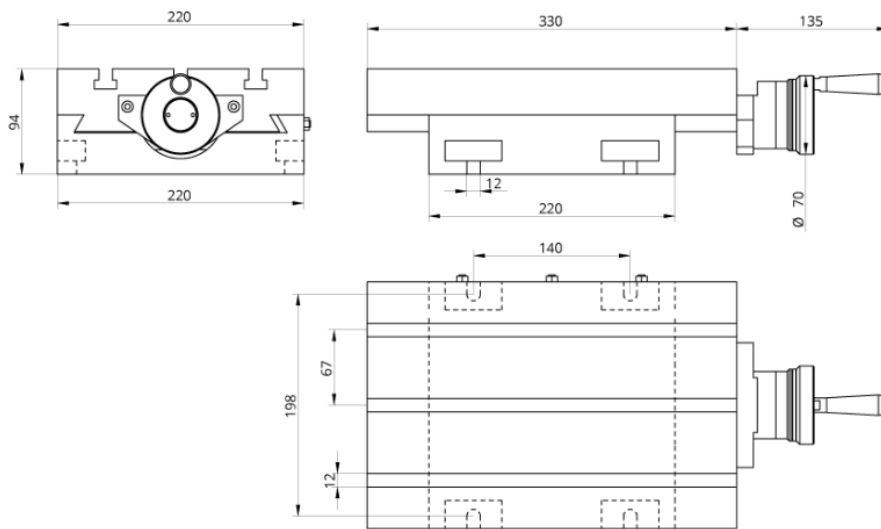


Figura 3-6. Mesa de posicionamiento CP2

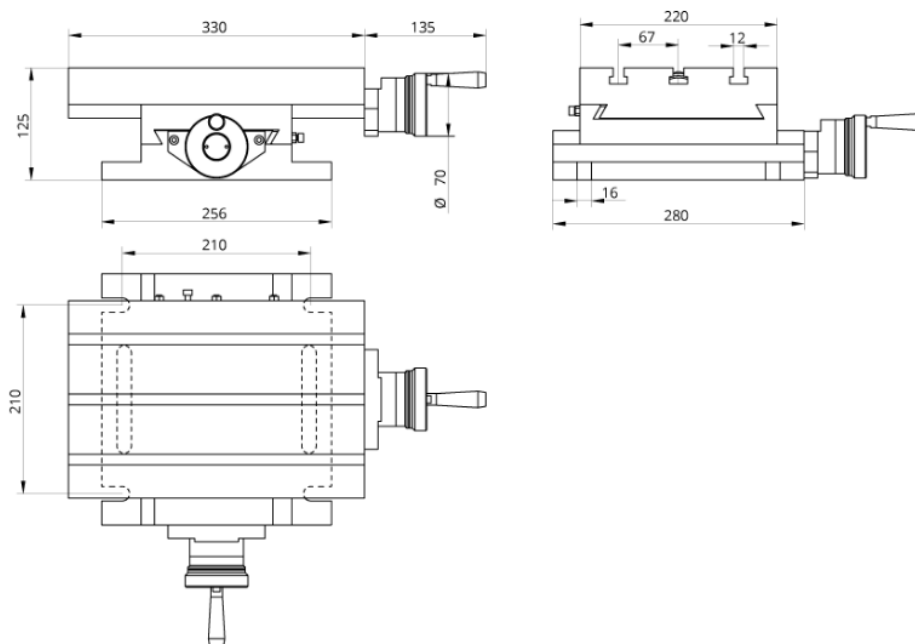


Figura 3-7. Mesa de posicionamiento MF-1

3.2.3 Cálculo y elección de cojinetes

Los cojinetes son los elementos encargados de hacer que, aunque el eje este apoyado, exista el giro. Existen dos tipos de cojinetes, los de fricción y los rodamientos. Para el sistema que se está diseñando, habrá que buscar aquel con el que se obtenga menor rozamiento pero a la vez sea economicamente adecuado.

Dentro de los cojinetes de fricción, los que valdrían para el sistema que se diseña por su rozamiento casi nulo serían los neumáticos. Estos cojinetes no son fáciles de encontrar y su funcionamiento consiste en un cilindro concéntrico a otro con un movimiento relativo producido por una capa de aire comprimido que hay entre ellos. En las empresas se les suele conocer como rodamientos de superprecisión. Estos rodamientos son muy caros y, a menos que no se consiga un rozamiento despreciable o casi despreciable en el resto, no se comprarán por su alto precio.

Una vez descartado ese tipo de cojinetes, se pasa a analizar los rodamientos. Lo primero que se debe de observar es el coeficiente de fricción que tiene cada tipo de rodamiento (véase la tabla 3-3)

Tipo de Rodamiento	Coefficiente de fricción (μ)
Rodamiento de bolas autoalineantes	0.0010
Rodamientos de rodillos cilíndricos con rodillos cortos guiados	0.0011
Rodamientos de empuje de bolas	0.0013
Rodamientos de bolas de una sola fila con camino profundo	0.0015
Rodamientos de rodillos cónicos y esféricos con rodillos guiados	0.0018
Para rodamientos de agujas sin jaula	0.0045

Tabla 3-3. Coeficientes de fricción

A la vista de estos coeficientes de fricción [11], se decide analizar en profundidad los rodamientos de bolas autoalineantes. Viendo las distintas compañías que se dedican a vender rodamientos, se elige la marca SKF. Esta compañía proveedora de tecnológica, es líder el mundo desde 1907. Evolucionando constante las tecnologías para utilizarla en la fabricación de productos con muchas ventajas competitivas. Algunos de los productos que se dedican a fabricar son: Rodamientos y unidades de rodamientos, sellos, mecatrónica... [12]

Una vez decidido el tipo de rodamiento y la marca, con ayuda del catálogo se calcula el rozamiento que va a tener el rodamiento. Para esto, se utilizan dos métodos distintos. El primero de ellos es una forma aproximada, la cual es una buena estimación si se cumplen las siguientes características:

- Buena lubricación
- Condiciones de operación normales
- $P=0.1 C$

Este sistema, va a estar bien lubricado pero las condiciones de operación no van a ser normales ya que, el sistema va a sufrir un movimiento cuasiestático, sin llegar a dar una revolución completa. Aun así, la fórmula para calcular este momento friccional es:

$$M = 0.5 \cdot d \cdot P \cdot \mu$$

Al no ser muy exacta esta la primera forma, se pasa a cuantificar el momento friccional del rodamiento mediante la segunda forma, la cual es más exhaustiva. Esta consiste en dividir el momento friccional en cuatro partes:

- Rodadura
- Deslizamiento
- Lubricación

- Por la junta

Antes se ha dicho que el movimiento que va a tener el rodamiento es cuasiestático. Con menos de una revolución en cada movimiento, por tanto, se va a suponer que n , el número de vueltas que da el eje, va a ser 0. Con esto, se obtiene que la fricción por rodadura y lubricación sean 0 ya que, dependen del número de vueltas a las que gira el rodamiento. El factor más importante de los 4 y que introduce más momento de fricción es el producido por la junta, como se quiere reducir este momento, lo que se decide es comprar un rodamiento sin junta, convirtiendo este valor en 0 también. Con esto, el momento de fricción se convierte en el momento producido por el deslizamiento.

$$M = M_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl} = S1 \cdot d_m^{-0.12} \cdot ((F_r + F_g)^{\frac{4}{3}} + S2 * F_a^{\frac{4}{3}})$$

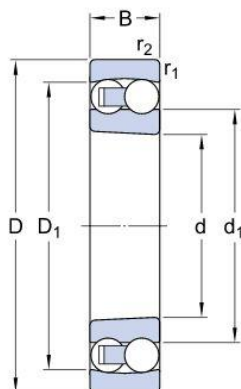
De donde los valores de S1 y S2 los siguientes (véase la tabla 3-4).

Bearing series	Constantes geométricas			Sliding frictional constant		
	R1	R2	R3	S1	S2	S3
12	3,25E-07	6,51	2,43E-12	4,36E-03	9,33	2,43E-12
13	3,11E-07	5,76	3,52E-12	5,76E-03	8,03	3,52E-12
22	3,13E-07	5,54	3,12E-12	5,58E-03	6,6	3,12E-12
23	3,11E-07	3,87	5,41E-12	0,01	4,35	5,41E-12
112	3,25E-07	6,16	2,48E-12	4,33E-03	8,44	2,48E-12
130	2,39E-07	5,81	1,10E-12	7,25E-03	7,98	1,10E-12
139	2,44E-07	7,96	5,63E-13	4,51E-03	12,11	5,63E-13

Tabla 3-4. Valores de las constantes

Una vez planteado el procedimiento de cálculo para el momento friccional, se tiene que elegir el rodamiento que se quiere y analizarlo. El tipo de rodamiento que se va a escoger es el *Self-aligning ball bearing*. Para decidir la serie, hay que tener un diámetro de un eje. Aunque todavía no se ha visto el porqué, el eje tendrá 40 mm y comprobando la carga estática que debe de soportar, el cual es el peso en parado que puede aguantar el rodamiento, se decide por el rodamiento 2308 EKTN9 (véase la Fig. 3-8). Este rodamiento tiene un coeficiente de rozamiento de 0.0010, diámetro interior de 40 mm y diámetro exterior de 90 mm. También se puede aproximar la carga P la cual es $300 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 3 \text{ 000 N}$, la cual es la fuerza radial ya que, el rodamiento no va a sufrir fuerza axial.

Con todos estos datos, se comprueba que $M = 0.03933 \text{ Nm}$ variando la P, así se simularía otros rangos de par, se comprueba que el rozamiento que se obtiene es aproximadamente un quinto de la incertidumbre que se permite, por tanto, se da por bueno este rodamiento.



d	40	mm
D	90	mm
B	33	mm
d ₁	≈ 53.75	mm
D ₁	≈ 77.8	mm
r _{1,2}	min. 1.5	mm

Tapered bore, taper 1:12

Figura 3-8. Dimensiones del rodamiento 2308 EKTN9

Una vez decidido el rodamiento hay que buscar una forma de apoyarlo de manera cómoda, por lo tanto, se buscan los soportes que se deben de utilizar, además, se comprueban los adaptadores que hay que pedir ya que, el rodamiento elegido es cónico (más cómodo de montar) y los anillos fijadores, para evitar el movimiento lineal del eje, estos anillos solo se montarán en uno de los dos rodamientos ya que, al eliminar el movimiento en uno, se elimina automáticamente en el siguiente.

Resumiendo todo, el pedido que habría que realizar sería:

- 2 rodamientos 2308 EKTN9
- 2 soportes SE 510-608
- 2 adaptadores H 2308
- 2 anillos fijadores FRB 4/90

3.3 Diseño de piezas

En este apartado se va a diseñar todas las piezas de las que está compuesta el sistema mecánico. Para realizar los diseños se ha utilizado el programa comercial Catia V5. Con este programa se ha podido realizar el diseño individual de cada elemento y el montaje final, comprobando que los agujeros para los tornillos coinciden en cada placa y que el montaje se podría realizar.

Los elementos comerciales anteriormente comentados se consiguieron en formato CAD, ya sea desde su propia web o pidiéndoselos directamente a la empresa. Con estos archivos, se puede asegurar la implementación de estos elementos al diseño.

Una vez diseñadas todas las piezas y montadas, se pasa a sacar los planos. Con estos planos, se pueden fabricar cada elemento. Las piezas se van a fabricar por mecanizado, además, la empresa encargada de la fabricación va a ir montando cada elemento para así poder corregir los fallos producidos en el montaje o en la propia fabricación.

El material que se decide utilizar es el acero F-114 o también llamado SAE/AISI 1045. Este material es un acero al carbono, está creado para piezas de resistencia media y es apto para el temple superficial. Algunas características mecánicas son las siguientes [13]:

- Dureza: 163 HB
- Límite elástico: 310 MPa
- Tensión de rotura: 565 MPa
- Módulo de Young: 200 GPa
- Maquinabilidad: 57%

Las piezas se van a nombrar para poder llevar un mejor control, además de una mejor organización. Se van a tener que hacer 12 piezas, denominadas desde el E00 hasta el E12. En todas las piezas se ha tenido en cuenta que no se deben dejar ángulos vivos, por tanto, en todas estas piezas se han diseñado con el pensamiento de que los bordes se van a achaflanar. Otro rasgo importante es evitar los concentradores de tensiones, para esto en cada ángulo se le va a poner un radio de acuerdo, eliminando estos concentradores de tensiones y facilitando el mecanizado.

