

Programa Oficial de Posgrado en
INGENIERIA MECÁNICA y de MATERIALES

MASTER EN SISTEMAS MECÁNICOS

Trabajo Fin de Master

RETROFIT DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE
RODADURA A DOS FLANCOS PARA ENGRANAJES
SINFÍN CORONA

Autor

Marcos Pueo Arteta

Director

Jorge Santolaria Mazo

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Diciembre de 2011 - Curso 2010 / 2011

RETROFIT DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE RODADURA A DOS FLANCOS PARA ENGRANAJES SINFIN CORONA

RESUMEN

Los engranajes deben de ser elementos precisos tanto en su fabricación como en sus condiciones de operación. Para verificar la calidad de un engranaje existen máquinas dedicadas muy precisas que exclusivamente verifican sus parámetros geométricos mediante palpado por contacto continuo. Incorporando sobre la bancada de una MMC una mesa giratoria con algún ciclo de medición específico obtendríamos los mismos resultados. Solo las máquinas dedicadas de ensayos de rodadura son las que nos pueden dar parámetros relacionados con las condiciones de operación del engranaje convirtiendo a estas máquinas en la forma más directa de comprobar la calidad de un engranaje desde el punto de vista de sus futuras condiciones de funcionamiento.

El coste de cualquiera de estos equipos es muy elevado por lo que se ha decidido aprovechar la estructura básica de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona fuera de uso y mantener su filosofía de funcionamiento.

El proyecto se ha dividido en dos partes fundamentales. Una primera parte de definición de cómo realizar la actualización de la máquina, donde se ha presentado el modelado CAD analizado su funcionamiento mecánico, se ha verificado su estado , se han seleccionado nuevos componentes de medida y con todo ello se ha propuesto el rediseño. Además se ha definido el control de la máquina y se han determinado los pasos a seguir en el montaje, ajuste y puesta en marcha .

En la segunda parte se ha definido un protocolo de verificación que incluye tanto verificaciones mecánicas como procedimientos de calibración para realizar periódicamente, sentando las bases de un procedimiento estándar de verificación inexistente en la actualidad para este tipo de equipos. También se ha desarrollado la caracterización metrológica de la máquina determinando la incertidumbre en función de la variación de los diferentes parámetros. Por último se han relacionado los resultados de los ensayos de rodadura con las tolerancias de montaje pudiendo prever posibles interferencias y evitando así un mal funcionamiento del par de engranajes.

0 INDICE

0	INDICE.....	5
1	INTRODUCCION	7
1.1	OBJETIVOS	7
1.2	CONTEXTO Y ANTECEDENTES	9
1.3	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	13
1.3.1	TIPOS DE ENSAYOS.....	13
1.3.2	NORMATIVA APLICADA.....	15
1.3.3	ENSAYO DE RODADURA A DOS FLANCOS	15
1.3.4	DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA	18
1.3.5	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	22
2	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	25
2.1	VALORACIONES PREVIAS.....	25
2.2	TOMA DE MEDIDAS	28
2.2.1	DESMONTAJE.....	28
2.2.2	CROQUIZACIÓN.....	29
2.3	MODELADO CAD INICIAL	31
2.4	PROPUESTAS RETROFIT.....	32
2.4.1	COMPROBACIONES REALIZADAS	32
2.4.2	SELECCIÓN DE NUEVOS COMPONENTES DE MEDIDA	37
2.5	MODELADO CAD FINAL.....	47
2.5.1	NUEVAS PIEZAS Y MODIFICACIONES	48
2.5.2	ELEMENTOS INVARIABLES.....	50
2.6	ACTUACIÓN SOBRE MÁQUINA	51
2.6.1	LIMPIEZA Y PUESTA A PUNTO	51
2.6.2	MONTAJE	53
2.7	ESQUEMA FUNCIONAMIENTO ELÉCTRICO.....	54
2.8	SEGURIDAD	57
3	PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CARACTERIZACION.....	58
3.1	VERIFICACIONES MECÁNICAS	58
3.1.1	VERIFICACIÓN DEL UTILLAJE PORTA-CORONAS.....	58
3.1.2	ALINEACIÓN DE PUNTO Y CONTRAPUNTO	59
3.1.3	MEDICIÓN DE ERRORES DE LA GUÍA	59
3.2	PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	60
3.2.1	CALIBRACIÓN PARALELISMO EJE SINFIN CON CARA DE REFERENCIA	61
3.2.2	CALIBRACIÓN ALTURA PLANO MEDIO CORONA.....	61
3.2.3	CALIBRACIÓN DISTANCIA ENTRE CENTROS	62
3.3	CARACTERIZACIÓN METROLÓGICA	65
3.3.1	ENSAYOS MISMA POSICIÓN INICIAL.....	66
3.3.2	ENSAYOS POSICIÓN INICIAL ALEATORIA	69
3.4	RELACIÓN ENSAYOS DE RODADURA CON TOLERANCIAS DE MONTAJE.....	71
4	CONCLUSIONES.....	75
5	MIRADAS AL FUTURO.....	77

6 BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	81
ANEXO I: CROQUIS.....	A-5
ANEXO II: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS COMPONENTES SELECCIONADOS	A-31
ANEXO III: PLANOS.....	A-84

1 INTRODUCCION

El Trabajo de Fin de Master (TFM) que a continuación se desarrolla explica los pasos seguidos para el “Retrofit de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona” perteneciente a “Echeverría Construcciones Mecánicas”.

Matizar en primer lugar que habitualmente se utiliza el termino anglosajón “retrofit” cuando se habla de una actualización, reforma o modernización de un equipo o una máquina.

Este primer capítulo está dedicado a la introducción y en él se van a analizar, en primer lugar, los objetivos a alcanzar tanto generales como específicos. Seguidamente, se detallarán el contexto, los antecedentes que se han considerado en su elaboración y la normativa vigente aplicada. Por último, se explicarán las características de los engranajes a medir, las diferentes partes de la máquina así como su funcionamiento.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto, siendo Trabajo de Fin de Master del postgrado en Sistemas Mecánicos de la Universidad de Zaragoza, es reparar y actualizar una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona perteneciente a una empresa zaragozana de mecanizado de engranajes. Con este tipo de máquina de ensayos se obtienen parámetros, muy interesantes de cara tanto al fabricante como al cliente, que aseguran la calidad del engranaje en las condiciones de operación.

Este TFM está englobado dentro de un proyecto nacional CDTI para el desarrollo de máquinas de ensayos de rodadura donde se ha formado un consorcio de empresas junto con la Universidad de Zaragoza.

Este objetivo principal se divide a su vez en dos partes fundamentales. Una primera parte en donde se pretende determinar cada una de las partes propias de la actualización de la máquina y una segunda parte en la que se quiere definir un protocolo de verificación y caracterización para este tipo de máquinas y ensayos.

Los objetivos específicos de la primera parte consisten en:

- Modelar en CAD la máquina original sin ningún tipo de documentación técnica ni gráfica. Es decir, el punto de partida es la croquización pieza a pieza de cada una de las partes de la máquina para su posterior modelado sólido CAD en 3D.
- Determinar qué componentes y piezas se mantendrán, cuáles habrá que modificar y cuáles habrá que sustituir por unos nuevos. Para ello, se desmontará la máquina original verificando el estado de cada una de las partes y rediseñando aquellas que necesiten modificaciones parciales o totales. Además se seleccionarán los nuevos componentes electrónicos de medida que se ajusten a las necesidades de precisión requeridas en los ensayos.
- Rediseñar, modelando nuevamente en CAD la máquina modificada, aquellas partes que lo requieran a partir de las decisiones tomadas tras la valoración del estado de cada una de las partes de la máquina de ensayos y la selección de los nuevos componentes.
- Realizar los planos de fabricación de las nuevas piezas y modificaciones.
- Determinar los pasos siguientes de actuación sobre la máquina para dejarla en perfecto estado cumpliendo las funciones para las que ha sido diseñada. Dentro de esta previsión estarían tareas como limpieza, engrase caras mecanizadas, pintado de caras sin mecanizar en piezas de fundición, montaje y ajuste de componentes, comprobaciones eléctricas y mecánicas, etc.
- Definir el control de la máquina donde tendrá que haber un software de medición, gestión de la medición y análisis de los resultados. Con él se controlará el giro del motor del sinfín, se capturarán los datos de lectura del palpador lineal de la posición de la corona, del encoder lineal de la posición del carro porta-sinfín y del reloj comparador de la altura de la corona para posteriormente procesar y poder graficar en pantalla los valores obtenidos durante los ensayos.

Paralelamente a los objetivos específicos de la primera parte se proponen los de la segunda parte:

- Desarrollar un protocolo de verificación que incluya tanto verificaciones mecánicas de las diferentes partes de la máquina como procedimientos de calibración que haya que realizar periódicamente para garantizar los resultados obtenidos en los ensayos.

- Desarrollar la caracterización metrológica de la máquina a partir de un patrón de rodadura determinando la incertidumbre en función de la variación de los diferentes parámetros.
- Relacionar, como punto innovador, los resultados obtenidos en los ensayos de rodadura con las tolerancias de montaje evitando posibles interferencias y anticipándose así a futuros problemas de funcionamiento.

1.2 Contexto y Antecedentes

Como elementos críticos de la mayor parte de sistemas mecánicos complejos, los engranajes deben ser elementos precisos tanto en su fabricación como en sus condiciones de operación definidas en última instancia en el correcto montaje y condiciones de mantenimiento de los equipos. Las especiales configuraciones geométricas de todas las variantes de engranajes dan lugar a máquinas y procedimientos de fabricación especiales y dedicados exclusivamente a su fabricación. Desde el tallado por generación o mediante cortadores, rectificado, afeitado y tratamiento superficial, toda la cadena de operaciones necesaria para obtener un engranaje a partir de su geometría nominal, requiere máquinas dedicadas, lo que da lugar a que las empresas fabricantes de engranajes estén altamente especializadas en este tipo de geometrías frente a las empresas de mecanizado general.

La verificación automática de engranajes en todas sus tipologías habituales: cilíndricos, cilíndricos helicoidales, cónicos, cónicos helicoidales, cónicos espirales, hipoides y reducciones sinfín-corona (ver Figura 1), por su complejidad geométrica, también se ha realizado tradicionalmente en máquinas dedicadas, normalmente fabricadas por los propios fabricantes de máquinas talladoras o rectificadoras de ruedas dentadas.

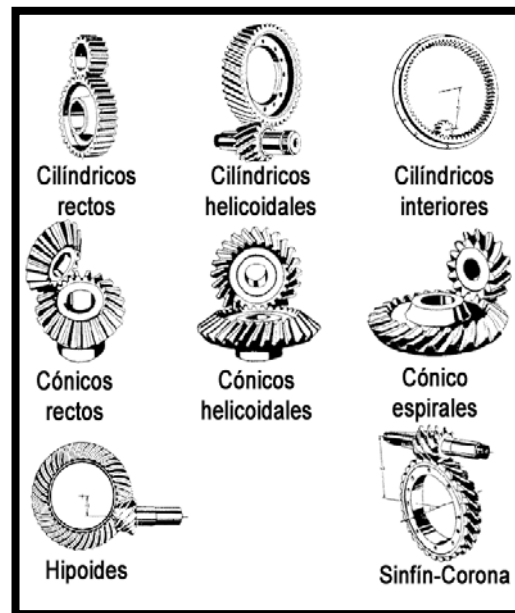


Figura 1 Tipos de engranajes

Existen varias alternativas a la hora de verificar una rueda dentada desde el punto de vista general. En primer lugar, las máquinas más habituales dedicadas a esta tarea son máquinas que verifican los parámetros geométricos de un engranaje mediante palpado por contacto con palpadores continuos (ver Figura 2) y ciclos de medición según el tipo de engranaje. Se trata de máquinas muy precisas, capaces de obtener la geometría de una sola rueda dentada en cada ciclo de medición.



Figura 2 Maquinas de medida de engranajes por palpado continuo

En la actualidad, como segunda opción, las máquinas de medir por coordenadas (MMC) tradicionales, comienzan a incorporar algún ciclo de medición para verificar engranajes mediante la incorporación de una mesa giratoria sobre la bancada de la máquina (ver Figura 3). Tanto en hardware como en software, la medición de engranajes en MMC requiere elementos y módulos especiales que deben adquirirse por separado del

equipamiento estándar de la máquina. Tanto en precisión como en productividad, las máquinas dedicadas a medición de engranajes todavía superan en prestaciones metrológicas y versatilidad a las máquinas de medir por coordenadas, por lo que muy pocos fabricantes de engranajes dedican MMCs a la verificación, sino que optan por las máquinas dedicadas.

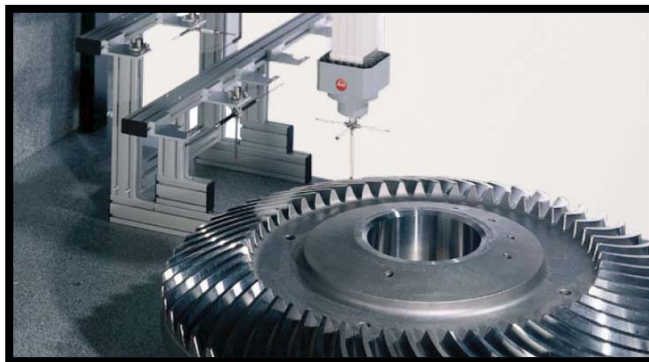


Figura 3 Maquinas de medir por coordenadas

En tercer lugar, otra de las formas de verificar la calidad de un engranaje es mediante ensayos de rodadura (ver Figura 4). Se trata de un procedimiento de medición especial que, a diferencia de la medición geométrica de una sola pieza por ciclo en las demás máquinas, permite obtener parámetros relacionados con las condiciones de operación del engranaje. Es precisamente esta característica lo que convierte a estas máquinas en la forma más directa de comprobar la calidad de un engranaje desde el punto de vista de sus futuras condiciones de funcionamiento.



Figura 4 Ensayos de rodadura a un flanco y a dos flancos

En este caso, la medición no es unitaria por palpado sino que se basa en enfrentar la rueda a comprobar con una rueda patrón conjugada de mayor calidad. Midiendo parámetros durante el giro de las ruedas, es posible obtener información de su calidad de rodadura y además, extraer de los resultados información geométrica de la rueda a comprobar en función del tipo de ensayo, por lo que tradicionalmente ha sido una de las

formas más habituales de comprobar la calidad de un engranaje, tanto en taller para la realimentación de verificación a fabricación como en laboratorio.

Existen, como se expone en el siguiente apartado de la presente memoria, dos tipos de ensayo de rodadura, denominados rodadura a un flanco y rodadura a dos flancos, muy similares aparentemente en configuración y resultado, pero que implican técnicas de medida diferentes y sobre todo interpretación de resultados diferente. De cada uno de estos ensayos se pueden extraer informaciones diferentes sobre la calidad y geometría de los engranajes y realizar extrapolaciones diferentes a las condiciones de funcionamiento reales.

Dadas las profundas diferencias tanto en geometría como en posicionamiento relativo de las ruedas según el tipo de engranaje, es habitual que las máquinas de ensayo de rodadura sean específicas para el tipo de engranajes que se desea fabricar, o que cubran únicamente el espectro de tipos de engranajes con colocación relativa de ejes similar. Además, dadas las diferencias entre los dos posibles ensayos descritos, las máquinas dedicadas a un tipo de ensayo y a otro son diferentes, fundamentalmente por motivos de diferente coste de los sensores de medida necesarios y requisitos mecánicos en cada uno de los dos casos, no existiendo equipos que integren ambos ensayos en la misma máquina.

Finalmente, dada la gran cantidad de geometrías diferentes de engranajes existen diversas tipologías de máquina dedicadas a mediciones de engranajes especiales o a determinados parámetros geométricos en función del tipo e interés del fabricante.

En concreto con esta máquina de ensayos de rodadura lo que se pretende y además se garantiza no solo que el 100% de los engranajes están bien dimensionalmente sino que además funcionarán correctamente. Este factor es muy importante a tener en cuenta ante la gran competitividad existente en el mercado ya que se logra un 0% de devoluciones y por lo tanto un muy alto grado de satisfacción entre los clientes.

Particularmente y a pesar del descenso de ventas en el sector del ascensor, ya que la fabricación casi exclusivamente se ha reducido a la parte de repuestos por el auge de los sistemas hidráulicos, la demanda de engranajes sinfín corona se va manteniendo debido al desarrollo de parques solares en los que para mantener una orientación adecuada de los paneles con respecto al sol se utiliza este tipo de transmisión-reducción.

En este contexto, este Trabajo de Fin de Master del Posgrado en Sistemas Mecánicos de la Universidad de Zaragoza “Retrofit de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona” está englobado dentro de un proyecto nacional CDTI para el desarrollo de máquinas de ensayos de rodadura. En él, el “Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación” del “Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación” de la Universidad de Zaragoza colabora con grupo de empresas de amplia experiencia en el sector del mecanizado de engranajes donde existe una necesidad indudable de garantizar cada uno de sus productos.

Debido al alto coste de estas máquinas tan precisas y específicas se ha decidido aprovechar una antigua existente y hacer una actualización para que modificando y añadiendo lo necesario cumpla su función: ensayo de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona.

Además esta máquina se va a utilizar como prototipo para validar las técnicas de caracterización de máquinas de ensayos de rodadura a dos flancos ya que no existe ninguna norma que nos lo defina. Este TFM no es más que el paso inicial del proyecto CDTI donde el objetivo global es desarrollar una máquina universal de ensayos de rodadura así como un procedimiento estándar de calibración para este tipo de ensayos en el ámbito de una tesis doctoral.

1.3 Descripción del Ensayo

1.3.1 Tipos de ensayos

Los dos posibles ensayos de rodadura existentes, denominados ensayo de rodadura a un flanco y ensayo de rodadura a dos flancos (también denominados tangencial compuesto y radial compuesto), tienen diferencias en la disposición de las piezas a medir, en los parámetros medidos y en la interpretación de los resultados. Las características de estos ensayos y sus diferencias, que determinarán la configuración necesaria de máquina son (ver Figura 5):

- En el ensayo de rodadura a un flanco dos engranajes se ruedan a la distancia nominal entre centros y en condiciones nominales de montaje (ángulo entre ejes y altura). Uno de los engranajes está accionado por un motor conduciendo al otro. Es necesario que el eje de la rueda conducida esté ligeramente frenada

(normalmente con pares de frenado entre 1 y 5 Nm en función de las dimensiones del engranaje) con objeto de que los flancos derechos o izquierdos estén permanentemente en contacto, evitando que la inercia separe la rueda conducida de la conductora falseando el resultado del ensayo.

- En el ensayo de rodadura a dos flancos, los engranajes se ruedan sin juego, es decir, a una distancia entre centros menor que la nominal. Es necesario que exista una fuerza en dirección radial que asegure que los flancos derechos y los izquierdos del engranaje estén simultáneamente en contacto durante todo el ensayo.

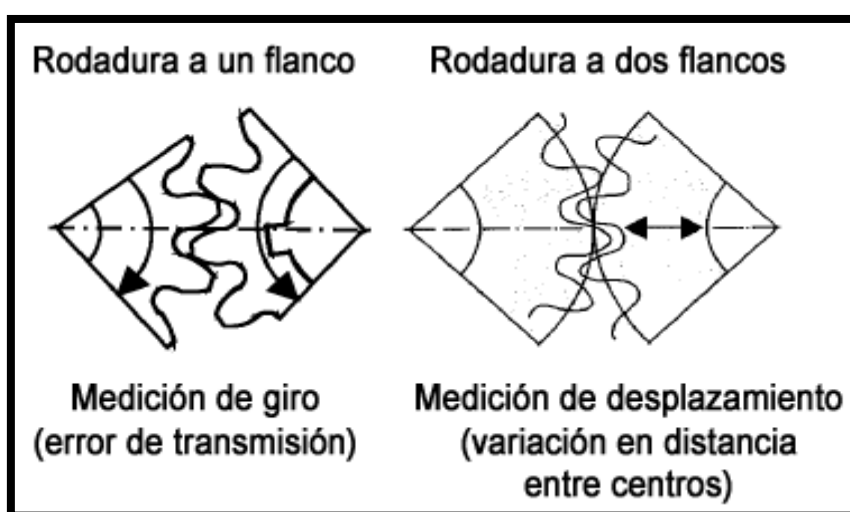


Figura 5 Magnitud medida en ensayos de rodadura a dos flancos.

Por tratarse de una técnica de medición indirecta, los resultados de medida están influenciados por varias desviaciones individuales del engranaje, que pueden sumarse o compensarse en los resultados, motivo por el cual únicamente pueden determinarse ciertas desviaciones individuales dependiendo del tipo de engranajes ensayados. De este modo el ensayo de rodadura a dos flancos refleja los cambios en la distancia entre centros.

Por motivos de coste, el ensayo más extendido es el de rodadura a dos flancos, aunque el ensayo que más información funcional sobre el engranaje proporciona es el ensayo a un flanco. Otro de los motivos por los que está más extendido el ensayo a dos flancos es su uso directo a pie de máquina, donde es posible comprobar de manera rápida excentricidad de tallado o fijación incorrecta de pieza, efectos de entrada y salida de fresa madre o muela y daños en algún diente.

1.3.2 Normativa Aplicada

Existen varias normas que recogen valores de tolerancias para evaluar la calidad a partir de los parámetros obtenidos en estos ensayos, como por ejemplo las DIN 3963, DIN 3974-1 y 3974-2, que se limitan a hacer una descripción de ambos sin entrar en detalle en definición clara de las magnitudes a obtener o condiciones de ensayo.

Son muchas menos las normas que hacen referencia a una descripción clara y concisa de los ensayos y en la mayor parte de las ocasiones, como la VDI 2608 o las AGMA 915-1-A05 y 915-2-A05, son recomendaciones y no descripciones recogidas en un estándar unívoco. Como consecuencia de estas circunstancias, en función de la región de aplicación habitual de una norma, la nomenclatura es diferente y la evaluación de los parámetros puede variar ligeramente. Por ello, es necesario que el software que acompaña a la máquina sea capaz de evaluar la calidad de los engranajes medidos según los estándares de tolerancia existentes, de modo que su aplicación no se limite a una zona geográfica y el tipo de evaluación pueda ser elegida por el cliente. Sería interesante incluir los datos de las diferentes normas como puedan ser DIN, AGMA, JIS, BSI, etc.

Por otro lado existe alguna recomendación sobre verificación de máquinas de rodadura, como la AGMA 935-A05, donde aparecen recogidos algunos procedimientos de verificación rápida basados en engranajes patrón y procedimientos específicos para algunas partes de la máquina, aunque no existe ningún procedimiento de calibración.

1.3.3 Ensayo de rodadura a dos flancos

En este ensayo, es posible rodar la rueda a comprobar contra un patrón (al menos 3 grados de calidad mayor) o contra un engranaje de producción. En el primer caso, el error medido es directamente achacable a la rueda a comprobar, mientras que en el segundo caso no es posible separar en su totalidad la contribución al error de cada uno de los engranajes, siendo además necesarias varios giros de la rueda a comprobar o incluso cambios en el ángulo inicial del ensayo de modo que sea posible comprobar si existe algún efecto de compensación del error. Con una sola medida contra un engranaje de producción, no es posible afirmar que si los parámetros del ensayo de rodadura a dos flancos están dentro de tolerancia, los engranajes son de la calidad correspondiente, ya que puede producirse una autocompensación de la excentricidad. Solo asumiendo que el

error de excentricidad del patrón es mucho menor que el error de excentricidad de la rueda a comprobar es posible achacar la mayor parte del error a esta última.

El aspecto externo tanto del ensayo como del resultado es en general muy similar al del ensayo a un flanco, aunque tanto el principio de medida, como la disposición de los engranajes, como la información que se puede extraer del resultado cambian. Los flancos derechos e izquierdos de un engranaje deben permanecer en contacto con los del otro. Para ello es necesario aplicar y mantener durante todo el ensayo presión radial sobre una de las ruedas una vez que se ha eliminado el juego entre los engranajes, para lo que se deben poner a rodar a una distancia entre centros menor que la nominal. Por lo tanto será necesario diseñar un mecanismo que mediante un muelle ejerza esta presión. Además, dado que se pretende que la máquina sea capaz de medir un rango amplio de módulos, es necesario que esta presión sea regulable con objeto de ajustar la presión al tamaño y material del engranaje a medir sin influenciar el resultado, mediante variación de la presión del muelle a través de cambios en su constante K a través de cambios en la longitud útil del muelle. En la Figura 6 se muestra el esquema básico de montaje de este ensayo.