La primera pieza que se va a diseñar es el eje, esta es la denominada E00 (véase la Fig. 3-9). Ya se dijo en la selección del rodamiento que el diámetro de este eje iba a ser de 40 mm, esto es porque en los extremos de este eje se van a convertir en un cuadradillo de 1 inch, es decir, 25,4 mm de lado.

Este eje se va a pedir que sea templado y pavonado. Con esto se aumenta su dureza, resistencia y durabilidad frente al tiempo y los esfuerzos. Además de que debe tener buena redondez para poder encajar en los rodamientos de manera correcta.

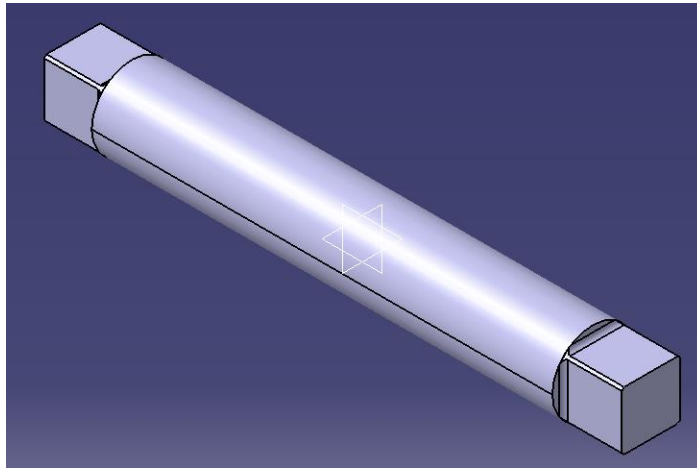


Figura 3-9. Pieza E00

El cuerpo del eje tiene una longitud de 200 mm, además los extremos son cuadrados de 1 inch, es decir, miden 25.4 x 25.4 x 25.4 mm. Esta longitud está calculada sumando las distancias que hay que solventar al estar montado el eje en el rodamiento. A esa longitud, se le debe de sumar lo mínimo por el lado que se va a realizar la calibración ya que, la zona está en voladizo. Por el otro lado, es decir, el lado que va al transductor, la longitud que se le ponga no afecta ya que, ya se vio que en este tramo se transmite únicamente la torsión.

La pieza E01 (véase la Fig. 3-10) es un disco el cual se va a usar para fijar los adaptadores que se usan para anclar el transductor. Esta pieza únicamente se ha copiado en Catia ya que, ya se tenía. Para esto, se ha medido usando el pie de rey para los grosores y diámetros interiores y exteriores, y la máquina de tres coordenadas para los diámetros de los agujeros de los tornillos y su posición

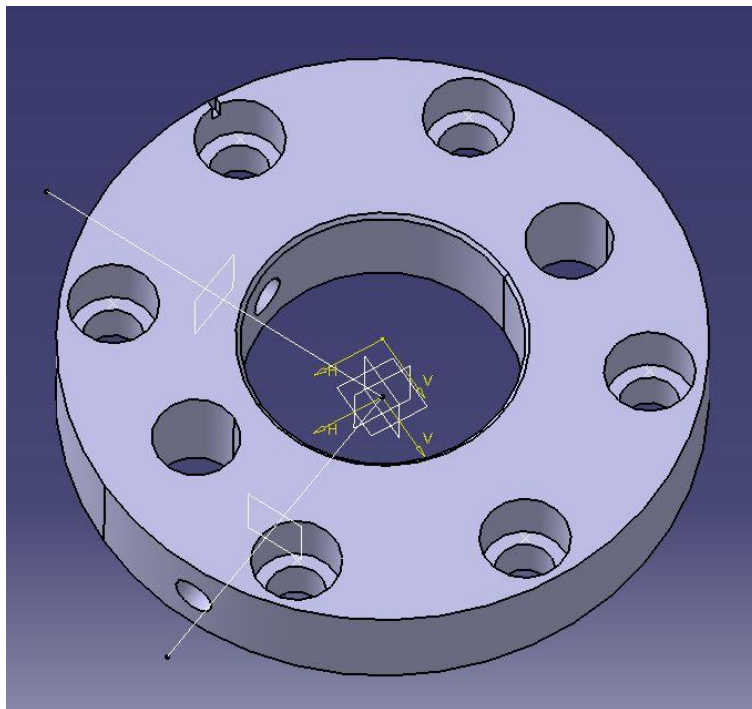


Figura 3-10. Pieza E01

La siguiente pieza que se diseña es un adaptador circular (véase la Fig. 3-11). Esta pieza permite que al transductor se le haga un giro, pudiendo así calibrarlo en varias posiciones de manera más cómoda.

Para diseñar esta pieza, se ha tomado como referencia otra pieza que ya se tenía, copiando las dimensiones y espesores. Esta pieza se va a pedir que se temple y pavone, para, al igual que el eje, sea más duradera y resistente en el tiempo.

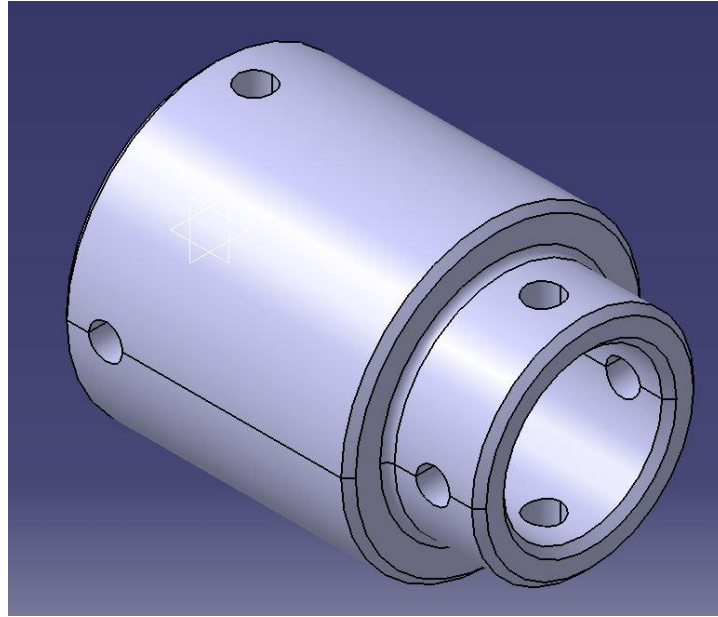


Figura 3-11. Pieza E02

La pieza que se diseña a continuación es para duplicar otra de las piezas que ya se tienen, esta pieza es la E03 (véase la Fig. 3-12). Esta pieza es un adaptador con una superficie plana y otra circular. La forma más cómoda de fabricarla es, por un lado, mecanizando la zona circular y por otro, la plana y soldando ambas.

Este elemento facilita la cogida del transductor. Se usa como pieza intermedia y se conecta a la pieza E02, transformando la zona circular en una zona plana donde anclar el transductor.

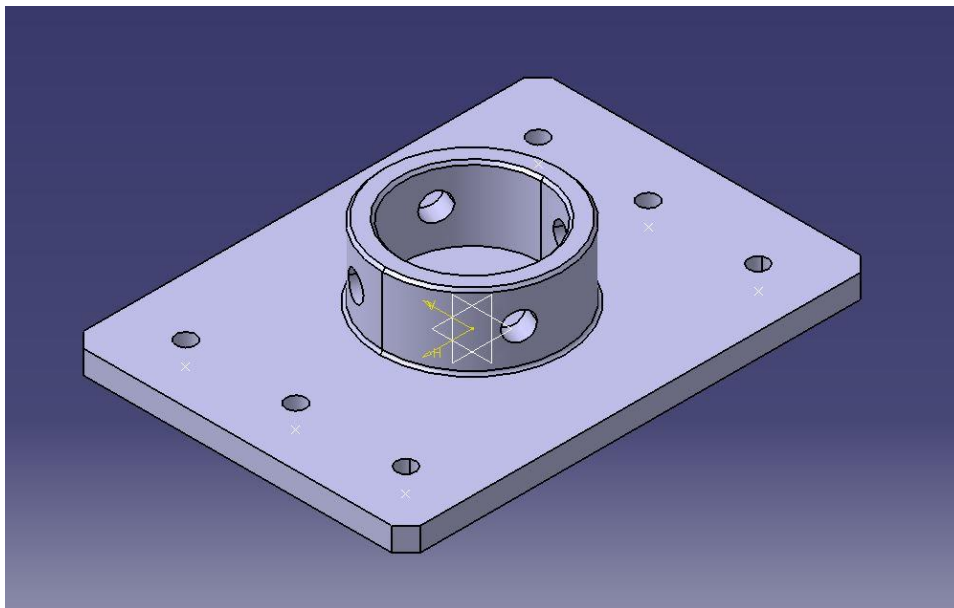


Figura 3-12. Pieza E03

Se ha dicho que la pieza E03 es una pieza intermedia, esto es porque a esa pieza se le va a anclar una placa taladrada (véase la Fig. 3-13), la pieza E04. Esta pieza se ha creado para que pueda ser taladrada según vayan requiriendo los distintos tipos de transductores que se vayan a calibrar. Cuando esta pieza no se pueda taladrar más simplemente hay que cambiarla, siendo más fácil y sobretodo económico fabricar la pieza E04 que por ejemplo la E03.

El espesor de esta placa viene dado por la cabeza del tornillo que lo ancla a la E03, la cual no puede sobresalir. Además, esta pieza debe de tener las caras lo más paralelas posibles para que a la hora de cuadrar el transductor y el eje sea lo más sencillo posible.

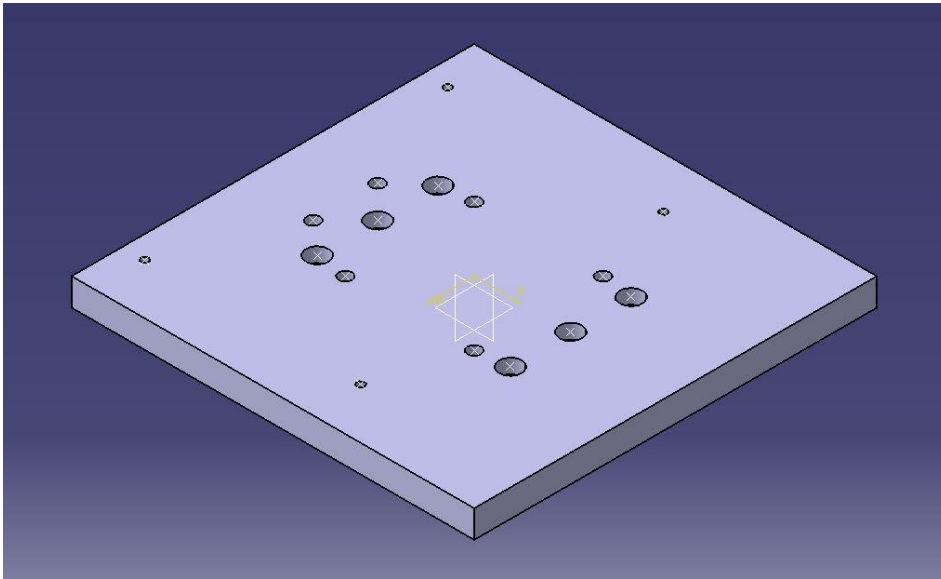


Figura 3-13. Pieza E04

La pieza E05 (véase la Fig. 3-14) es la pieza que se usa para anclar el disco (la pieza E01) con los carros cruzados. Esta placa tiene 12 agujeros para poder aguantar bien la placa a los carros cruzados, además de los taladros para poder anclar el disco a la placa. El espesor de la placa viene definido por la superficie de los tornillos que van a estar roscados en la placa, siendo ese trozo, la zona que va a soportar todos los esfuerzos que le lleguen.