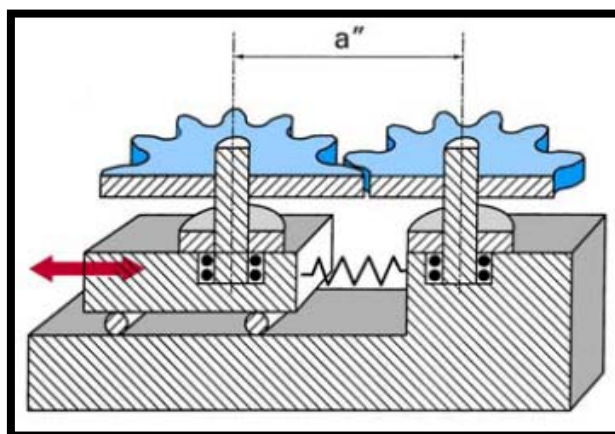


Figura 6 Ensayo de rodadura a dos flancos. Los engranajes se ruedan sin juego

La columna sobre la que se aplica presión no debe estar bloqueada, sino que debe ser capaz de realizar pequeños desplazamientos en dirección radial. Al rodar los engranajes sin juego, la excentricidad de la rueda a comprobar, o del conjunto de los engranajes dará lugar a desplazamientos en esta dirección. Este movimiento corresponderá en primer lugar a cada uno de los engranes de la rueda a comprobar, es decir, cada vez que un diente entre en contacto con su conjugado y complete su línea de

acción, la columna tendrá un desplazamiento de ida y vuelta respectivamente. Este movimiento de vaivén, estará además modulado por la excentricidad de la rueda, normalmente debida a tallado excéntrico por sujeción incorrecta de la pieza en la máquina. En este caso no se mide el giro de ambas ruedas sino que se mide el desplazamiento de la columna. Para ello, se utilizará un palpador lineal. Dado que las tolerancias indicadas en las tablas de las normas mencionadas para las mejores calidades de rodadura están en el orden de los micrómetros, se escogerá un palpador con precisión de al menos $\pm 0,5 \mu\text{m}$ para un rango de trabajo de al menos 5 mm. Representando las medidas obtenidas para el desplazamiento de la columna en una vuelta del engranaje se obtiene el diagrama representado en la Figura 7.

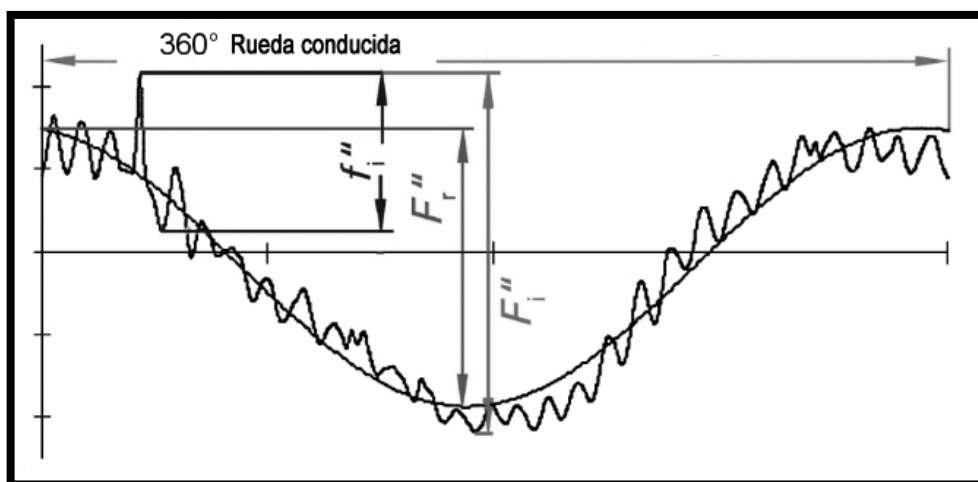


Figura 7 Ejemplo de resultado de ensayo de rodadura a dos flancos

Respecto a la distancia entre centros sin juego a'' , representando el desplazamiento de la columna, se definen los siguientes parámetros del ensayo a dos flancos:

- Error compuesto radial (a dos flancos) F_i'' : Es la diferencia entre el máximo y mínimo valor obtenido de las lecturas de variación de distancia entre centros.
- Error compuesto radial diente a diente f_i'' : Es la mayor variación de la distancia entre centros que se localiza dentro de un periodo correspondiente a un engrane, es decir, a un paso.
- Error compuesto radial diente a diente de alta frecuencia u onda corta f_k'' : Es la componente de alta frecuencia del resultado del ensayo de rodadura a dos flancos. Al igual que en el ensayo a un flanco, este parámetro proviene de la

descomposición del resultado en sus componentes de alta y baja frecuencia mediante la transformada de Fourier.

- Error compuesto radial de baja frecuencia ó Fr'' : Es la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de la componente de baja frecuencia de Fi'' .
- Excentricidad fe : Amplitud de la componente de baja frecuencia.

El ensayo de rodadura a dos flancos ofrece información suficiente sobre el efecto de las desviaciones individuales de cada diente y permite establecer la calidad de rodadura, así como detectar rápidamente problemas de fabricación o desajustes, o posicionamiento incorrecto en las máquinas de tallado. Es posible determinar profundidad de diente incorrecta, excentricidad de tallado y ángulos de presión incorrectos, de modo que si el ángulo de presión difiere del nominal, es posible detectar tendencias periódicas en la componente de alta frecuencia del ensayo, siendo además su amplitud proporcional a la desviación del ángulo de presión.

1.3.4 Descripción de la máquina

En el presente TFM se pretende rediseñar una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín corona, aplicando la normativa del apartado anterior. Para ello habrá que determinar qué componentes y piezas se mantendrán, cuáles se modificarán y cuáles habrá que sustituir por unos nuevos, partiendo de la base de aprovechar lo máximo de la máquina de origen.

Tal y como está planteado este proyecto se va a mantener la estructura básica de la máquina y su filosofía de funcionamiento por lo que sus partes fundamentales son las siguientes:

- Bancada (1): siendo la estructura base de la máquina está hecha en fundición de acero y cuenta con unas guías prismáticas dispuestas longitudinalmente de un lado a otro. Su función principal es la de dar rigidez y soporte al resto de elementos. Los elementos que nos podemos encontrar (ver Figura 8) sobre ella son:
 2. Husillo y volante de posicionamiento del carro porta-sinfín.
 3. Encoder lineal encapsulado de medición de posicionamiento del carro porta-sinfín.

4. Tope mecánico del carro porta-sinfín sobre el cuál también están los rodillos de apoyo de la columna soporte corona.
5. Sistema de regulación de presión del muelle de la columna soporte corona sobre el que está colocado el palpador lineal de medición de desplazamiento de la columna soporte corona.

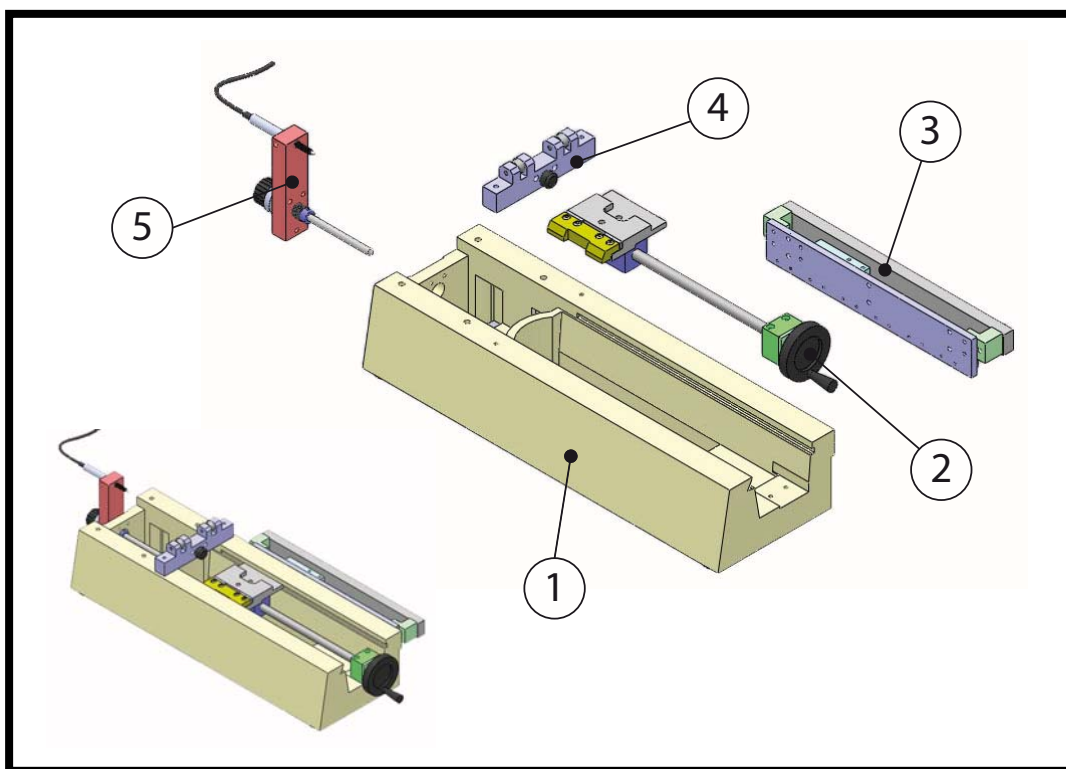


Figura 8 Bancada y sus elementos

- Carro porta-sinfín: deslizará sobre las guías prismáticas de la bancada y posicionará el eje sinfín patrón a la distancia nominal sobre la corona. El posicionamiento y bloqueo se realiza manualmente mediante volante y husillo con un encoder lineal asociado al carro que garantiza su posición. La distancia mínima nominal entre centros es de 40 mm y el desplazamiento máximo será de unos 210 mm. Además el eje sinfín hará de eje motriz. En el ensayo dicho sinfín se coloca entre puntos y es arrastrado mecánicamente a partir de un moto-reductor de precisión con capacidad de giro controlado por un encoder angular. Los elementos que lo componen son (ver Figura 9):
 6. Base carro porta-sinfín construida en fundición de acero que incorpora unas guías prismáticas rectificadas para jugar con diferentes longitudes de sinfines patrón.

7. Soportes porta puntos que fijados mediante maneta y teja se posicionan sobre la guía de la base en función del sinfín patrón empleado.
8. Punto motriz que produce a partir de un motorreductor con parámetros controlados y una transmisión por engranajes cilíndricos de dientes rectos el arrastre necesario al sinfín patrón para realizar el ensayo de rodadura.
9. Punto fijo sobre el que apoyamos el otra lado del sinfín y garantiza la perpendicularidad con el eje de la corona.
10. Posicionador central de bloqueo para garantizar que las mediciones del ensayo se realizan sin movimiento alguno del carro porta-sinfines.
11. Pieza de unión y arrastre a encoder lineal.
12. Guía de arrastre que además de asegurar que el desplazamiento de todo el conjunto sea paralelo a las guías sirve, debido a su forma, de elemento de arrastre.

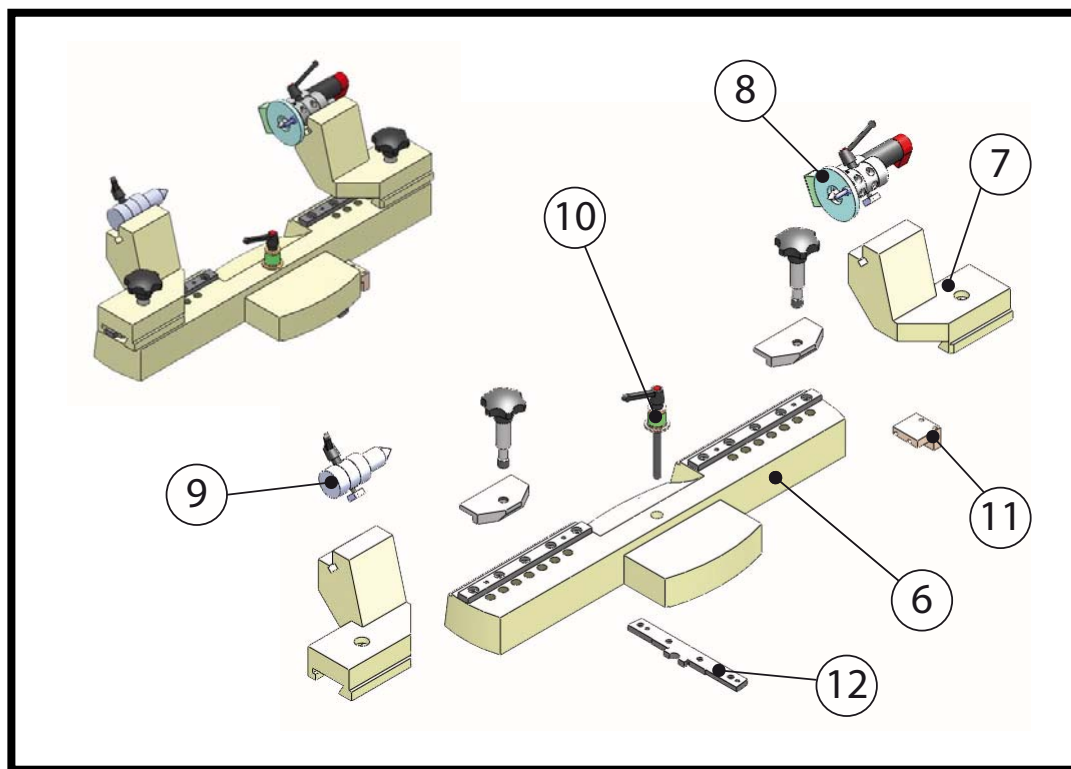


Figura 9 Carro porta-sinfín y sus elementos

- Columna soporte corona: parte cuasi-fija de la máquina en donde se coloca la corona a verificar. En ella existe un sistema de muelles regulables, se puede modificar la constante “k” en función del tamaño de engranaje a medir, que permite realizar la fuerza axial necesaria para vencer el juego de los engranajes en

el ensayo garantizando así el contacto continuo entre los dientes. El rango de desplazamiento máximo es aproximadamente de 5 mm y será un palpador lieneal el que determine las desviaciones que sufre al producirse el movimiento de rodadura. Los elementos que componen esta columna son (ver Figura 10):

13. Base sobre la que se incorporan el resto de sistemas y que sirve de elemento de unión a la bancada.
14. Sistema de regulación de altura que permite alinear el plano medio del tallado de la corona con el eje del sinfín patrón. En él podemos encontrar:
 15. Sistema de regulación propiamente dicho
 16. Sistema de medición de altura
 17. Columna guía
 18. Utillaje intercambiable para coronas a ensayar
19. Sistema elástico regulable que garantiza el contacto continuo durante todo el ensayo.
20. Palanca de retroceso y bloqueo de la columna en el momento de colocar en la distancia nominal el sinfín.

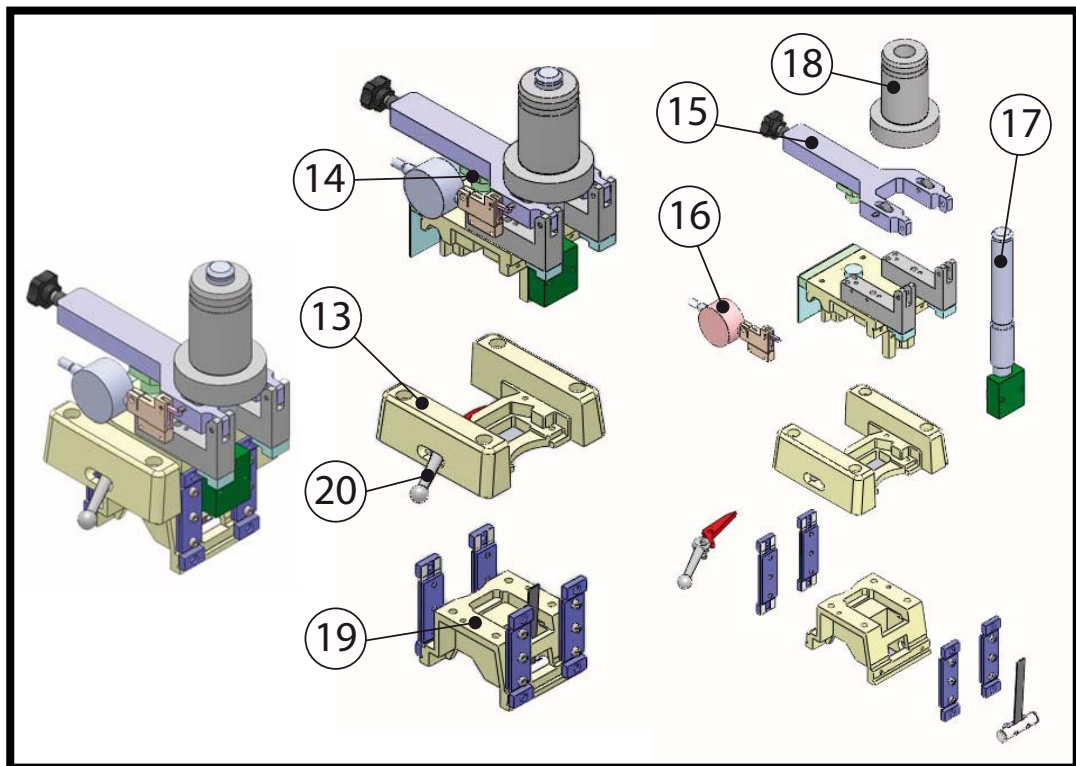


Figura 10 Columna soporte corona y sus elementos

Además todos los elementos electrónicos de medición se controlan desde un PC industrial en el que se instalará el software de control, medida, corrección y trazabilidad tal y como se indica en el apartado apartado 2.7.

1.3.5 Descripción del funcionamiento de la máquina

Para ver el funcionamiento de la máquina basta con explicar paso a paso la realización de un ensayo. En primer lugar, habrá que asegurarse de que no vaya a haber ningún tipo de interferencia a la hora de montar la corona, alejando el carro porta-sinfín de la columna lo máximo posible actuando sobre el husillo. Por otro lado la columna deberá estar a su vez en la posición más alejada, siendo esta la de bloqueo del muelle. Para ello actuaremos sobre la palanca lateral de la columna (ver Figura 11). Una vez que nos hemos cerciorado de todo esto el siguiente paso es seleccionar el tamaño de engranaje a ensayar. Esta selección la podremos hacer bien introduciendo directamente los datos o bien creando una base de datos de los modelos estándar a utilizar.

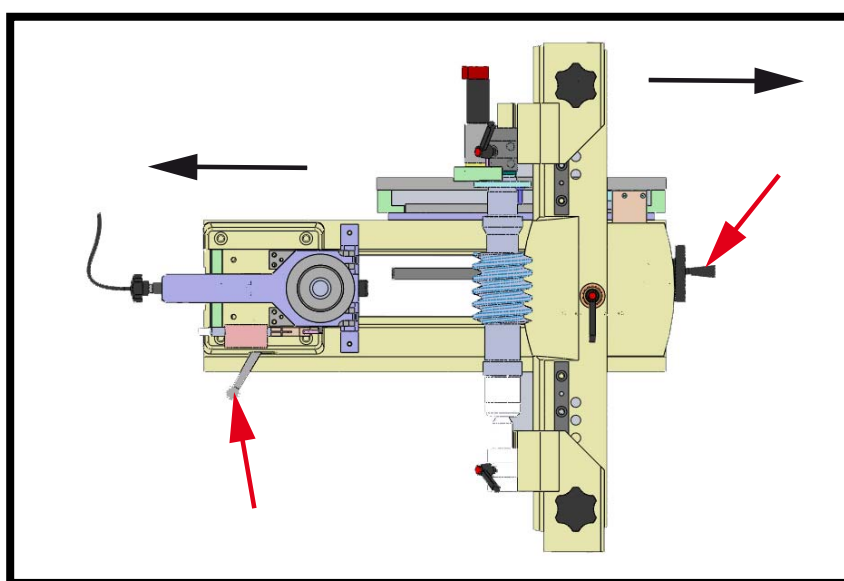


Figura 11 Posición carga sinfín y corona

Con todo dispuesto y con el procedimiento de calibración del sinfín patrón realizado según, el apartado 3.2, colocaríamos la corona a verificar sobre el utillaje que a su vez va montado sobre el eje de la columna. Girando el volante del husillo desplazaríamos el carro porta-sinfín hasta la posición que se nos indica por pantalla y que es la distancia nominal entre centros. En esta posición bloquearíamos el carro para

posteriormente actuando sobre la palanca de la columna liberándola y asegurando así el contacto continuo entre los dientes engranados (ver Figura 12).

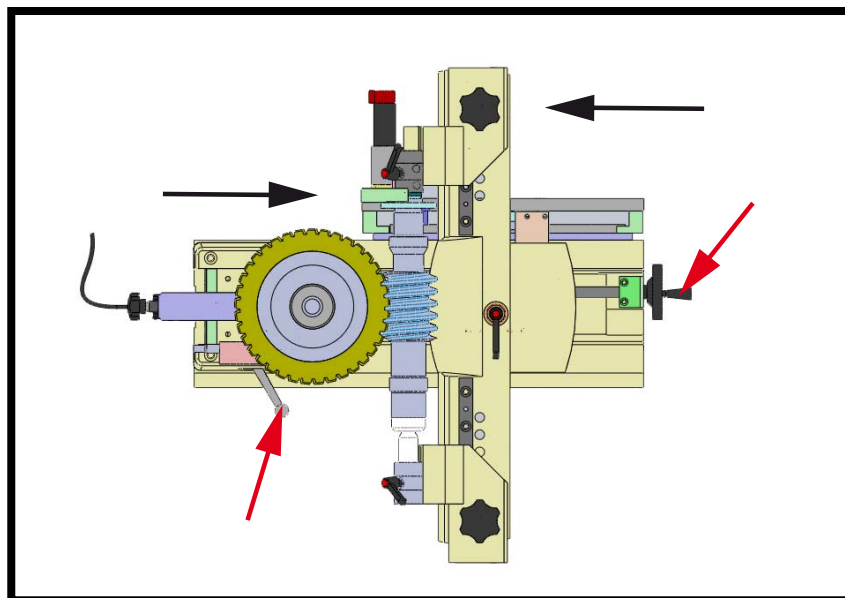


Figura 12 Posición distancia entre centros nominal

Por último y actuando sobre el sistema de regulación de altura buscaríamos aquella posición en la que la distancia entre centros sea la mínima, garantizando así que el eje sinfín está en el mismo plano que el plano medio del tallado de la corona (ver Figura 13).

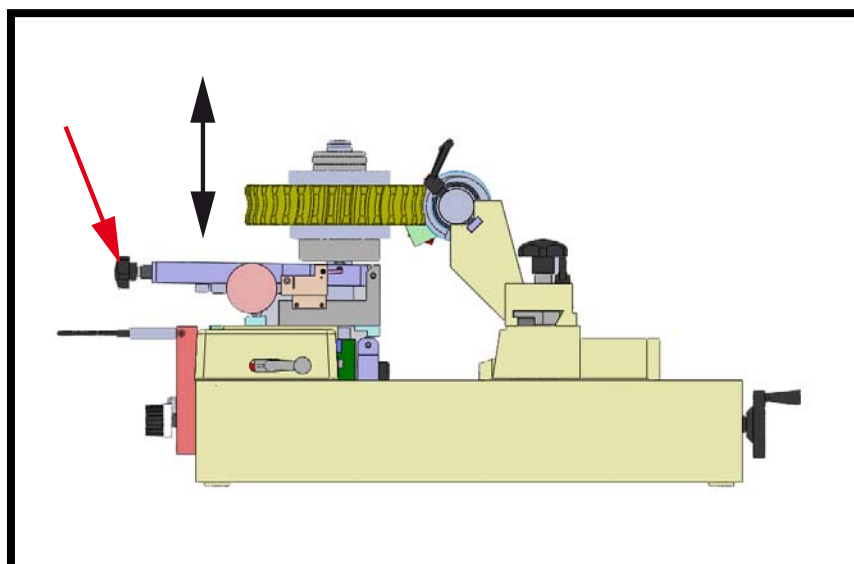


Figura 13 Regulación altura corona

Con todo dispuesto y comprobando que no hay ningún mensaje de error en pantalla, le damos marcha a la máquina realizando así el ensayo. Este consiste simplemente en medir el desplazamiento que sufre la corona en sentido perpendicular al eje del sinfín al girar una vuelta completa y registrar cada uno de los valores. Como el sinfín es un sinfín patrón, con error conocido, de calidad tres veces la calidad de la corona a medir podemos achacar toda la excentricidad y los posibles defectos a esta última.

Por último habrá que comparar las desviaciones máximas medidas con las máximas permitidas aceptando o desechando la corona para su venta. Para ello tendremos que descomponer el resultado en sus componentes de alta y baja frecuencia mediante la transformada de Fourier (ver Figura 14) determinando que parte de error es debido a la excentricidad del eje y que parte es debido al error del tallado de los dientes.