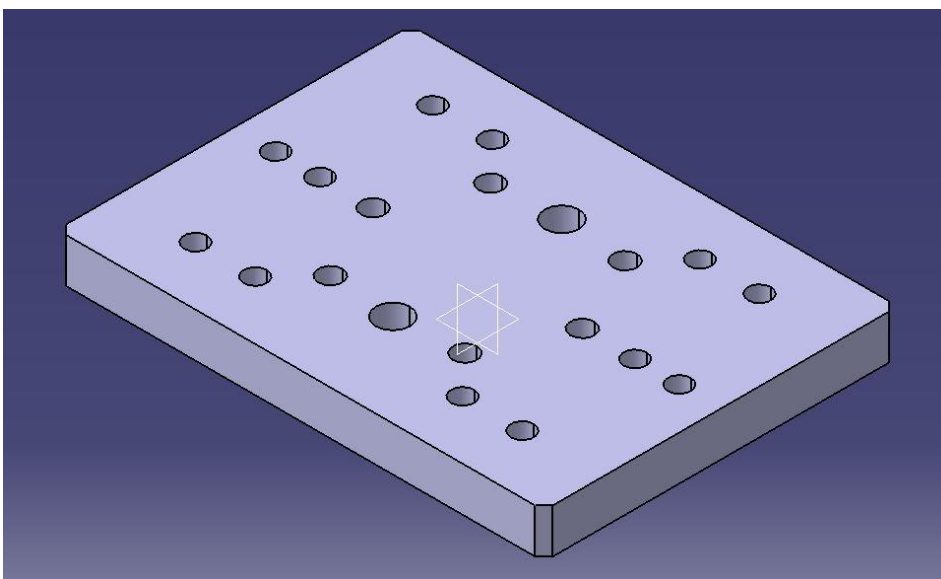


Figura 3-14. Pieza E05

La pieza E06 (véase la Fig. 3-15), es la pieza con más complejidad de fabricación y diseño. Esta pieza se usa como adaptador. Iría anclado directamente sobre el E02 y a este se le unirían los transductores tipo cuadradillos. Por esa razón lleva una zona macho y otra hembra, por si el transductor tiene salida macho o hembra. Además, se le colocan unos agujeros para fijar este adaptador con los pernos rápidos y la superficie que sobresale es un tope para que la pieza no pueda entrar más de lo que debe a la hora de la unión.

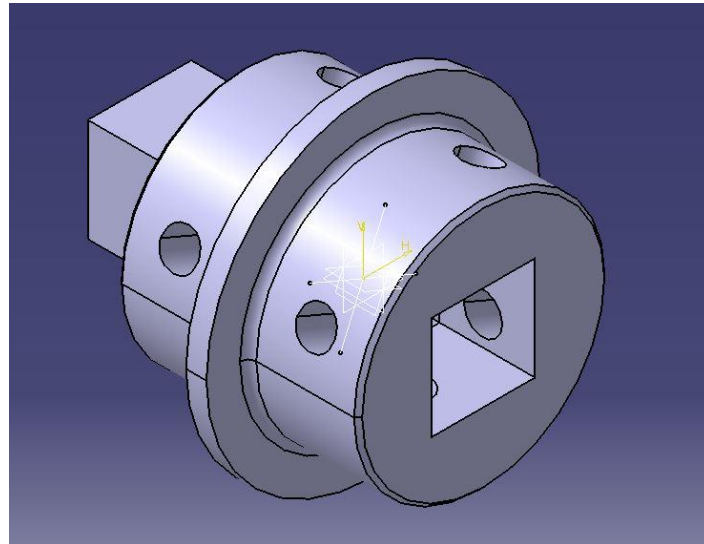


Figura 3-15. Pieza E06

La pieza E07 se usa para colocar los rodamientos a la altura que se desee. Para hacer esto, se ha escogido la forma que se cree que es más simple (véase la Fig. 3-16). Las dimensiones de esta pieza se han calculado observando las medidas del soporte de los rodamientos, optimizando la superficie donde se unen cada uno. La altura de esta pieza se ha calculado de tal forma que quede el eje aproximadamente en el centro de la mesa de posición vertical.

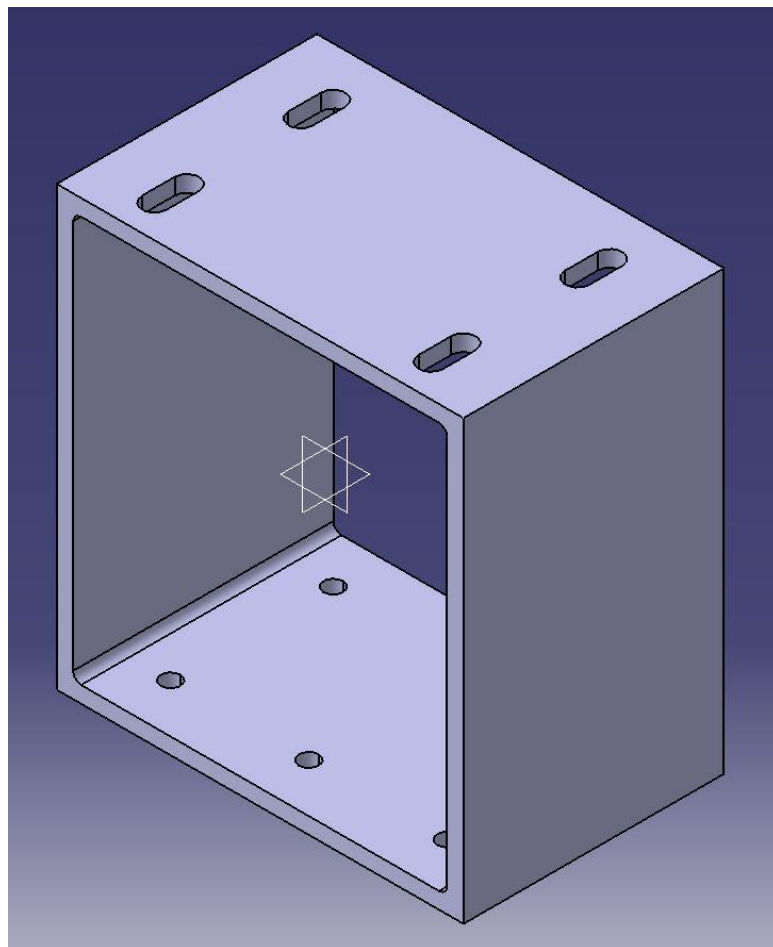


Figura 3-16. Pieza E07

Como se dijo en el apartado 3.2.2 Elementos de posicionamiento, la solución que se iba a optar para colocar una mesa a 90° de la otra, era diseñar una escuadra, la pieza E08 (véase la Fig. 3-17). Esta pieza consta de dos nervios

para ayudar a soportar los esfuerzos. El ancho de la escuadra lo marca las mesas de carros cruzados ya que, para poder apoyarlas bien, esta distancia tiene que ser como mínimo el valor de la mesa más ancha, la cual es la MF-1 con 280 mm. La altura de la cara de vertical, se toma al montar en el programa la mesa y ver la altura para la cual será más cómoda de trabajar.

Esta pieza tiene un gran requerimiento, la perpendicularidad, por tanto, se pide a la empresa de mecanizado que pongan especial empeño en la planitud de las caras y que cumplan los 90° . Esta pieza está basada en la simulación que hicieron en la empresa de carros cruzados, por tanto, se entiende que el diseño va a soportar los esfuerzos de par que le van a llegar.

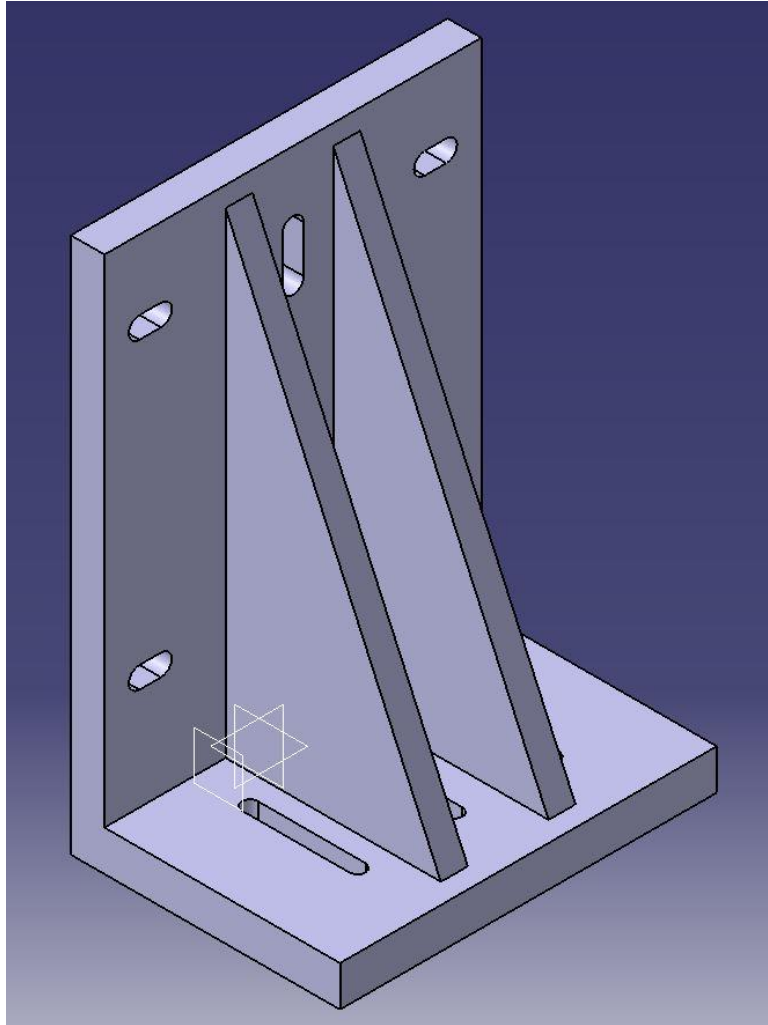


Figura 3-17. Pieza E08

La pieza que se comenta a continuación, la E09, es una placa plana taladrada (véase la Fig. 3-18). Esta placa se va a situar encima del plato divisor y va a ser donde se anclan el resto de piezas. El tamaño de esta pieza viene dado por los elementos que se le van a colocar encima y abajo. El espesor se decide mirando los tornillos, ya que las cabezas de los tornillos que lo unen al plato divisor no deben de sobresalir para así no molestar a ninguno de los elementos de la parte superior.

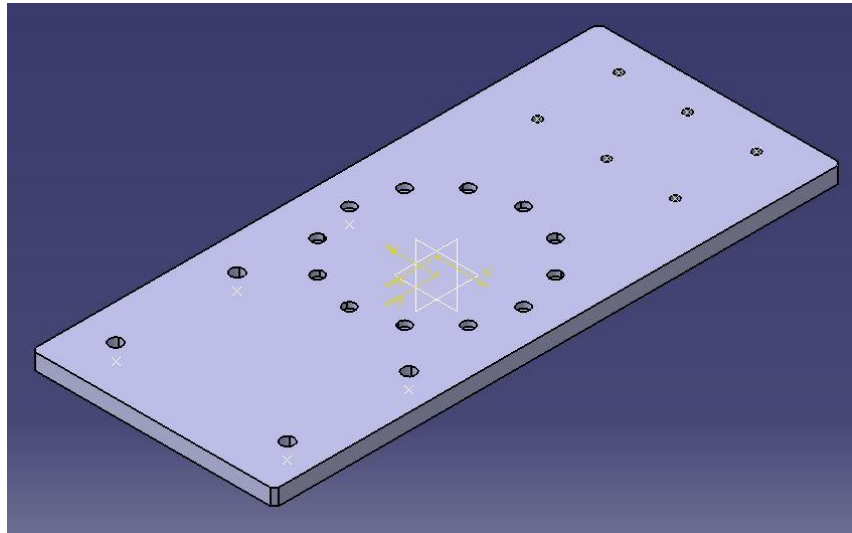


Figura 3-18 Pieza E09

Un requisito muy importante que debe de cumplir esta pieza es que la deflexión en ella debe de ser cero o insignificante. Esta característica se necesita porque si esta placa se doblase, el eje no estaría perpendicular al plano de los carros cruzados, impidiendo una calibración correcta. Para comprobar a grosso modo que con ese espesor esto se cumple se realiza una simulación de la placa.

Para la simulación, se va a suponer que se tiene una placa con un hueco circular. Para forzar el efecto al máximo, se supone que el hueco, el cual se empotrará, va a estar a un extremo, teniendo en el otro una carga de 3000 N (véase la Fig. 3-19), es decir, unos 300 kg que es, de manera mayorada, lo máximo que se va a cargar. La simulación se realizará con el programa comercial Ansys.

Una vez montado todo el modelo, es decir, introducidas todas las características geométricas, condiciones de contorno, materiales... Se simula, obteniendo una deformación en el extremo de 0.6 mm (véase la Fig. 3-20). Por tanto, se puede decir que el desplazamiento de la placa real va a ser ínfimo y se puede suponer 0.