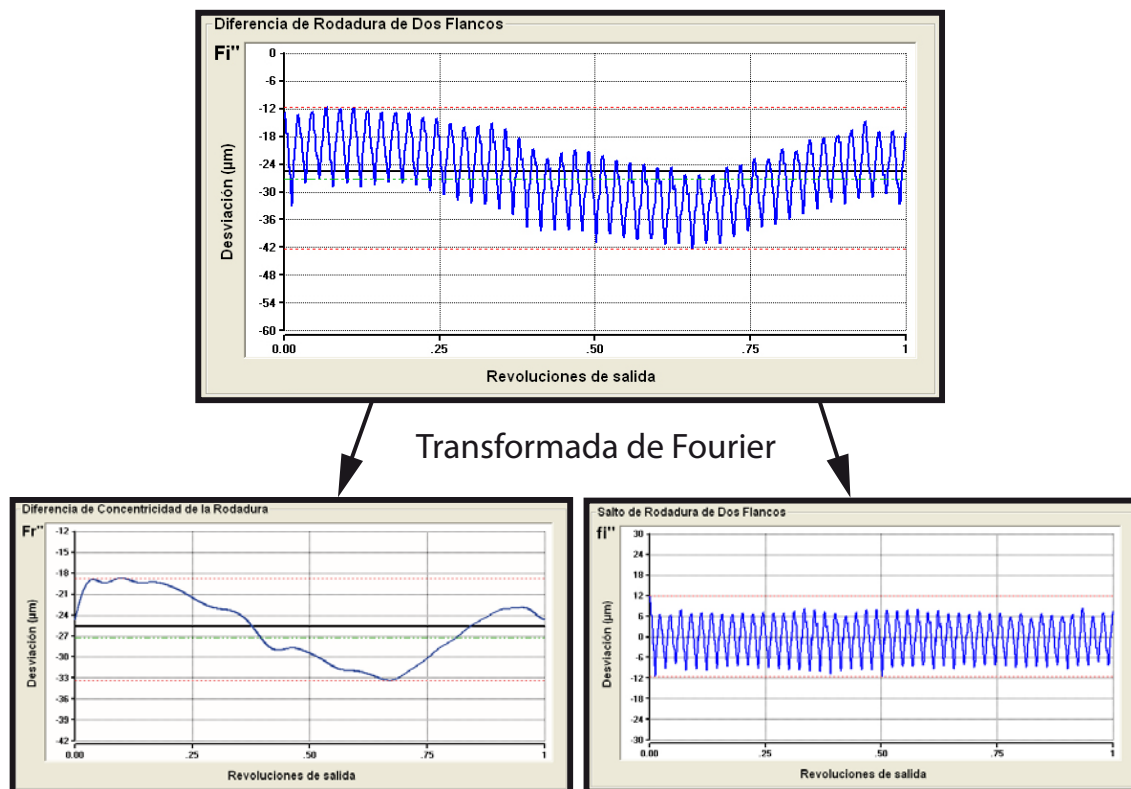


Figura 14 Ejemplo graficas resultantes

2 DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se describe como ha sido la evolución del proyecto y las fases por las que se ha ido desarrollando. En una primera fase se ha definido como era en origen la máquina y en que estado se encontraba, haciendo una valoración inicial, desmontando, midiendo, croquizando y modelándola en 3D. En una segunda fase se han propuesto una serie de modificaciones y de nuevos componentes y piezas, una vez comprobada en profundidad, rediseñando aquellas partes que lo han requerido. En una tercera fase se ha determinado la actuación sobre la máquina, entrando con los temas de limpieza y puesta a punto, montaje, ajuste y puesta en marcha. Además se incluye la descripción del esquema eléctrico de funcionamiento, la estructura que tendrá el software de control y las directivas de seguridad en máquinas que debe de cumplir.

2.1 Valoraciones previas

Antes de realizar ninguna actuación y con la máquina original completamente montada se hace una valoración previa de las posibles modificaciones a realizar. Se observan diferentes holguras y desperfectos de varios componentes, por lo que algunas de estas modificaciones están bastante claras, pero en cambio otras se determinarán una vez desmontada la máquina y realizadas ciertas comprobaciones.

Lo primero que se observa es que cuando se bloquea el carro porta-sinfín para realizar el ensayo no queda fijo en el punto que queremos sino que queda en un punto muy cercano pero al azar, es decir no existe una repetibilidad (ver Figura 15). Esto es debido al excesivo juego entre la bancada y el carro. Este diseño original no nos vale porque necesitamos poder bloquear el carro justamente en la posición a la distancia nominal entre centros de los engranajes a medir. Esta posición tiene que ser precisa y repetible para una adecuada lectura del encoder lineal .



Figura 15 *Detalle guías prismáticas bancada, husillo y volante*

Aparentemente el estado del volante y husillo que proporciona el desplazamiento del carro porta-sinfín a lo largo de la bancada parece bastante bueno, aunque será objeto de estudio la pieza que une la tuerca del husillo con el carro transversal porque hace la vez de deslizadera y bloqueo. Las superficies y guías del carro transversal también parecen estar en buen estado una vez limpias y engrasadas. También parece que se podrán aprovechar el punto y el contrapunto con su correspondiente sistema de arrastre. Las ruedas dentadas de tracción del sistema motriz parecen no haber sufrido gran desgaste, aún así como el sistema motor hay que cambiarlo puede que sufran alguna modificación (ver Figura 16).



Figura 16 *Sistema motriz con punto de arrastre*

En cuanto al carro porta-coronas, se observa que el reloj comparador que determina la altura del sistema habrá que cambiarlo porque está estropeado. El resto de elementos: el sistema de regulación de altura, el regulador de la presión de los muelles y el bloqueo del movimiento parece que funcionan correctamente (ver Figura 17). No está claro como se consigue una regulación tan precisa en un sistema de muelles por lo que habrá interesarse especialmente por el diseño de este sistema.



Figura 17 Sistemas de regulación de altura y bloqueo

Por todo ello habrá que comprobar el estado de las guías de la bancada por si hubiese que mecanizar alguna de las superficies o incluso añadir algún tipo de guía externa. También se prestará especial interés en el rediseño de la pieza que sirve de guía al carro transversal situada en la parte inferior, que es la que desliza y bloquea a lo largo de la bancada (ver Figura 18). Asimismo habrá que desmontar y verificar en la medida de lo posible rodillos, guías, engranajes y piezas con superficies mecanizadas que sean susceptibles de modificaciones o cambio debido a su funcionalidad. Igualmente todos aquellos elementos, piezas, conjuntos y/o componentes que se vayan a reutilizar tendrán que ser desmontados, limpiados, engrasados y/o pintados.



Figura 18 *Pieza quía carro*

Se va a hacer una selección de los tres sistemas electrónicos de control y lectura de medida: el encoder lineal del carro porta-sinfín, el palpador lineal del carro portacorona y el motorreductor con encoder angular de la tracción del eje sinfín, de acuerdo con las necesidades que se observen oportunas para la operatividad de esta máquina de ensayos. Estos componentes se van a poner completamente nuevos para garantizar su funcionamiento ya que no hay garantías que los originales lo hagan correctamente o se disponga de los drivers y/o repuestos adecuados.

2.2 Toma de medidas

Se ha intentado, pero sin éxito, localizar algún tipo de documentación original de la máquina. No existe o no se ha encontrado por lo que el paso previo al primer objetivo específico, “modelar en CAD la máquina original”, pasa por desmontar y croquizar la máquina pieza por pieza.

2.2.1 Desmontaje

El desmontaje pieza a pieza hay que realizarlo con mucho cuidado al tener que ir a ciegas. Por un lado, no se debe estropear ninguna de las piezas o elementos originales por si se vuelven a emplear. Por otro lado, habrá que ir anotando y fotografiando la posición correcta de cada uno de ellos para su posterior montaje (ver Figura 19)



Figura 19 Imágenes de varios componentes desmontados

2.2.2 Croquización

Al no disponer de ningún tipo de documentación técnica, ni si quiera de ningún plano, no hay otra alternativa que medir y croquizar a mano alzada cada uno de las piezas. Esta operación tiene especial importancia por lo que hay que ser muy riguroso en la toma de medidas tanto de cada una de las piezas como del lugar que ocupan en el ensamblaje.

Los instrumentos de medida (ver Figura 20) que se han utilizado han sido:

- Pie de rey: para pequeñas dimensiones con cierta precisión (hasta $150 \pm 0,05$ mm)
- Micrómetro: para pequeñas dimensiones con mayor precisión ($\pm 0,005$ mm)
- Flexómetro: para grandes dimensiones generales con poca precisión (± 1 mm)
- Bloques patrón: como elementos de apoyo en mediciones con precisión ($\pm 0,005$ mm)
- MMC: para grandes dimensiones con mucha precisión ($\pm 0,0025$ mm en todo el volumen de medición).

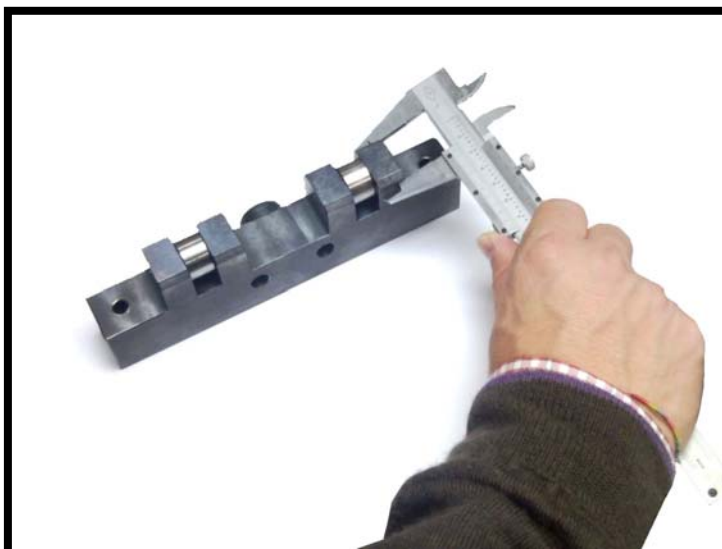


Figura 20 Ejemplo medición con pie de rey

Toda esta información esta recogida en el ANEXO I que se adjunta al final de este TFM, no obstante veamos algún ejemplo (ver Figura 21):

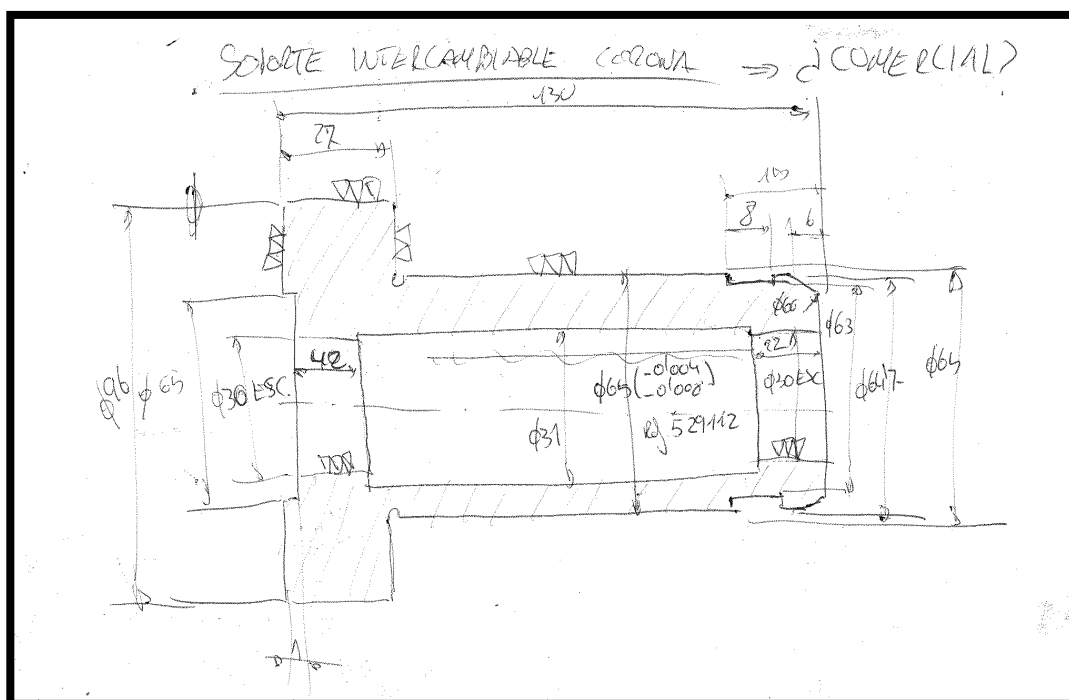


Figura 21 Ejemplo de piezas croquizadas a mano alzada

2.3 Modelado CAD inicial

Tras una laboriosa etapa inicial de toma de medidas indicada en el punto anterior, el siguiente paso es el modelado CAD. En este proyecto se ha empleado SolidWorks, un software de modelado sólido en 3D de tipo paramétrico. El proceso es similar a como si estuviésemos fabricando la máquina. Hay que ir modelando uno a uno los componentes por individual y ensamblarlos finalmente en un archivo donde se relacionan los elementos entre sí (ver Figura 22). En este caso el resultado tiene que ser igual al punto de partida que es la máquina original para poder realizar el rediseño en una fase posterior.

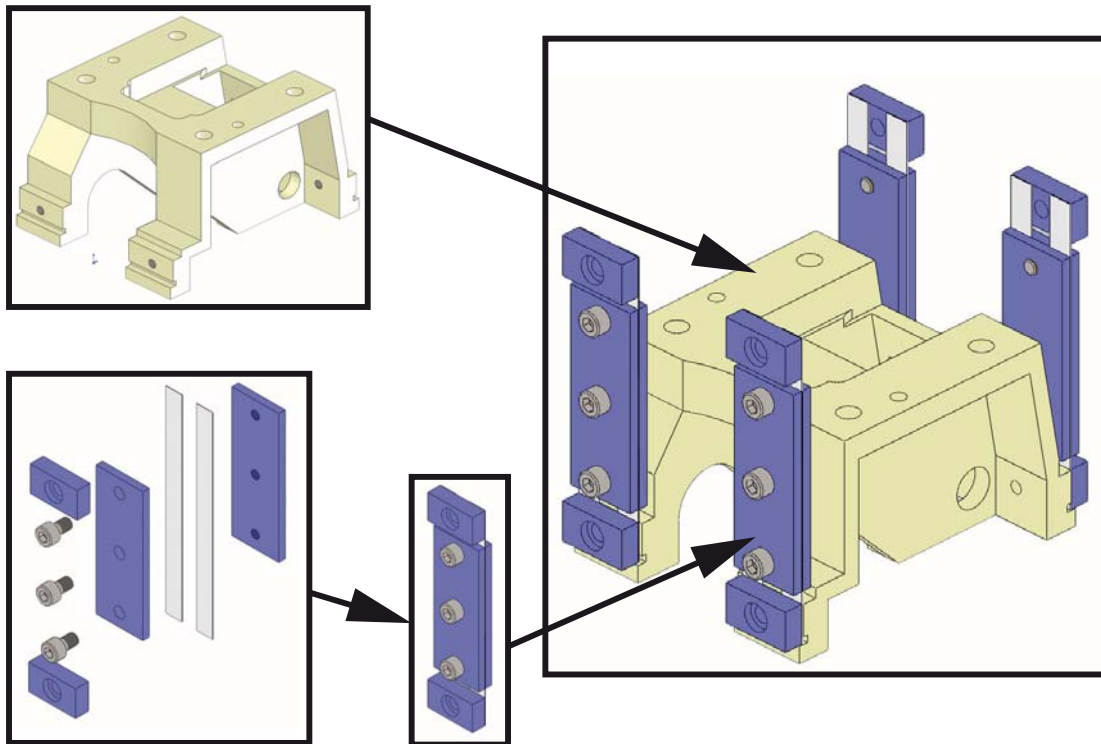


Figura 22 Proceso ensamblaje modelado

Durante el modelado y ensamblado tenemos que comprobar que las medidas tomadas directamente de la máquina concuerdan con lo que se modela, es decir habrá que comprobar que todo encaje en su sitio sin que haya interferencias o incongruencias tanto en el montaje como en el funcionamiento para que se ajuste completamente a la realidad (ver Figura 23).

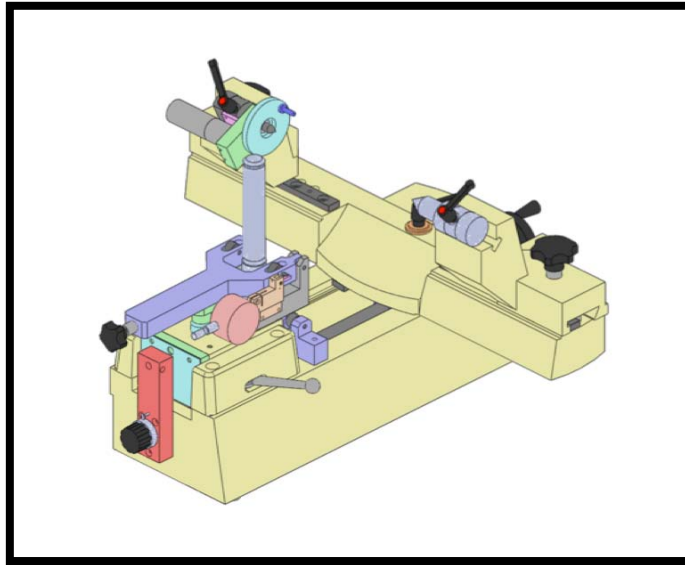


Figura 23 Modelado sólido en SolidWorks de la máquina original

2.4 Propuestas retrofit

Como segundo objetivo específico y antes de comenzar con el rediseño y retrofit de la máquina, habrá que determinar el estado y funcionamiento de cada una de las piezas, conjuntos y/o componentes. Una vez valorados estos aspectos se decidirá como actuar con lo existente y que nuevos elementos se incorporarán para que su funcionamiento sea el óptimo.

2.4.1 Comprobaciones realizadas

Veamos en cada una de las partes de la máquina que comprobaciones y mediciones se han realizado aportando una información imprescindible para decidir como actuar (numeración según apartado 1.3.4):

2.4.1.1 Bancada y sus elementos

Lo que más interesa desde un principio es medir y verificar el estado de las guías prismáticas de la bancada (1), ya que dependiendo de su resultado el punto de partida del rediseño sería completamente distinto en cada uno de los casos.

En primer lugar se comprueba visualmente que no hay desgaste aparente sobre las superficies de deslizamiento, ni en las guías prismáticas.

En segundo lugar y mediante galgas patrón se verifica el paralelismo existente entre dichas guías. Tras la medición se determina que el paralelismo tiene una incertidumbre de $\pm 0,005$ mm (ver Figura 24).

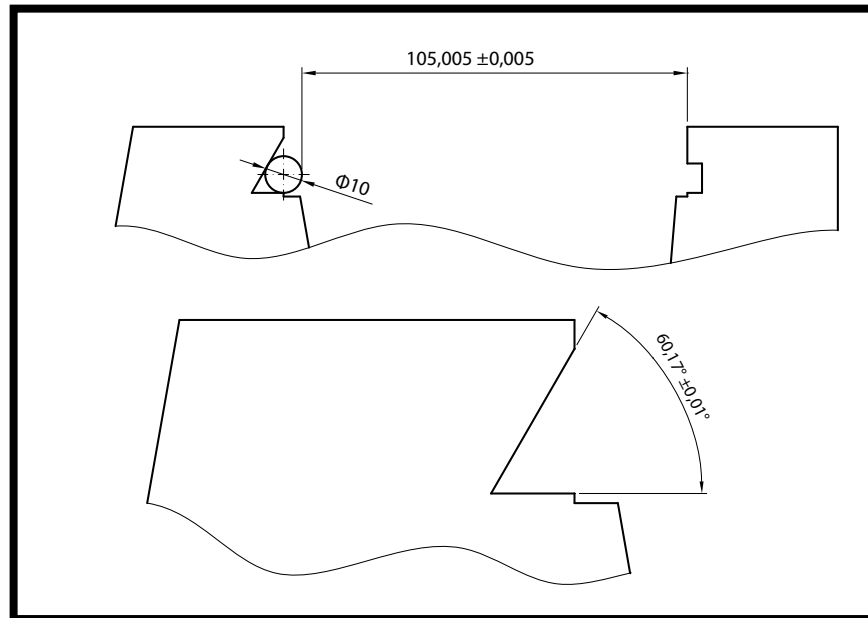


Figura 24 Valores medición guías bancada

En tercer lugar se comprueba dimensionalmente el ángulo de la guía inclinada poniendo la bancada sobre una MMC y palpando varios puntos (ver Figura 25). El ángulo medio obtenido es de $60,170^\circ$ medida a tener en cuenta a la hora de determinar las cotas y tolerancias de las nuevas piezas a diseñar.



Figura 25 Medición de ángulo en MMC

Seguidamente se comprueba que no existe juego entre la tuerca y el husillo (2) que posiciona el carro porta-sinfín y que el rodamiento, situado junto al volante, funciona a la perfección. Será objeto de nuevo diseño y fabricación la pieza que sirve de guía y de arrastre ya que la original no garantiza una repetibilidad en el posicionamiento cuando bloqueamos el carro porta-sinfín, como se vio desde un principio.

Como se ha indicado anteriormente el encoder lineal (3) se va a sustituir por uno nuevo y una vez hecho el rediseño se determinarán si las piezas existentes se podrían modificar para aprovecharlas o por el contrario hay que fabricarlas nuevas. Cabe destacar que se pretende mantener el diseño de funcionamiento del desplazamiento del lector (parte móvil) el cual está montado sobre un rodamiento lineal que minimiza el error en el desplazamiento longitudinal. El estado del rodamiento es bueno por lo que se aprovechará el mismo y no habrá que cambiarlo.

En el tope mecánico (4), tras la limpieza, se comprueba el buen estado tanto de los rodillos donde se apoya la columna soporte corona como del propio tope.

Por último todas las partes del sistema de regulación (5) de presión del muelle (maneta, eje, muelle de platillos, etc) también están en muy buen estado. Girando la maneta va variando progresivamente la posición y no se observa ninguna particularidad por lo que en principio no sufrirán modificación alguna.

Sobre la base de este sistema de regulación está montado el palpador lineal que es el que tiene que registrar todas las variaciones entre centros que sufre la corona al realizar el ensayo. Como el resto de elementos de medida también se va a sustituir por uno nuevo.

2.4.1.2 Carro porta-sinfín

Igual que en la bancada, también es muy importante medir y verificar el estado de las guías y superficies mecanizadas de la base del carro porta-sinfín (6) por donde deslizan los soportes de los puntos de centraje del sinfín. Se observa que todo está en muy buen estado a falta de limpiar alguna zona donde ha aparecido algo de oxido.

También se observa que tanto las superficies mecanizadas de los soportes porta puntos (7) como los elementos de fijación de estos (maneta y teja) no necesitan más que limpieza y engrase.

Los puntos donde se coloca el sinfín patrón, uno fijo (9) y el otro motriz (8), también están en buenas condiciones y se van a poder aprovechar. En función de las dimensiones del nuevo motorreductor que es el que genera el arrastre para girar el sinfín se verá si hay que hacer o no nuevas piezas tanto para sujetar este, como para transmitir el par generado.

Se ha medido la guía de arrastre (12) (ver Figura 26) y tomando estos valores como referencia se rediseñará todo el sistema de arrastre para ajustarlo, quitando todo tipo de juegos y asegurando la repetibilidad de posicionamiento del carro.

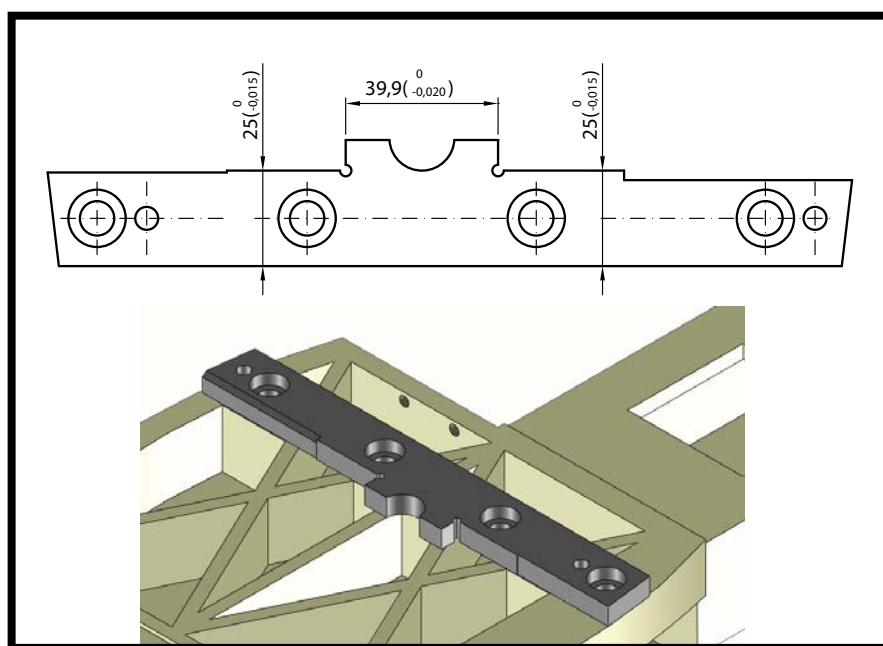


Figura 26 Pieza de arrastre del carro porta-sinfín

Una vez que se rediseñe la máquina incluyendo todas las modificaciones y nuevos componentes incorporados se determinará si tanto el posicionador de bloqueo (10) como la pieza de unión del carro (11) con el encoder lineal serán modificados o sustituidos por otros nuevos que se adapten a las necesidades.

2.4.1.3 Columna soporte corona

La base de la columna soporte corona sobre la que se incorporan el resto de sistemas y que sirve de elemento de unión a la bancada es una pieza de fundición que contiene una serie de superficies mecanizadas que tras su limpieza y engrase quedarán a la perfección.

Una vez desmontado todo el sistema de regulación de altura (14) (ver Figura 27) y verificarlo hay garantías de que funcionará adecuadamente ya tanto el muelle como la guía interna están en perfecto estado.