Para acabar la comprobación de la placa, se analizan las tensiones (véase la Fig. 3-21) ya que, si en este modelo no se llega a superar el límite elástico, en el original tampoco se superará. Mirando la solución que genera Ansys, se comprueba como el valor máximo es de aproximadamente 45 MPa, muy inferior a los 310 MPa de límite elástico.

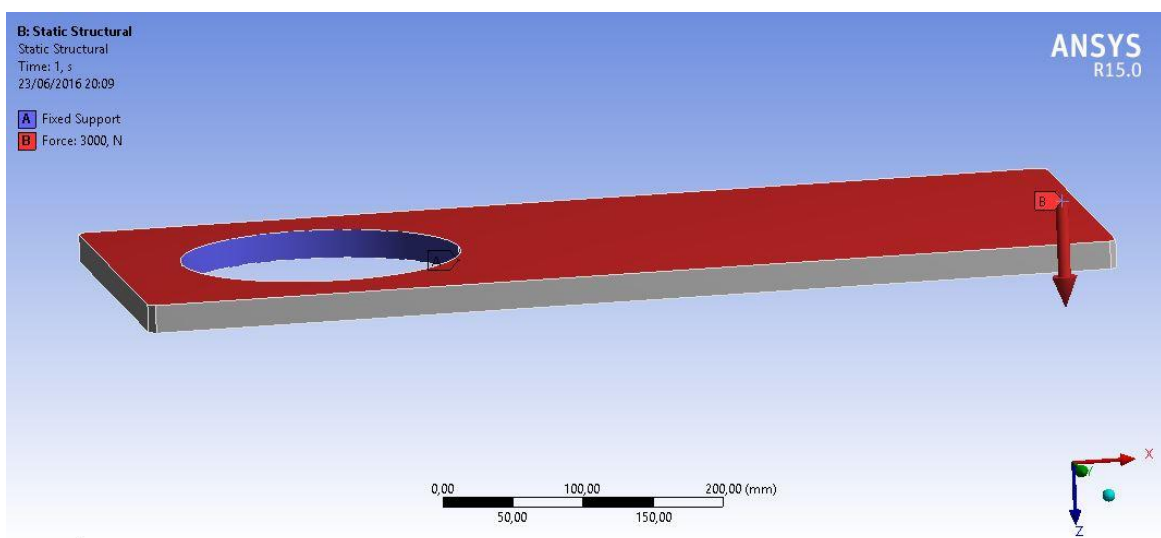


Figura 3-19 Modelo de simulación

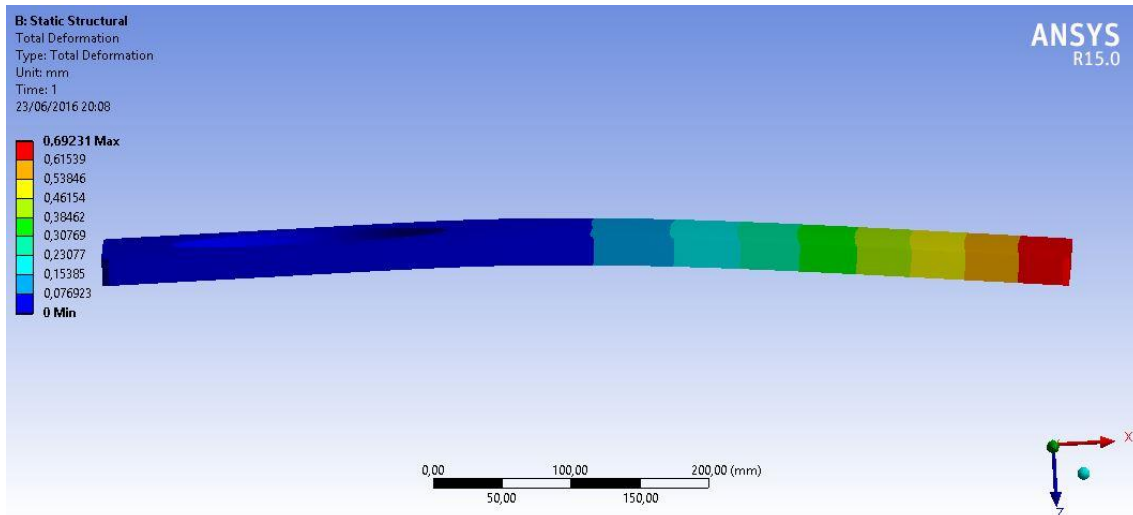


Figura 3-20 Desplazamientos de la placa

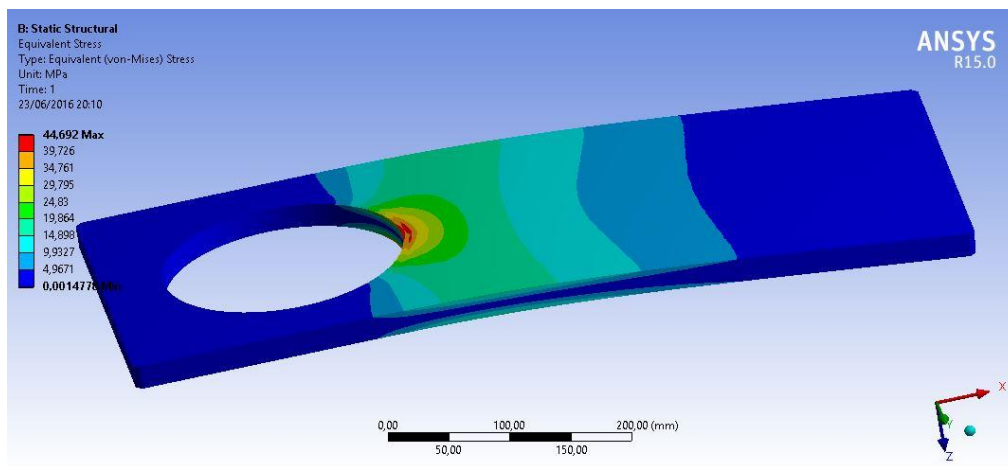


Figura 3-21 Tensiones en la placa

La siguiente pieza en ser diseñada es la E11, esta pieza se la que conecta el sistema diseñado con la bancada inicial (véase la Fig. 3-22). Las medidas de esta pieza las marca por un lado la bancada inicial y por el otro el plato giratorio. El grosor se decide al colocar los tornillos, los cuales necesitan una superficie roscada para soportar los esfuerzos. Esta placa no tiene unos requerimientos muy grandes, únicamente la planitud de la cara superior para hacer que no exista ningún problema a la hora de girar el plato.

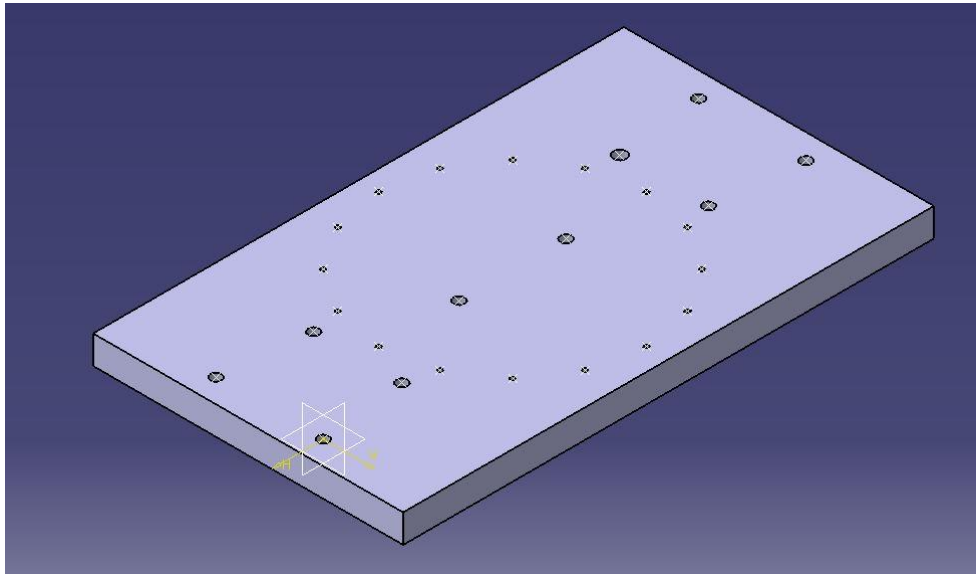


Figura 3-22 Pieza E11

Una vez diseñadas todas las piezas, se empieza el montaje del sistema. Este se realiza en el propio programa de diseño, como ya se dijo antes, para poder comprobar que todos los taladros correcta y todas las dimensiones están en las posiciones correctas. Realizando el montaje, se consigue ver cómo será la maquina una vez diseñada (véase la Fig. 3-23).

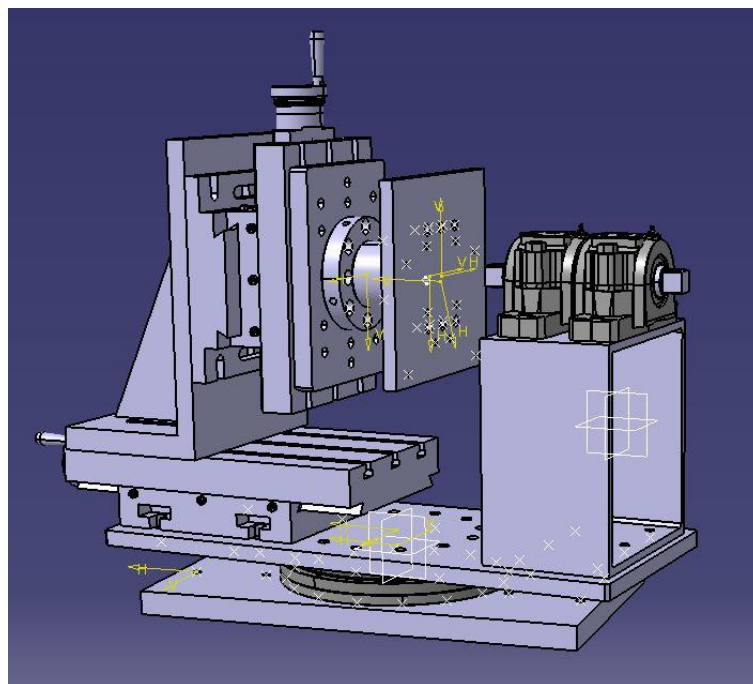


Figura 3-23 Sistema de calibración final en Catia v5

Una vez comprobado en el programa que todo es correcto y coincide. Se envían los planos al taller de mecanizado que se va a encargar de fabricar las piezas. Una vez recibidas las piezas, se empieza con el montaje, el cual no es nada fácil de realizar. Después de unos días dedicados al montaje, se comprueba como efectivamente, todas las piezas encajan dando como resultado un sistema muy similar al diseñado en Catia (véase la Fig. 3-24)

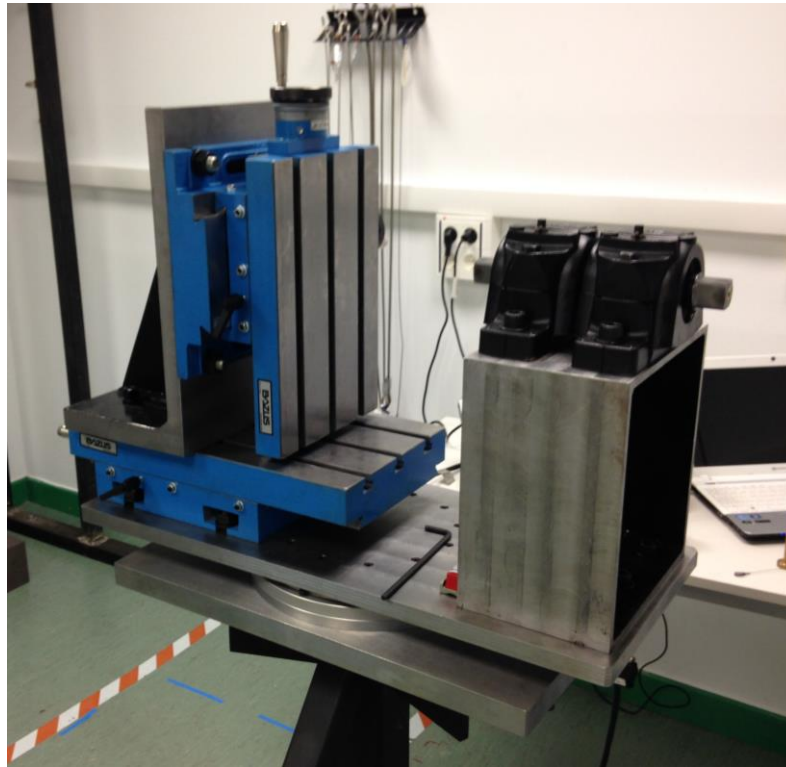


Figura 3-24 Sistema de calibración final

3.4 Tornillería

Los tornillos, por requisitos de diseño, se decide que se van a utilizar los de calidad 12.9 pavonados. Además, sus respectivas tuercas y arandelas.