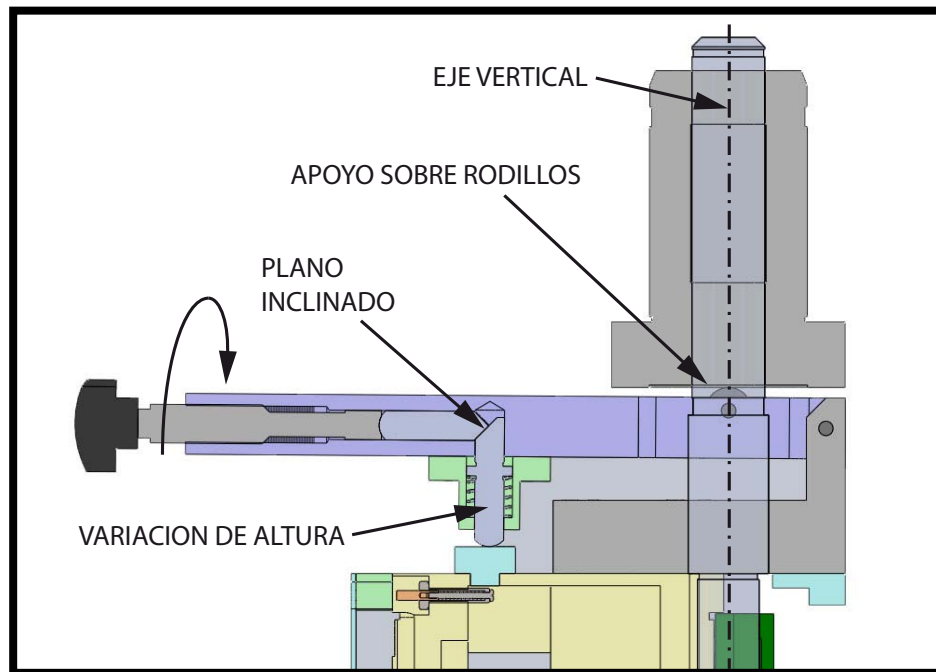


Figura 27 Detalle funcionamiento sistema regulación de altura

De igual manera el mecanismo que nos permite medir la altura (16) a la cual se encuentra la corona, también funciona correctamente. En cambio, no sucede lo mismo con el reloj comparador que como ya se observó en un primer momento está estropeado y habrá que cambiarlo por uno nuevo de características similares.

No se observa ningún deterioro tanto en la columna guía (17) como en los casquillos intercambiables (18) (útiles intercambiables) habiendo un mínimo juego cuando se ensamblan ambos. Este aspecto es de vital importancia para que no existan grandes errores de medida iniciales achacables al sistema antes de realizar ningún ensayo. No obstante una vez montada toda la máquina se comprobará la perpendicularidad y planitud del sistema.

El sistema elástico regulable (19) (ver Figura 28) que garantiza el contacto continuo durante todo el ensayo ha resultado ser una maravilla. Lo que en un principio se pensaba que era un sistema de muelles vulgar y corriente, donde no estaba claro como podía tener ese movimiento tan suave y graduable, ha resultado ser un sistema que aprovecha la elasticidad de unas láminas de acero trabajando a flexión. Con este desarrollo es

posible cambiar la “fuerza del sistema” simplemente dándole mayor o menor resistencia al movimiento del conjunto empujando con otra lámina de acero más gruesa pero también deformable a flexión.

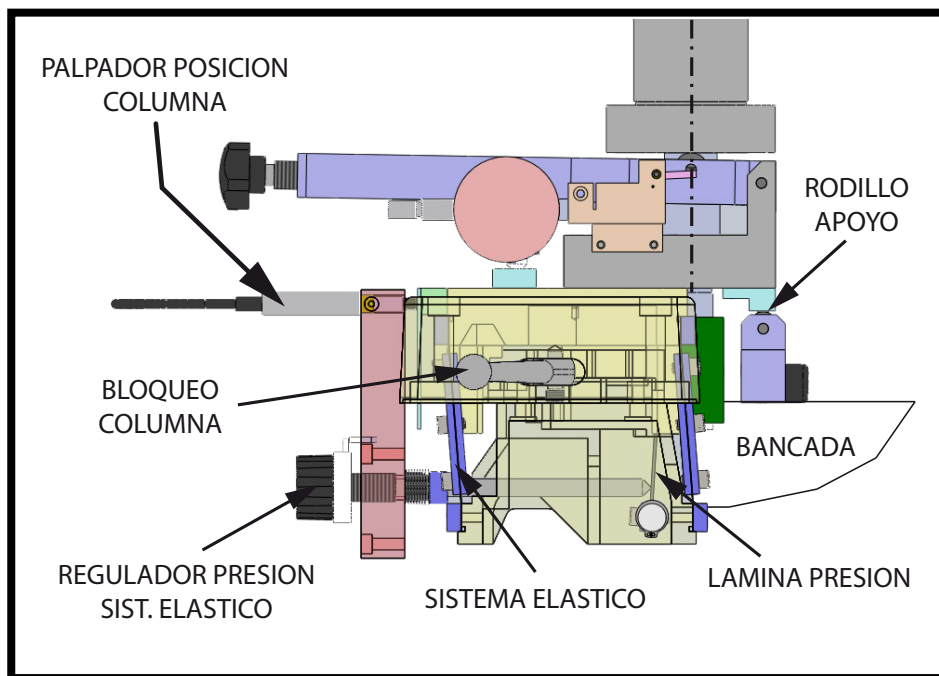


Figura 28 Detalle sistema elástico movimiento columna

Por último la palanca y la leva (20) que hace retroceder y bloquear en esta posición la columna no presentan incidencia alguna por lo que con una simple limpieza y engrase será suficiente para su puesta a punto.

2.4.2 Selección de nuevos componentes de medida

Como la máquina a actualizar es relativamente antigua lo que se determinó desde el principio fue que los elementos de medida fuesen nuevos. Con esto evitamos que puedan tener algún fallo que a priori es inapreciable y además no depender de posibles recambios, software o drivers obsoletos difíciles de encontrar.

A la hora de decidir sobre que componente elegir habrá que tener en cuenta diversos factores. Todos y cada uno de los componentes deberá de adaptarse a las necesidades del proyecto cumpliendo los siguientes criterios de selección:

- A pesar de que existan infinitud de productos de gran calidad en el mercado, solo se valorarán ofertas de componentes relativamente conocidos empleados en otros proyectos, es decir que se tenga cierta fiabilidad del fabricante o marca.

- Con esta primera premisa, el requisito fundamental para todos ellos es, como resulta evidente, que midan dentro de los rangos establecidos con las precisiones y resoluciones mínimas establecidas.
- Evidentemente y como punto importante será el coste. Tendrán que ajustarse a una buena relación prestaciones-precio. No vale de nada seleccionar un equipo de gran precisión si su precio es muy elevado.
- Cabe no olvidar que estos componentes tan específicos llevan asociado un plazo de entrega que no siempre se puede adaptar a nuestras necesidades. Ya sea porque el componente sea especial o por temas de política de fabricación del proveedor hay componentes que tienen un plazo de más de 16 semanas desde la fecha de pedido, tiempo a tener en cuenta a la hora de plantearse el desarrollo de las etapas del proyecto.
- Por último y no menos importantes, otros aspectos a tener en cuenta serán aquellos que bien nos faciliten el trabajo o bien nos proporcionen mayores garantías a la hora de la puesta en marcha o en los trabajos de mantenimiento. Es decir que vamos a valorar aspectos como la similitud a los componentes originales de cara al rediseño, la facilidad de montaje, la facilidad de conexión, el empleo de la misma tarjeta de captura para diferentes componentes, etc.

Veamos a continuación cuales han sido los componentes de medida por los que nos hemos decantado, qué características tienen y qué otras alternativas se han desechado (ver características técnicas en catálogos adjuntos recogidos en el ANEXO II).

2.4.2.1 Motorreductor accionamiento sinfín

La elección del motor a emplear y sus componentes asociados, encoder y reductor, depende de la potencia que se necesite para hacer girar el engranaje sinfín corona.

Actuando sobre un sinfín mediante un peso conocido a una distancia dada podemos determinar experimentalmente el par necesario para que se produzca movimiento en la transmisión. La estimación se ha realizado sobre un par de engranajes de los más grandes que se van a verificar en la máquina.

$$\text{Par estimado rodamiento: } 11N \times 8,7cm = 95,7N \cdot cm \approx 1N \cdot m$$

Esta estimación se ha realizado apoyando el sinfín entre rodamientos y no sobre puntos como será en la máquina por lo que habrá que aumentamos entre 2,5 y 3 veces el par que se necesitará en la realidad.

$$\text{Par estimado entre puntos: } 3 \times 1N \cdot m = 3N \cdot m$$

Con este dato y teniendo en cuenta que la velocidad máxima nominal que se requiere en la salida del reductor para realizar el ensayo es de 30 rpm, se han seleccionado los siguientes componente:

- Micromotor FAULHABER de corriente continua “3257 G 024 CR” cuyo par máximo es de 70 mNm (Ver Figura 29). Es un motor ligero y compacto cuyas escobillas son de metal de grafito sinterizado y el conmutador está fabricado en cobre. Con este diseño, y a pesar de su tamaño, se asegura que el sistema de conmutación soporte más potencia y mayor número de maniobras.

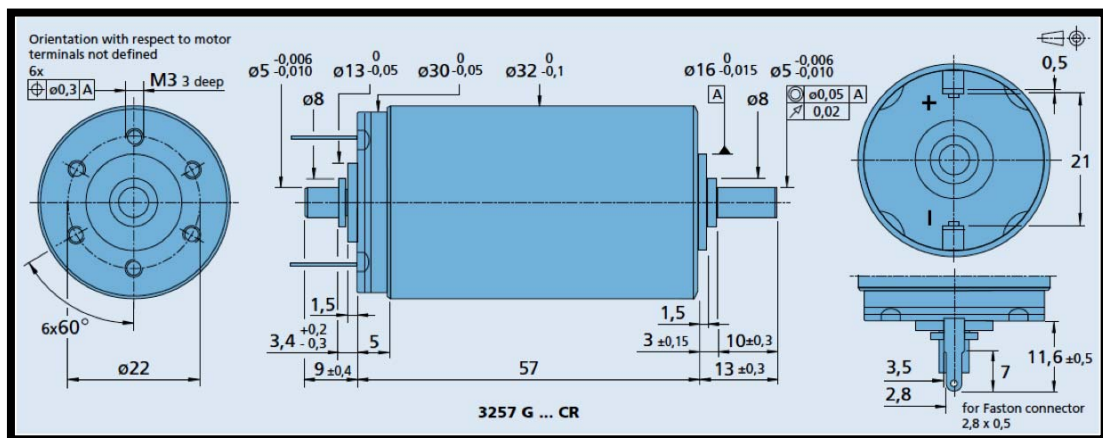


Figura 29 Micromotor FAULHABER

- Reductor planetario FAULHABER “38/2 S” con una relación de transmisión de 134:1 (ver Figura 30). Fabricado completamente en acero su robustez es ideal para altos pares de transmisión con un alto rendimiento.

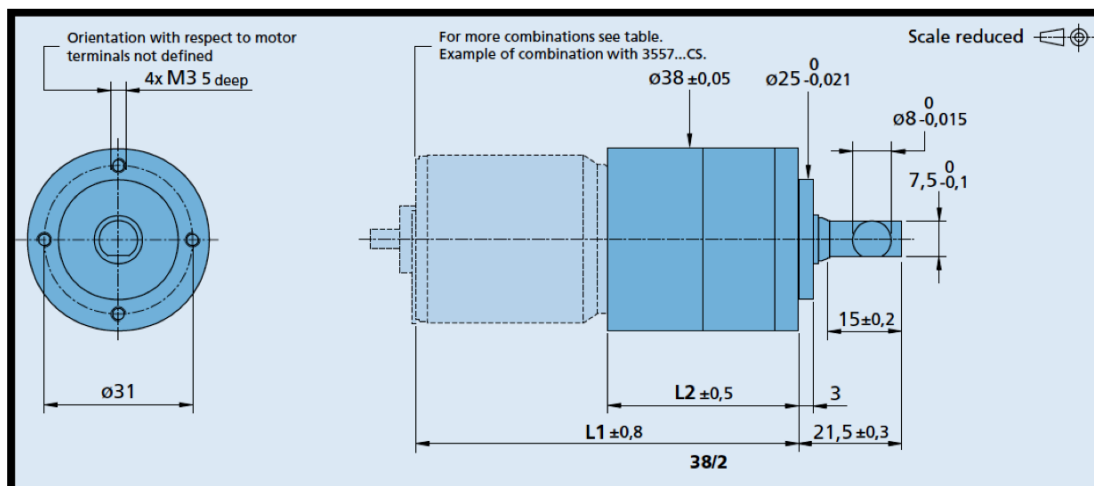


Figura 30 Reductor planetario FAULHABER

- Encoder óptico FAULHABER “HEDM 5500” de 1000 pasos (ver Figura 31). A pesar de su diseño ligero y compacto se consigue una alta resolución con un consumo mínimo. Los encoders ópticos utilizan un haz continuo de luz infrarroja que atraviesa un disco rotatorio perforado de pequeña inercia fijado directamente al eje del reductor. Dicho haz se proyecta sobre un fotorreceptor que cuenta el número de pulsos luminosos detectados.