Para el cálculo del número de tornillos necesarios en una pieza, lo que se debe de hacer es intentar igualar el área de los tornillos que reciben el esfuerzo, con el área de los tornillos que los van a transmitir. Para ejemplificar esto, se le va a calcular los tornillos necesarios a la placa E03.

La pieza E03 consta de 4 pernos que la unen a la E02, estos pernos tienen un diámetro de 9.5 mm y, por tanto, generan un área de:

$$A = n \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{9.5}{2}\right)^2 = 283.5 \text{ mm}^2$$

Ahora hay que calcular el área que introducirían los tornillos en la superficie plana. Para ello se decide poner 6 tornillos de métrica 8 y comprobar que área genera:

$$A = n \cdot \pi \cdot r^2 = 6 \cdot \pi \cdot \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 301.6 \text{ mm}^2$$

Se observa como ambas áreas son aproximadamente iguales, por tanto, con 6 tornillos M8 todo sería correcto. Si se quisiese, se podrían poner más tornillos por lo que se podría disminuir el espesor de la placa, pero por ejemplo para esta pieza, no interesa hacer eso ya que, se eliminarían zonas para hacer taladros para poder acoplar transductores futuros en la pieza E04.

Para el resto de piezas, se le calculan los taladros de manera similar, intentando hacer un balance con los espesores y el número de agujeros en la placa. Otros elementos son los ojales, estos se hacen para tener más posibilidad a la hora de corregir la posición de los elementos como los soportes de los rodamientos o las mesas de posicionamientos.

4 PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA

Para comenzar este apartado, se hará un pequeño resumen de lo que se lleva por ahora. Primero, se analizó la bancada que se tenía, observando que el principal problema que existía era la flexión en el cuadradillo. Después de un análisis de las opciones existentes para solucionar el problema, se decide por diseñar el sistema. Para ello se analizan los distintos caminos que existen para llegar a lo que se le pide, eliminar la flexión.

Una vez decididas las pautas a seguir, se pasa a la búsqueda de los materiales comerciales y al diseño de las piezas. Acabado este diseño, se pasa a fabricar el sistema, mandando los planos de las piezas a una empresa de mecanizado la cual se encarga de fabricarlas. Una vez fabricadas todas las piezas y montadas donde deben ir, se pasa al análisis del sistema nuevo.

Antes de comenzar con las pruebas, se decide comprobar que transductores se tienen para cada punto del rango. Con esto se puede organizar mejor las calibraciones, teniendo un orden a la hora de comparar que transductor usar para comparar los puntos.

Las pruebas que se deciden realizar es calibrar en cada punto, de manera similar a como se haría a la hora de una calibración normal. Con esos datos, se comprueba el índice de compatibilidad con el laboratorio de referencia, al igual que se hizo con el banco inicial.

Para realizar las pruebas, se van a tomar 4 lecturas por punto. Si la diferencia entre las medidas es mayor de 0.02 N·m se tomará una medida adicional, hasta llegar a 6 si fuese necesario. Se marcarán en rojo las medidas que superen esa variación respecto a la media.

Tras ser revisados los resultados obtenidos, se marcará en rojo los puntos que se deben de repetir en la calibración debido a la gran dispersión entre las medidas. De esta forma, se hace muy visual e intuitivo el trabajo.

Se comienzan las pruebas con los rangos menores, para ir poco a poco creciendo. A continuación, se muestran los valores que se han obtenido para los transductores T6 (véase la tabla 4-1), G1 (véase la tabla 4-2) y T1 (véase la tabla 4-3). Con estos transductores, se pueden comprobar un rango de entre 0.15 Nm hasta 5 Nm, pudiéndose obtenerse el rango de 0.5 – 5 Nm en dos transductores distintos, el G1 y el T1.

Comentar también que, en los siguientes transductores, se repitieron los puntos en rojo tal y como se dice que se tiene que hacer, pero aquí, para comentar el efecto que se quiere explicar no hace falta mostrar estos efectos. Por tanto, únicamente se van a quedar los datos en rojos, sin tomar los criterios.

T6 Horario						
PATRON	0,1556	0,3112	0,6224	0,9336	1,2448	1,4315
LECTURA 1	0,12	0,25	0,59	0,88	1,18	1,41
LECTURA 2	0,12	0,25	0,58	0,86	1,18	1,38
LECTURA 3	0,11	0,26	0,61	0,86	1,18	1,37
LECTURA 4	0,09	0,25	0,57	0,87	1,18	1,38
LECTURA 5	0,10		0,59			1,36
LECTURA 6	0,11					
PROMEDIO	0,11	0,25	0,59	0,87	1,18	1,38
CORRECIÓN	0,046	0,057	0,035	0,068	0,068	0,052
ΔX (%)	29,7	18,4	5,6	7,3	5,4	3,7
CMC	0,00093	0,00187	0,00373	0,00560	0,00747	0,00859
U repetib. (%)	20,30	2,51	5,46	1,45	0,14	2,22
U reprod. (%)	4,06	0,83	1,27	0,46	0,04	0,55

Tabla 4-1. Valores para el transductor T6

G1 Horario						
PATRON	0,4979	0,9958	1,9917	2,9875	3,9834	4,9792
LECTURA 1	0,44	0,95	1,93	2,91	3,86	4,96
LECTURA 2	0,48	0,95	1,93	2,91	3,87	4,95
LECTURA 3	0,45	0,94	1,92	2,90	3,88	4,94
LECTURA 4	0,45	0,95	1,93	2,88	3,92	4,94
LECTURA 5	0,45			2,91	3,93	
LECTURA 6						
PROMEDIO	0,45	0,95	1,93	2,90	3,89	4,95
CORRECIÓN	0,043	0,050	0,062	0,088	0,090	0,031
ΔX (%)	8,6	5,0	3,1	2,9	2,3	0,6
CMC	0,00299	0,00597	0,01195	0,01793	0,02390	0,02988
U repetib. (%)	6,92	0,96	0,42	0,92	1,28	0,34
U reprod. (%)	1,61	0,28	0,13	0,23	0,37	0,10

Tabla 4-2. Valores para el transductor G1

T1 Horario						
PATRON	0,4979	0,9958	1,9917	2,9875	3,9834	4,9792
LECTURA 1	0,42	0,89	1,92	2,88	3,95	4,96
LECTURA 2	0,39	0,88	1,89	2,88	3,95	4,96
LECTURA 3	0,39	0,89	1,88	2,88	3,94	4,95
LECTURA 4	0,38	0,88	1,89	2,87	3,98	4,94
LECTURA 5	0,39		1,88		3,95	
LECTURA 6						
PROMEDIO	0,39	0,89	1,89	2,88	3,95	4,95
CORRECIÓN	0,104	-0,111	-0,100	-0,110	-0,029	-0,027
ΔX (%)	20,9	-11,1	-5,0	-3,7	-0,7	-0,5
CMC	0,00299	0,00597	0,01195	0,01793	0,02390	0,02988
U repetib. (%)	7,18	0,80	1,49	0,25	0,72	0,29
U reprod. (%)	1,72	0,33	0,39	0,09	0,17	0,10

Tabla 4-3. Valores para el transductor T1

En estos resultados, se puede observar como siempre el valor medido está por debajo del valor teórico. Además, se nota que según el cuidado y suavidad con el que se suelten las masas, este valor da un salto o se mantiene en ese punto. Este efecto llama mucho la atención, sobretodo el hecho de que con forme va aumentando la carga, esta diferencia va disminuyendo.

En un primer instante, se piensa que lo que produce este efecto es el rozamiento inicial de los rodamientos, es decir, existe un par a vencer que no se es capaz de saltar. El cual se minimiza al aumentar el par. Para comprobar este efecto se van a mostrar los valores generados por rangos mayores. Para esto se calibran los transductores G2 (véase la tabla 4-4), G3 (véase la tabla 4-5) y el G4 (véase la tabla 4-6).

G2 Horario						
PATRON	4,4813	9,0806	18,0417	25,0076	36,0833	45,395
LECTURA 1	4,40	9,03	17,88	24,54	35,77	44,66
LECTURA 2	4,40	9,03	17,88	24,56	35,75	44,66
LECTURA 3	4,40	9,01	17,89	24,54	35,74	44,65
LECTURA 4	4,40	9,02	17,89	24,53	35,75	44,64
LECTURA 5						
LECTURA 6						
PROMEDIO	4,40	9,02	17,89	24,54	35,75	44,65
CORRECIÓN	0,081	0,058	0,155	0,468	0,332	0,744
ΔX (%)	1,8	0,6	0,9	1,9	0,9	1,6
CMC	0,02689	0,05448	0,10825	0,15005	0,21650	0,27237
U repetib. (%)	0,06	0,19	0,04	0,08	0,07	0,03
U reprod. (%)	0,02	0,06	0,01	0,03	0,02	0,01

Tabla 4-4. Valores para el transductor G2

G3 Horario						
PATRON	10,9513	22,0222	44,0396	63,9423	88,0791	109,5989
LECTURA 1	10,93	22,05	44,21	64,11	88,21	109,83
LECTURA 2	10,93	22,05	44,19	64,08	88,24	109,80
LECTURA 3	10,95	22,06	44,20	64,09	88,26	109,80
LECTURA 4	10,93	22,05	44,18	64,06	88,25	109,81
LECTURA 5	10,94		44,20	64,05	88,25	109,81
LECTURA 6						
PROMEDIO	10,94	22,05	44,20	64,08	88,24	109,81
CORRECIÓN	0,015	-0,030	-0,156	-0,136	-0,163	-0,211
ΔX (%)	0,140	-0,138	-0,355	-0,212	-0,185	-0,193
CMC	0,06571	0,13213	0,26424	0,38365	0,52847	0,65759
U repetib. (%)	0,13	0,03	0,05	0,07	0,04	0,02
U reprod. (%)	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00

Tabla 4-5. Valores para el transductor G3

G4 Horario (BRAZO)						
PATRON	34,373	68,229	134,9457	203,175	270,3892	338,1013
LECTURA 1	34,35	68,20	135,03	203,29	270,47	338,24
LECTURA 2	34,31	68,21	135,04	203,28	270,45	338,23
LECTURA 3	34,36	68,23	135,05	203,27	270,47	338,21
LECTURA 4	34,34	68,25	135,06	203,31	270,45	338,23
LECTURA 5		68,24		203,28		
LECTURA 6						
PROMEDIO	34,34	68,23	135,05	203,29	270,46	338,23
CORRECIÓN	0,033	0,003	-0,099	-0,111	-0,071	-0,126
ΔX (%)	0,097	0,005	-0,074	-0,055	-0,026	-0,037
CMC	0,20624	0,40938	0,80967	1,21905	1,62234	2,02861
U repetib. (%)	0,10	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
U reprod. (%)	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-6. Valores para el transductor G4

Efectivamente, se observa como, hasta aproximadamente 5 Nm, existe un rozamiento inicial que el sistema no es capaz de saltar. Una vez superado ese valor, los valores se vuelven estables alrededor del valor teórico, incluso llegando a sobrepasarlo en algunos puntos.

Para corroborar estos valores, se calibra el T2 (véase la tabla 4-7) y el T3 (véase la tabla 4-8), los cuales coinciden con los G2 y G3 anteriores. El T4 se cree que no es necesario si con los dos primeros sucede lo mismo, se considera que la tendencia es la misma.

T2 Horario						
PATRON	4,4813	9,0806	18,0417	25,0076	36,0833	45,395
LECTURA 1	4,48	9,13	17,99	25,11	36,23	45,22
LECTURA 2	4,49	9,12	18,01	25,14	36,24	45,20
LECTURA 3	4,49	9,14	18,00	25,15	36,25	45,22
LECTURA 4	4,50	9,15	18,01	25,15	36,26	45,21
LECTURA 5		9,15	18,00	25,19	36,26	
LECTURA 6				25,15	36,26	
PROMEDIO	4,49	9,14	18,00	25,15	36,25	45,21
CORRECIÓN	-0,008	0,060	-0,040	0,141	0,166	-0,184
ΔX (%)	-0,2	0,7	-0,2	0,6	0,5	-0,4
CMC	0,02689	0,05448	0,10825	0,15005	0,21650	0,27237
U repetib. (%)	0,31	0,23	0,07	0,23	0,06	0,03
U reprod. (%)	0,09	0,06	0,02	0,04	0,01	0,01

Tabla 4-7. Valores para el transductor T2

T3 Horario						
PATRON	11,2219	22,1732	44,0661	64,0932	88,1009	109,9938
LECTURA 1	11,18	22,22	44,12	64,16	88,14	109,95
LECTURA 2	11,20	22,20	44,14	64,13	88,13	109,94
LECTURA 3	11,18	22,18	44,10	64,13	88,13	109,94
LECTURA 4	11,20	22,20	44,12	64,13	88,12	109,91
LECTURA 5				64,12		109,91
LECTURA 6						
PROMEDIO	11,19	22,20	44,12	64,13	88,13	109,93
CORRECIÓN	0,032	0,027	0,054	0,041	0,029	-0,064
ΔX (%)	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1
CMC	0,067	0,133	0,264	0,385	0,529	0,660
U repetib. (%)	0,13	0,13	0,06	0,04	0,02	0,03
U reprod. (%)	0,05	0,04	0,02	0,01	0,00	0,01

Tabla 4-8. Valores para el transductor T2

Analizando los datos generados con este transductor con el mismo rango. Se puede corroborar lo dicho anteriormente, el valor donde el efecto del rozamiento se vuelve despreciable es aproximadamente 5 Nm. A partir de ese valor, las medidas se comportan de una manera que se entiende como correcta, dando una repetibilidad bastante buena y una corrección no muy alta.

Una vez visto este efecto, se ocurre un método para intentar solventarlo. Este método se denomina coloquialmente “el empujoncito”, consiste en darle una ayuda suave al eje con la mano. Con este método lo que se intenta conseguir es que manualmente se eliminen las pequeñas holguras que se puedan tener, además de saltar ese primer rozamiento al iniciar el movimiento.

A continuación, se presentan los datos de los transductores T6 (véase la tabla 4-9), T1 (véase la tabla 4-10) y el G1 (véase la tabla 4-11). Con estos datos se puede observar como mejora o empeoran los resultados al aplicarle el nuevo método.

T6 Horario (CRITERIO CON "empujoncito")						
PATRON	0,1556	0,3112	0,6224	0,9336	1,2448	1,4315
LECTURA 1	0,152	0,312	0,630	0,932	1,23	1,43
LECTURA 2	0,162	0,317	0,627	0,939	1,25	1,43
LECTURA 3	0,151	0,317	0,623	0,933	1,25	1,43
LECTURA 4	0,160	0,314	0,621	0,932	1,24	1,43
LECTURA 5	0,161	0,312	0,629	0,936	1,25	1,43
LECTURA 6	0,154	0,312	0,627	0,931	1,25	1,43
PROMEDIO	0,15645	0,31398	0,62633	0,93385	1,24407	1,43257
CORRECIÓN	-0,001	-0,003	-0,004	0,000	0,001	-0,001
ΔX (%)	-0,5	-0,9	-0,6	0,0	0,1	-0,1
CMC	0,00093	0,00187	0,0037	0,0056	0,0075	0,0086
U repetib. (%)	5,02	1,33	1,00	0,64	0,74	0,15
U reprod. (%)	1,28	0,35	0,22	0,14	0,16	0,03

Tabla 4-9. Valores del transductor T6 con el "empujoncito"

T1 Horario (criterio con "empujoncito")						
PATRON	0,4979	0,9958	1,9917	2,9875	3,9834	4,9792
LECTURA 1	0,50	1,02	2,00	2,99	3,99	4,97
LECTURA 2	0,50	1,00	2,00	3,00	3,98	4,98
LECTURA 3	0,51	1,00	2,00	2,98	3,99	4,98
LECTURA 4	0,49	1,00	2,00	2,99	3,98	4,97
LECTURA 5		0,99	2,00			
LECTURA 6		0,99				
PROMEDIO	0,50	1,00	2,00	2,99	3,99	4,98
CORRECIÓN	-0,002	0,004	0,008	0,003	0,002	-0,004
ΔX (%)	-0,4	0,4	0,4	0,1	0,0	-0,1
CMC	0,00299	0,00597	0,01195	0,01793	0,02390	0,02988
U repetib. (%)	2,83	2,12	0,00	0,47	0,18	0,14
U reprod. (%)	0,82	0,45	0,00	0,14	0,07	0,06

Tabla 4-10. Valores del transductor T1 con el "empujoncito"

G1 Horario (criterio "empujoncito")						
PATRON	0,4979	0,9958	1,9917	2,9875	3,9834	4,9792
LECTURA 1	0,498	0,996	1,988	2,988	3,988	4,968
LECTURA 2	0,498	0,996	1,991	2,993	3,987	4,976
LECTURA 3	0,500	0,996	1,992	2,990	3,985	4,980
LECTURA 4	0,497	0,997	1,994	2,988	3,983	4,967
LECTURA 5						
LECTURA 6						
PROMEDIO	0,50	1,00	1,99	2,99	3,99	4,97
CORRECIÓN	0,000	0,000	0,001	-0,002	-0,002	0,006
ΔX (%)	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,1
CMC	0,00299	0,00597	0,01195	0,01793	0,02390	0,02988
U repetib. (%)	0,44	0,08	0,21	0,11	0,08	0,18
U reprod. (%)	0,13	0,03	0,06	0,03	0,03	0,07

Tabla 4-11. Valores del transductor G1 con el "empujoncito"

Se observa como con este método se mejora los resultados que se tenían antes, disminuyendo la corrección casi a 0. El problema de estos puntos es la gran dispersión que se tiene a la hora de tomar las medidas, esto provoca que la incertidumbre se dispare y, por tanto, no se cumpla la incertidumbre declarada. Estas pruebas también confirman lo que se creía. El error en las medidas viene dado por el rozamiento inicial que se debe superar y que el sistema al cargarse con tan poco peso no es capaz de hacerlo por sí mismo.

Una vez comprobado hasta el punto de 5 Nm, se realiza el “empujoncito” para el transductor G3 (véase la tabla 4-12). Con esta prueba se conseguirá confirmar o rechazar la idea de que el rozamiento inicial, tan importante en pares bajos, es ínfimo en pares medios y altos.

G3 Horario (CRITERIO CON "empujoncito")						
PATRON	10,9513	22,0222	44,0396	63,9423	88,0791	109,5989
LECTURA 1	10,98	22,09	44,18	64,10		
LECTURA 2	10,95	22,06	44,14	64,11		
LECTURA 3	10,95	22,07	44,18	64,10		
LECTURA 4	10,97	22,07	44,14	64,12		
LECTURA 5	10,96	22,07	44,18			
LECTURA 6			44,18			
PROMEDIO	10,96	22,07	44,17	64,11	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
CORRECIÓN	-0,011	-0,050	-0,127	-0,165	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
ΔX (%)	-0,10	-0,23	-0,29	-0,26	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
CMC	0,07	0,13213	0,26424	0,38365	0,52847	0,65759
U repetib. (%)	0,19	0,10	0,06	0,02	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
U reprod. (%)	0,05	0,02	0,02	0,01	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!

Tabla 4-12. Valores del transductor G3 con “empujoncito”

Con estos resultados, se observa como el método “empujoncito” no es necesario en los pares medios y altos. Las dos columnas últimas no se han rellenado porque al verse que en los 4 primeros números los resultados no varían en demasía, se decide no realizar los dos últimos puntos, ahorrando en tiempo.

Para finalizar con las pruebas en los pares bajos. Se calibra el transductor M5 (véase la tabla 4-13). Con esta prueba lo que se busca es analizar el cero que se hace al inicio ya que, se hacía cada vez que se montaba el transductor en el sistema nuevo.

M5 Horario						
PATRON	0,498	0,9958	1,992	2,983	3,983	5,041
LECTURA 1	0,497	0,999	1,995	2,991	3,986	5,060
LECTURA 2	0,498	0,993	2,006	2,983	3,989	5,046
LECTURA 3	0,497	0,996	1,992	2,979	3,990	5,039
LECTURA 4	0,498	0,997	1,990	2,988	3,983	5,042
LECTURA 5		0,996	1,989		3,988	5,031
LECTURA 6			1,988			5,041
PROMEDIO	0,4975	0,9962	1,99	2,99	3,99	5,04
CORRECIÓN	0,000	0,000	0,001	-0,002	-0,004	-0,002
ΔX (%)	0,075	-0,044	0,034	-0,060	-0,098	-0,049
CMC	0,003	0,006	0,012	0,018	0,024	0,030
U repetib. (%)	0,14	0,38	0,63	0,27	0,12	0,40
U reprod. (%)	0,06	0,09	0,14	0,09	0,03	0,08

Tabla 4-13. Valores del transductor M5 con “empujoncito” y cero hechos fuera

En el transductor M5 se ha hecho 0 en cada punto una sola vez por tanda de medidas. El 0 se ha hecho con el transductor en posición vertical y el cable en la posición más baja posible. Después se ha montado en la bancada y no se ha vuelto a hacer 0 en toda la tanda de medidas. Se observa que cuando se monta en el sistema, el 0 se pierde. No se han corregido las medidas con el 0 ya que los resultados son buenos.

Con el método del empujoncito, pasa igual que en los transductores anteriores, se tienen desviaciones altas. Esto es debido a que la forma de quitar las holguras es manual. Se observa que, aunque el par obtenido después del empujoncito sea mayor que el patrón, la tendencia en el tiempo es a disminuir la lectura hasta llegar a puntos muy cercanos al patrón.

Al acabar esta prueba, se da por finalizado el análisis de los pares bajos. Pasando a comprobar los valores de los pares medios y altos. Para calibrar en estos rangos se usa la mariposa (véase la Fig. 4-1) y el brazo, mientras que

para el rango bajo se ha usado los discos de 5 inch (véase la Fig. 4-2) y de 2,5 inch (véase la Fig. 4-3).

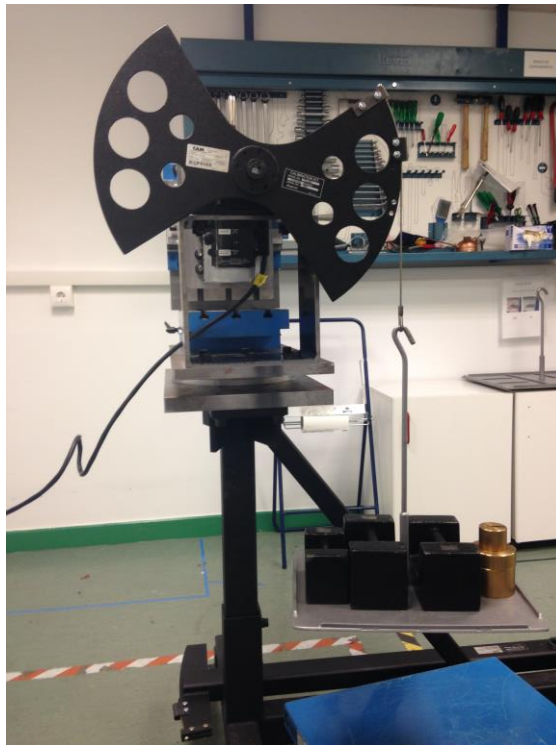


Figura 4-1. Calibración con mariposa

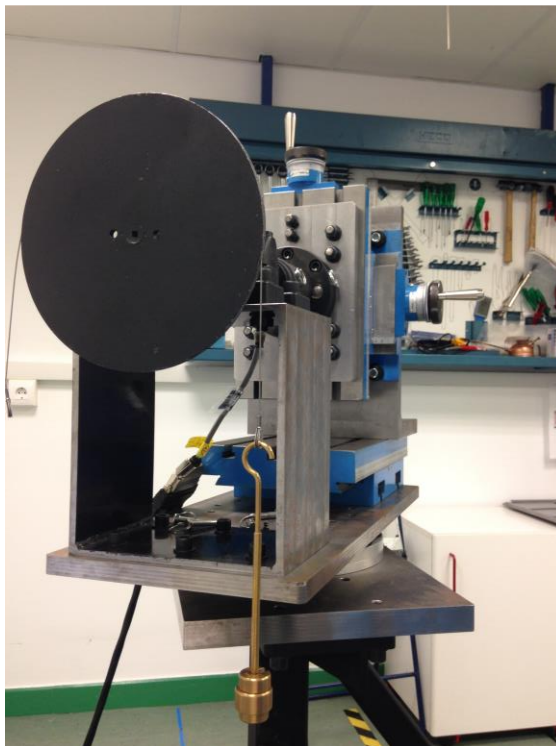


Figura 4-2. Calibración con disco de 5 inch



Figura 4-3. Calibración con disco de 2.5 inch

Mientras se calibra usando la mariposa y el brazo, se observa como al colocar estos elementos, el transductor empieza a leer par, aunque no estén cargados. Esto se produce por el desequilibrio que tienen estos elementos. Este efecto hace plantearse una pregunta ¿y si el error de la compatibilidad viene por qué no se está calibrando en la misma zona de la banda? Esta pregunta se hace porque si al colocar la mariposa y el brazo la galga extensométrica se deforma y lo que se hace es ponerse a 0 con la unidad de lectura, pero la banda al empezar a medir ya se encuentra deformada.