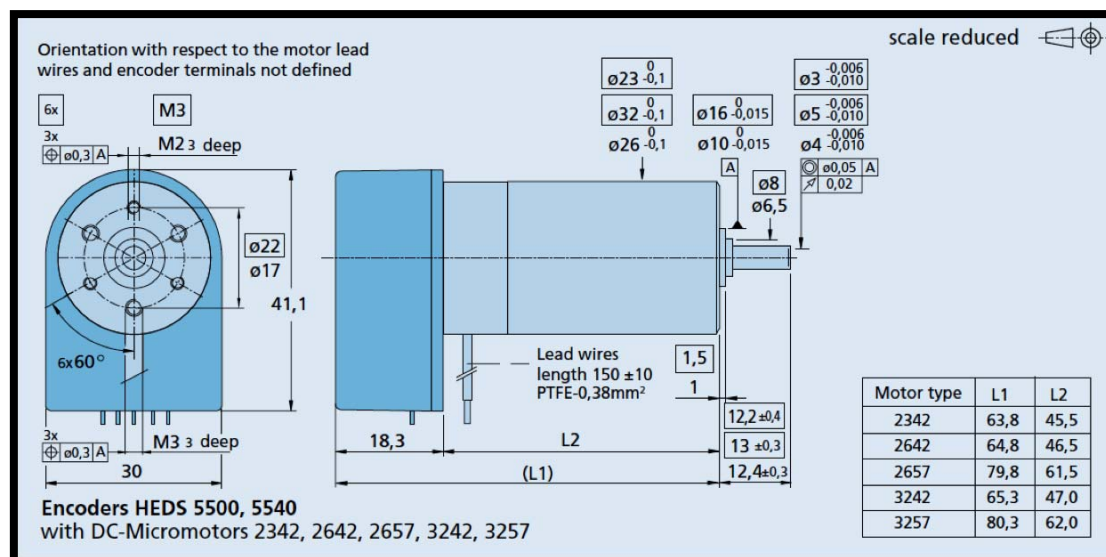


Figura 31 Encoder óptico FAULHABER

- Driver de control FAULHABER “3006 S” con posibilidad de funcionamiento desde PC o potenciómetro (ver Figura 32). Además existe la posibilidad de control de varios drivers de este tipo desde el mismo puerto serie.



Figura 32 Driver de control FAULHABER

Tomando los datos de los correspondientes catálogos técnicos se comprueba que cumple con las exigencias de funcionamiento de la máquina en la realización de los ensayos:

Velocidad de trabajo motor : 4000 rpm

Reducción seleccionada: $1:134 \Rightarrow 4000rpm / 134 = 29,8rpm \approx 30rpm$

Par motor estimado: $\frac{Par\ estimado}{Reducción \times \eta} = \frac{3Nm}{134rpm \times 0,6} = 37,3\ mNm$

Por lo tanto queda comprobado que estamos trabajando dentro del rango previsto y con un criterio bastante conservador para garantizar la ejecución de cualquier ensayo.

Par motor seleccionado: 70 mNm > 37,3 mNm : Par motor estimado

Y además comprobamos las velocidades máximas de trabajo:

V.máxima motor : 5000 rpm > 4000 rpm : V.máxima trabajo

No se han contemplado otras alternativas válidas debido a que por un lado su tamaño es muy reducido siendo perfecto para esta aplicación y por otro necesitamos gobernarlo desde un PC a través de una conexión RS232, opción inexistente en los motores del resto de marcas fiables.

2.4.2.2 Encoder lineal posición carro porta-sinfín

En la norma DIN 3963 podemos encontrar los valores de tolerancias máximos que pueden tener los engranajes para una calidad dada. Para este tipo de máquinas el valor mínimo a medir, o lo que es lo mismo la precisión, está entorno a $\pm 1 \mu\text{m}$ por lo que la resolución necesaria del elemento de medición es deseable como mínimo del 10%, es decir, $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

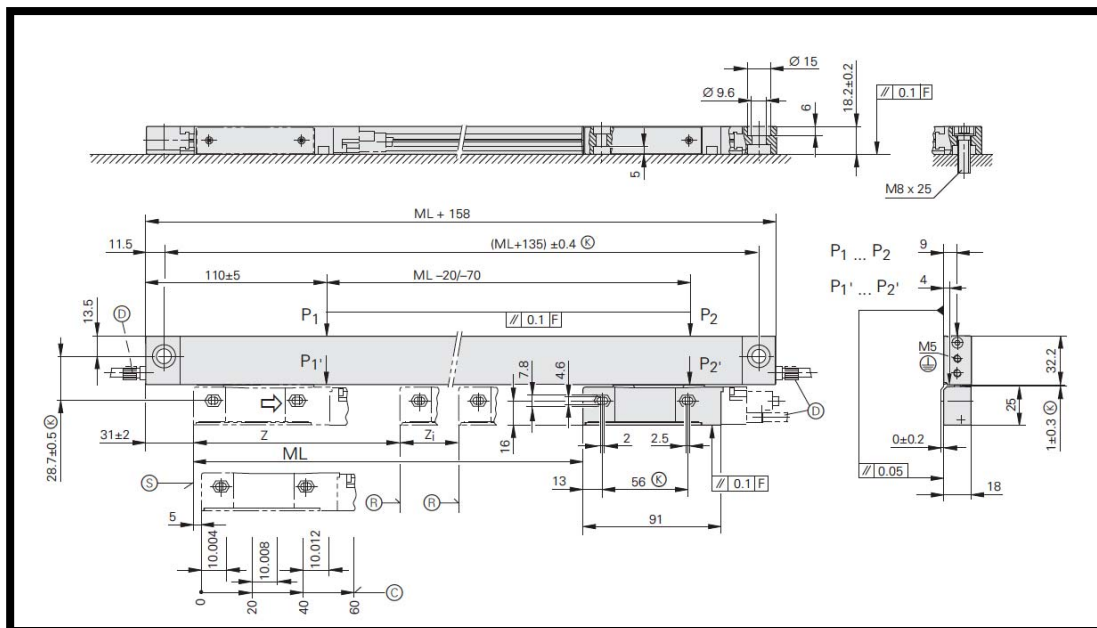


Figura 33 Encoder lineal encapsulado HEIDENHAIN

En este caso se ha optado por un modelo compacto encapsulado (blindado) HEIDENHAIN LF 481 C con un rango de medida de 250 mm (ver Figura 33). Es un sistema lineal de medida incremental que trabaja sin contacto mecánico entre el cabezal captador y la escala graduada. Este sistema lineal de medida incremental mantiene la posición actual, respecto de un punto de referencia u origen, mediante la emisión de impulsos con un periodo determinado y preciso, estos impulsos son contados para visualizar la posición actual. Para reproducir el punto de referencia posee unas marcas de referencia (ver Figura 34) que deben ser sobrepasadas en el inicio del día o ciclo de trabajo.

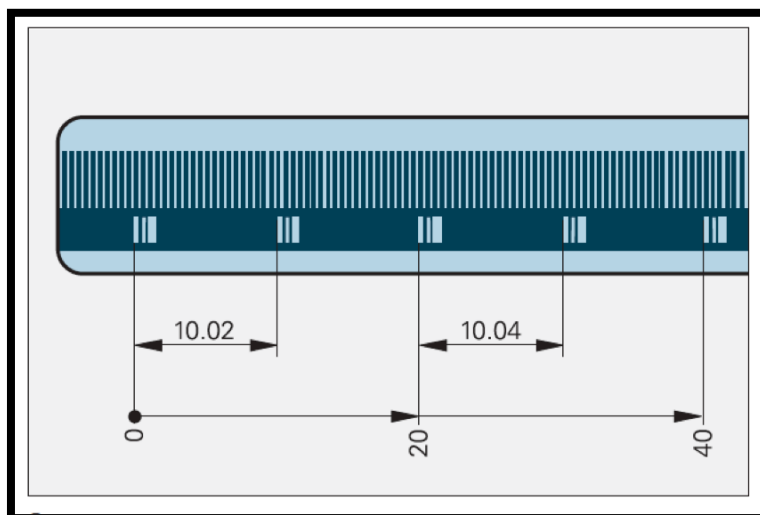


Figura 34 Detalle marcas de referencia

Este tipo de sistema lineal de medida (encapsulado) está protegido contra polvo, virutas y proyección de líquidos siendo adecuados para su instalación en máquina herramienta o ambientes similares. La carcasa de aluminio protege la escala graduada y los labios de goma protegen del polvo o la proyección de líquidos cuando el captador se desplaza a lo largo de la carcasa.

En su hoja de especificaciones podemos encontrar sus datos técnicos y comprobamos que cumplen con nuestros requisitos:

Resolución (paso incremental): $0,1 \mu\text{m}$

Precisión mín: $\pm 3 \mu\text{m}$ ($L = 1220 \text{ mm}$) \Rightarrow $\pm 0,6 \mu\text{m}$ ($L = 250 \text{ mm}$) ^{Pr o porcional}

Cabe destacar que la precisión aquí indicada es la mínima que el fabricante garantiza por catálogo para todo el rango de medida. Cuando se realiza la compra de este material se incluye un certificado de calibración adjunto con la precisión exacta del equipo, que suele ser bastante superior a la citada anteriormente.

Otro aspecto a tener en cuenta será el montaje del encoder sobre la máquina (ver Figura 35). Por su nivel de precisión esta operación requerirá especial cuidado procediendo según se indica en el manual de montaje del fabricante adjunto en el ANEXO II.

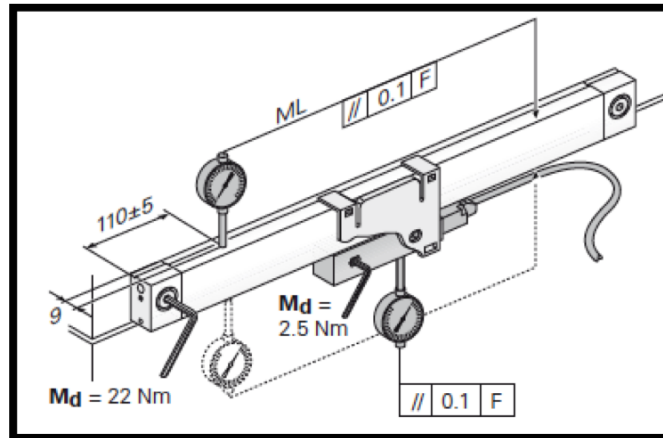


Figura 35 Ejemplo pasos a seguir en el montaje del encoder lineal

Como alternativas se han valorado las siguientes opciones:

- Encoder lineal encapsulado HEIDENHAIN LF183 con precisión $\pm 2 \mu\text{m}$ para todo su rango de medida (ver Figura 36). Este sistema similar al seleccionado ofrece mayor precisión pero evidentemente a un precio más elevado.



Figura 36 Encoder lineal HEIDENHAIN LF183

- Encoder lineal RENISHAW RGH24Y con una resolución de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (ver Figura 37). Este sistema ofrece la misma resolución, en teoría con ello la misma precisión, aproximadamente por el mismo precio. En cambio al no ser encapsulado su montaje es más complejo ya que la regla es adhesiva y se tiene que colocar con extremado cuidado. Este tipo de sistemas son interesantes cuando la aplicación es más especial y no se puede aplicar uno más estándar. Además en una máquina como esta resulta muy interesante que los sistemas de medida estén lo más protegidos posible obligando a diseñar una protección para este tipo de encoder.
- Encoder lineal RESISHAW RGH24H con una resolución de $\pm 50 \text{ nm}$ (ver Figura 37). Este sistema ofrece mayor precisión que los anteriores evidentemente a mayor precio, lo cuál no está justificado en este proyecto.



Figura 37 Encoder lineal RESNISHAW tipo RGH24

2.4.2.3 Palpador lineal posición columna

Al igual que en la elección del encoder lineal la precisión que debe de tener el palpador lineal será como mínimo de $\pm 1 \mu\text{m}$. En este caso se ha optado por un palpador de la misma marca que el encoder. Esta opción ha resultado ser la más adecuada ya que al emplear sistemas compatibles se consigue aprovechar la misma tarjeta de captura de datos con lo que por un lado se disminuye el precio de compra y por otro evitamos la duplicidad en los algoritmos de la captura de datos.