Investigando, se llega a observar que en otros laboratorios lo que se hace es que al colocar el brazo que genera la distancia, este se equilibra de manera mecánica o eléctrica, haciendo que la unidad de lectura marque 0. En el caso que se tiene aquí, eso es imposible de conseguir. Por esta razón, se decide caracterizar este par.

Para la caracterización, lo que se hace es elegir el transductor donde se sabe que aproximadamente está el par que genera estos elementos. Esta aproximación se saca de los valores que se observan al ponerlos en los distintos transductores.

En el caso del brazo, se escogen los transductores G3 y G4 (véase la tabla 4-14), comparando ambos resultados y comprobando que ambas medidas son compatibles. Para la mariposa, se van a realizar más medidas, pero todas con el transductor T6 (véase la tabla 4-15), esto es así porque no se tiene ningún transductor del mismo rango.

Par brazo		
	G2	G3
1	23,618	23,68
2	23,617	23,71
3	23,617	23,70
4	23,620	23,71
5	23,634	23,71
6	23,699	23,71
7	23,646	23,68
8	23,584	23,68
9	23,619	23,67
10	23,600	23,66
11	23,609	23,65
promedio	23,624	23,687
Corregido	23,584	23,668
desvest	0,030	0,02
diferencia	0,115	0,030
cmc	0,071	0,071
max	23,699	23,71
min	23,584	23,68

Tabla 4-14. Caracterización del par del brazo

Par maiposa	
	T6
1	0,263
2	0,268
3	0,261
4	0,274
5	0,269
6	0,267
7	0,274
8	0,278
9	0,274
10	0,271
11	0,272
12	0,277
13	0,275
14	0,275
15	0,278
16	0,271
17	0,272
18	0,272
19	0,278
20	0,272
promedio	0,269830
Corregido	0,2705
desvest	0,005
diferencia	0,017
cmc	0,036
max	0,278
min	0,261

Tabla 4-15. Caracterización del par de la mariposa

Observando los resultados, se puede decir que el primer punto a calibrar será para la mariposa de 0.271 Nm y para el brazo 23.584 Nm. Se dice el primer punto a calibrar porque es el par que, al no tener el centro de gravedad donde en el punto de rotación, provoca.

Una vez realizada las caracterizaciones se vuelven a calibrar, por ejemplo, el G2 (véase la tabla 4-16) y el G3 (véase la tabla 4-17). Además, para comprobar el eje, se calibra el transductor T5 (véase la tabla 4-18)

G2 Horario (Mariposa caracterizada)						
PATRON	4,4999	8,98	17,94	27,02	35,98	45,06
LECTURA 1	4,50	8,96	17,93	27,03	35,99	45,07
LECTURA 2	4,50	8,98	17,90	27,02	35,97	45,04
LECTURA 3	4,51	8,97	17,91	27,02	35,97	45,04
LECTURA 4	4,50	8,97	17,92	27,01	35,98	45,03
LECTURA 5	4,50			27,02	35,98	45,03
LECTURA 6						
PROMEDIO	4,5028	8,97	17,92	27,02	35,98	45,04
CORRECIÓN	-0,003	0,015	0,023	0,001	0,002	0,020
ΔX (%)	-0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
CMC	0,027	0,054	0,108	0,162	0,216	0,270
U repetib. (%)	0,14	0,12	0,10	0,04	0,03	0,06
U reprod. (%)	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02

Tabla 4-16. Valores para el transductor G2 con mariposa caracterizada

G3 Horario (con caracterización de mariposa)						
PATRON	11,2219	22,1732	44,0661	64,0932	88,1009	109,9938
LECTURA 1	11,17	22,14	44,03	64,15	88,23	110,12
LECTURA 2	11,16	22,13	44,04	64,11	88,18	110,19
LECTURA 3	11,17	22,13	44,03	64,14	88,18	110,16
LECTURA 4	11,16	22,12	44,04	64,16	88,22	110,12
LECTURA 5		22,14		64,14	88,21	
LECTURA 6		22,13			88,20	
PROMEDIO	11,17	22,13	44,04	64,14	88,20	110,15
CORRECIÓN	0,057	0,042	0,031	-0,047	-0,102	-0,154
ΔX (%)	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,1
CMC	0,067	0,133	0,264	0,385	0,529	0,660
U repetib. (%)	0,06	0,06	0,02	0,06	0,04	0,04
U reprod. (%)	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

Tabla 4-17. Valores para el transductor G3 con mariposa caracterizada

T5 Horario (BRAZO CARACTERIZADO)						
PATRON	249,4	517,3	1057,0	1596,7	2074,7	2677,1
LECTURA 1	251,200	519,400	1058,000	1601,700	2077,600	2686,300
LECTURA 2	251,500	519,300	1057,800	1602,000	2078,000	2687,000
LECTURA 3	251,600	519,400	1057,800	1602,000	2077,600	2686,300
LECTURA 4	251,500	519,300	1058,000	1602,000	2077,000	2687,000
LECTURA 5						
LECTURA 6						
PROMEDIO	251,4500	519,35	1057,90	1601,93	2077,55	2686,65
CORRECIÓN	-2,030	-2,069	-0,914	-5,233	-2,890	-9,552
ΔX (%)	-0,8	-0,4	-0,1	-0,3	-0,1	-0,4
CMC	1,49652	3,10369	6,34192	9,58015	12,44796	16,06259
U repetib. (%)	0,11	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02
U reprod. (%)	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01

Tabla 4-18. Valores para el transductor T5 con eje caracterizada

Analizando estos resultados, se observa como al caracterizar los elementos para generar la distancia, como son la mariposa y el eje, los resultados se mejoran. Se observa como la corrección es mucho mejor, lo que significa que el valor medido está más cerca del valor teórico que antes.

PUNTO	EQUIPO	ΔX AC6	ΔX CAM	U AC6	U CAM	IC	u repet. (%)	u reprod. (%)	u (%)	U (%) k=2
0,15	T6	-0,00008	-0,001016667	0,00095	0,00090	0,72	3,39	0,73	0,74	1,48
0,2	M1	-0,003	-0,0019	0,0016	0,0012	0,56	4,87	1,19	1,20	2,40
0,3	T6	0,0005	-0,0020	0,0018	0,00180	0,98	1,96	0,49	0,50	1,00
0,4	M1	-0,005	-0,0036	0,0024	0,0024	0,42	2,06	0,55	0,56	1,12
0,5	T1	0,0012	-0,0021	0,003	0,0030	0,78	2,83	0,82	0,82	1,65
0,5	Q1	-0,0009	0,0002	0,003	0,003	0,27	0,68	0,17	0,19	0,39
0,5	G1	-0,0005	-0,0001	0,003	0,003	0,08	0,44	0,13	0,16	0,32
0,5	P2	-0,0003	0,0010	0,003	0,0030	0,30	0,46	0,12	0,15	0,30
0,5	M5	0,0022	0,0012	0,003	0,0030	0,22	0,00	0,02	0,10	0,20
0,6	T6	-0,0014	0,0003	0,0036	0,0036	0,32	0,86	0,19	0,21	0,43
0,9	T6	-0,0022	0,0005	0,0054	0,0054	0,35	0,53	0,11	0,15	0,30
1	T1	0,0018	0,0042	0,005	0,0060	0,31	2,12	0,45	0,46	0,92
1	Q1	-0,0012	0,0024	0,005	0,006	0,47	0,60	0,16	0,19	0,38
1	P2	-0,0006	0,0018	0,005	0,0060	0,31	0,28	0,09	0,13	0,27
1	M5	0,0048	0,0008	0,005	0,0060	0,51	0,01	0,03	0,10	0,21
1	G1	-0,0011	-0,0002	0,005	0,006	0,12	0,08	0,03	0,10	0,21
1,2	M1	-0,008	-0,0030	0,006	0,0072	0,53	0,89	0,20	0,23	0,45
1,2	T6	-0,0016	0,0007	0,0060	0,0072	0,25	0,56	0,13	0,16	0,32
1,4	T6	0,0009	-0,0011	0,0070	0,0084	0,18	0,14	0,04	0,11	0,22
1,6	M1	-0,009	0,0026	0,008	0,0096	0,93	0,39	0,12	0,15	0,31
2	M2	0,012	0,00701646	0,013	0,0120	0,28	0,35	0,25	0,27	0,54
2	M6	0,0022	-0,0030	0,0062	0,012	0,38	0,32	0,09	0,14	0,27
2	M1	-0,0084	-0,0006	0,0062	0,0120	0,58	0,24	0,08	0,13	0,26
2	P2	-0,0006	-0,0020	0,006	0,0120	0,11	0,27	0,07	0,12	0,24
2	G1	-0,0021	0,0006	0,0062	0,012	0,20	0,21	0,06	0,12	0,24
2	M5	0,0093	0,0048	0,006	0,0120	0,34	0,01	0,05	0,11	0,22
2	Q1	0,0022	0,0119	0,0061	0,012	0,72	0,19	0,05	0,11	0,22
2	T1	0	0,0083	0,0061	0,012	0,62	0,00	0,00	0,10	0,20
3	T1	-0,0012	0,0025	0,009	0,018	0,18	0,47	0,14	0,17	0,34
3	Q1	-0,0021	-0,0011	0,009	0,018	0,05	0,19	0,05	0,11	0,22
3	P2	0,0005	0,0050	0,009	0,0180	0,22	0,17	0,04	0,11	0,22
3	G1	-0,0027	-0,0021	0,009	0,018	0,03	0,11	0,03	0,11	0,21
3	M5	0,0111	0,0176	0,009	0,0180	0,32	0,02	0,03	0,10	0,21
4	M7	0,012	-0,0044	0,016	0,012	0,82	0,18	0,08	0,13	0,26
4	M6	0,011	0,0015	0,012	0,012	0,56	0,19	0,06	0,12	0,24
4	T1	-0,001	0,0016	0,012	0,012	0,15	0,14	0,06	0,12	0,23
4	M5	0,02	0,0185	0,012	0,0120	0,09	0,02	0,04	0,11	0,21
4	Q1	-0,002	0,0009	0,012	0,012	0,17	0,14	0,04	0,11	0,21
4	P2	0	-0,0007	0,012	0,0120	0,04	0,10	0,03	0,10	0,21
4	G1	-0,002	-0,0023	0,012	0,012	0,02	0,08	0,03	0,10	0,21
4	M2	0,034	0,0322867	0,015	0,0120	0,09	0,00	0,00	0,10	0,20
4,5	T2	-0,007	-0,0025	0,014	0,014	0,23	0,31	0,08	0,13	0,25
4,5	Q2	-0,002	-0,0041	0,014	0,0135	0,11	0,11	0,04	0,11	0,21
4,5	G2	-0,011	-0,0029	0,014	0,014	0,41	0,14	0,03	0,11	0,21
5	T1	0,002	-0,0042	0,015	0,015	0,29	0,14	0,06	0,12	0,23
5	P3	0,011	0,0116	0,014	0,0150	0,03	0,09	0,03	0,10	0,21
5	P2	0	0,0039	0,017	0,0150	0,17	0,08	0,02	0,10	0,20
5	M5	0,023	0,0343	0,015	0,0150	0,53	0,03	0,01	0,10	0,20

Tabla 4-19. Tabla de compatibilidad

PUNTO	EQUIPO	ΔX AC6	ΔX CAM	U AC6	U CAM	IC	u repet. (%)	u reprod. (%)	u (%)	U (%) k=2
5,5	G1	-0,003	0,0065	0,017	0,017	0,40	0,18	0,07	0,12	0,24
5,5	Q1	-0,002	-0,0024	0,017	0,017	0,02	0,06	0,02	0,10	0,20
8	M2	0,038	0,04032718	0,024	0,0240	0,07	0,09	0,03	0,10	0,21
8	M6	0,026	0,0051	0,024	0,024	0,62	0,04	0,01	0,10	0,20
9	T2	0,007	0,0118	0,027	0,027	0,13	0,21	0,05	0,11	0,22
9	P3	0,013	0,0360	0,027	0,0270	0,60	0,19	0,04	0,11	0,22
9	G2	-0,006	0,0148	0,027	0,027	0,54	0,12	0,04	0,11	0,21
11	T3	0,008	0,0319	0,033	0,033	0,51	0,13	0,05	0,11	0,22
11	Q3	-0,004	0,0099	0,03	0,0330	0,31	0,13	0,04	0,11	0,22
11	P4	0,012	0,0044	0,033	0,0330	0,16	0,06	0,02	0,10	0,20
12	M2	0,02	0,0307	0,036	0,0360	0,21	0,12	0,04	0,11	0,21
12	M6	0,041	0,0165	0,036	0,036	0,48	0,12	0,04	0,11	0,21
16	M6	0,05	0,0305	0,048	0,048	0,29	0,10	0,04	0,11	0,21
18	P3	0,021	0,0718	0,054	0,0540	0,67	0,15	0,04	0,11	0,21
18	G2	-0,01	0,0228	0,054	0,054	0,43	0,10	0,03	0,10	0,21
18	Q2	-0,003	-0,0054	0,054	0,0540	0,03	0,09	0,02	0,10	0,20
18	T2	-0,01	0,0208	0,054	0,054	0,40	0,06	0,02	0,10	0,20
20	M2	-0,004	-0,0101	0,06	0,0600	0,07	0,14	0,05	0,11	0,22
20	M6	0,062	0,0262	0,06	0,060	0,42	0,11	0,03	0,10	0,21
20	M7	0,036	0,0588	0,06	0,060	0,27	0,00	0,00	0,10	0,20
22	T3	0,006	0,0268	0,066	0,066	0,22	0,13	0,04	0,11	0,21
22	Q3	-0,006	0,0132	0,06	0,0660	0,21	0,06	0,02	0,10	0,20
22	P4	0,008	0,0132	0,066	0,0660	0,06	0,06	0,02	0,10	0,20
22	G3	-0,016	0,0415	0,066	0,066	0,62	0,06	0,01	0,10	0,20
27	Q2	0	0,0073	0,081	0,0810	0,06	0,24	0,05	0,11	0,23
27	P3	0,024	0,0748	0,081	0,0810	0,44	0,16	0,04	0,11	0,21
27	T2	-0,012	0,0021	0,081	0,081	0,12	0,06	0,02	0,10	0,20
27	G2	-0,053	0,0008	0,081	0,081	0,47	0,04	0,01	0,10	0,20
36	Q2	0	0,0659	0,11	0,1080	0,43	0,19	0,05	0,11	0,22
36	T2	-0,02	0,0049	0,11	0,11	0,16	0,06	0,02	0,10	0,20
36	G2	-0,07	0,0021	0,11	0,11	0,47	0,03	0,01	0,10	0,20
36	P3	0,03	0,1252	0,11	0,1080	0,62	0,02	0,00	0,10	0,20
40	M7	0,06	0,1356	0,12	0,12	0,45	0,04	0,01	0,10	0,20
44	T3	0,01	0,0539	0,14	0,13	0,23	0,06	0,02	0,10	0,20
44	P4	0	0,0311	0,14	0,1320	0,16	0,05	0,01	0,10	0,20
44	Q3	0,0000	-0,0079	0,12	0,1320	0,04	0,03	0,01	0,10	0,20
44	G3	-0,06	0,0311	0,14	0,13	0,47	0,02	0,01	0,10	0,20
45	T2	-0,02	0,1023	0,14	0,1350	0,63	0,07	0,02	0,10	0,20
45	G2	-0,09	0,0203	0,14	0,14	0,57	0,06	0,02	0,10	0,20
45	Q2	0	0,0911	0,14	0,1350	0,47	0,04	0,01	0,10	0,20
45	P3	0,04	0,1175	0,14	0,1350	0,40	0,03	0,01	0,10	0,20
64	Q3	0,0000	-0,0208	0,18	0,1920	0,08	0,04	0,01	0,10	0,20
64	P4	-0,01	0,0832	0,21	0,1920	0,33	0,02	0,01	0,10	0,20
66	G3	-0,16	-0,0468	0,2	0,20	0,40	0,06	0,01	0,10	0,20
66	T3	0	0,0408	0,2	0,20	0,14	0,04	0,01	0,10	0,20
80	M7	0,09	0,2679	0,24	0,24	0,52	0,02	0,01	0,10	0,20
88	P4	0,01	0,0909	0,27	0,2640	0,21	0,04	0,01	0,10	0,20
88	G3	-0,2	-0,1025	0,27	0,26	0,26	0,04	0,01	0,10	0,20
88	Q3	-0,01	-0,0491	0,27	0,2640	0,10	0,03	0,01	0,10	0,20
88	T3	0,02	0,0291	0,27	0,26	0,02	0,02	0,00	0,10	0,20
110	M7	0,09	0,3724	0,33	0,33	0,61	0,09	0,03	0,10	0,21
110	G3	-0,25	-0,1537	0,33	0,33	0,21	0,04	0,02	0,10	0,20
110	T3	0,03	-0,0638	0,33	0,33	0,20	0,03	0,01	0,10	0,20
110	P4	0,01	0,1013	0,34	0,3300	0,19	0,01	0,00	0,10	0,20
111	Q3	-0,01	-0,1482	0,33	0,3330	0,29	0,05	0,01	0,10	0,20

Tabla 4-20. Tabla de compatibilidad

Los índices de compatibilidad se han calculados en las tablas 4-19 y 4-20, donde se puede observar que para el rango pequeño (hasta 5 Nm), aunque las compatibilidades no están del todo mal, solo hay puntos concretos donde no se es compatible, por culpa de la dispersión de las medidas, es decir, de la repetibilidad de las medidas, la incertidumbre se dispara. Para el resto de puntos, la compatibilidad es bastante buena, siendo compatibles en todos los puntos, cosa que, sin este sistema no se conseguía.

Para terminar, comentar que el rango se queda únicamente en los 111 Nm y no llega a los 2 700 Nm de los que se hablaba. Esto sucede porque, una vez recibido el eje, una de las piezas más importantes, la empresa de fabricación no realizó el templado del material, por tanto, el eje se retorció haciendo que no se pudiese usar el brazo de 40 inch con el que se calibraba los pares altos.

Se volvió a pedir otro eje. Esta vez asegurándose de que estuviese templado, pero cuando llegó, ya no dio tiempo a realizar ninguna prueba. Únicamente se consiguieron realizar un tanteo de los que no se tienen resultados, pero que se sabe que dieron unas compatibilidades aceptables. Por lo tanto, se podría decir que, para los pares altos, este sistema también es válido.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

Al llegar a este punto, se ha conseguido analizar, diseñar y poner a punto un sistema mecánico que elimine la flexión producida en el cuadradillo para poder calibrar de forma más precisa los transductores de par. El camino que se ha tenido que seguir para llegar a este punto no ha sido fácil, además, ha sido bastante complejo, pero, aun así, se ha conseguido solventar todos los inconvenientes encontrados.

Se dice que se ha dilatado en el tiempo más de lo esperado porque cuando se planteó la necesidad existente, no se esperaba que hiciese falta diseñar un sistema completamente nuevo. Se creía que analizando la bancada inicial iba a ser suficiente, ya que, los problemas al ponerla a punto iban a ser más sencillos de solucionar.

Al analizar el sistema, se comprobó que el cuadradillo sufría un esfuerzo de flexión provocado al recibir directamente el peso de las masas. Este efecto era el causante de la lectura errónea que se recibía. Una vez averiguado esto, se planteó qué camino seguir, eligiendo ser la propia empresa la que se encargue de solucionar este problema. Para ello, se crea el sistema mecánico de este trabajo.

A la hora de diseñar el sistema, se puede decir que no se ha encontrado muchos inconvenientes. Además, estos se iban solucionando de manera bastante eficiente conforme iban apareciendo. Algunos de estos problemas fueron la forma de girar el sistema, de posicionar el transductor, de reutilizar los máximos elementos ya comprados, etc. Al final, el sistema quedó mucho más compacto y cómodo de lo que se creía en un primer momento. Esto es así porque se evitó el sistema que en un primer instante se había pensado, el cual consistía en un banco exterior que se enfrentaba al transductor. Como se comprueba en este trabajo, la forma final es mucho más eficiente y fácil de trabajar con ella.

En la funcionalidad del sistema, no se ha conseguido que a pares pequeños (de 0.14 Nm hasta 5 Nm) el sistema funcione correctamente. Esto se cree que se debe a un rozamiento parásito que las masas no son capaces de saltar. Para el rango intermedio y superior el sistema si evita este rozamiento y sí se obtienen resultados compatibles.

Para acabar decir que, con mucho esfuerzo y sacrificio, se ha conseguido un sistema con un uso bastante similar a los sistemas comerciales existentes, pero por un precio bastante económico. Incluso comentar que los bancos comerciales no suelen estar preparados para calibrar pares por debajo de los 5 Nm.

5.2 Desarrollos futuros

En un futuro, se debería de realizar un análisis de ese rozamiento parásito, además de todos los posibles elementos extras que puedan afectar, como pueden ser las vibraciones, la fuerza a la hora de colocar las masas, etc. Analizado exhaustivamente todos esos elementos, crear un nuevo sistema para poder calibrar los pares más bajos.

Una vez diseñado el sistema para los pares bajos, de debe de un método para poder mover ambos sistemas de calibración de una manera cómoda según el par que se desee calibrar. El sistema que se ha diseñado aquí es bastante robusto y pesado, haciendo que su movilidad sea reducida.

Estos dos desarrollos son independientes a lo creado aquí. Sobre el sistema creado en este proyecto, decir que quizás se podría analizar el fabricar el sistema con otros materiales ya que, en la actualidad el tema de los materiales de fabricación está creciendo bastante rápido, apareciendo continuamente nuevos materiales.

Otro posible desarrollo sería utilizar a la hora de fabricar las piezas, una tecnología un poco desconocida para el mundo como serían las tecnologías aditivas. Con esta tecnología se podría optimizar topológicamente cada pieza, ahorrando así en tiempo de fabricación y materiales, además de disminuir el peso del sistema.

REFERENCIAS

- [1] *La Metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial*. Del Campo Maldonado, Maria Dolores y Robles Carbonell, José Ángel .
- [2] *Introducción a la Historia de la Metrología*, Carlos Granados, ETS Ing. Industriales, Univ. Politécnica de Madrid.
- [3] *Metrología en las civilizaciones de Mesopotamia, Egipto, Fenicia, Israel, Grecia, Cartago, Roma y otras culturas de la antigüedad*, Ramón Francisco Pachón Veira; Francisco Manzano Agugliaro, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España – 5-7 junio de 2002.
- [4] *Importancia de la metrología en la innovación Tecnológica*, Centro tecnológico del metal, Murcia (15 de noviembre de 2012)
- [5] *Patrones metrológicos y su importancia*, Guillermo Enrique Vega Sánchez, Sebastián Supelano Gómez (18 de mayo de 2012)
- [6] *Apuntes de clase de metrología*, (2016), Aida Estevez Urra, Universidad de Sevilla
- [7] *Measuring torque correctly*, (2002), Rainer Schnicker, Georg Wegener, HBM
- [8] Acta de la reunión del subcomité técnico de calibración nº5, reunión fecha: 16-10-2007; lugar: CEM; Tres Cantos, Madrid.
- [9] www.igus.es/aboutigus
- [10] www.bazus.com/es/
- [11] *Proyecto de elementos de máquinas*; M. F. Sporr; Editorial Reverté, S.A.
- [12] Acero Grado Maquinaria AISI 1045; Empresa: Sumitec, Sumideros Técnicos S.A.

GLOSARIO

Medición	Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.
Trazabilidad metrológica	Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.
Patrón de medida	Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia
Patrón primario de medida	Patrón reconocido por una autoridad nacional para servir, en un estado o economía, como base para la asignación de valores a otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza
Patrón secundario de medida	Patrón establecido por medio de una calibración respecto a un patrón primario de una magnitud de la misma naturaleza
Patrón de medida de referencia	Patrón designado para la calibración de otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza en una organización o lugar dado
Magnitud	Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia
Incertidumbre de medida	Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza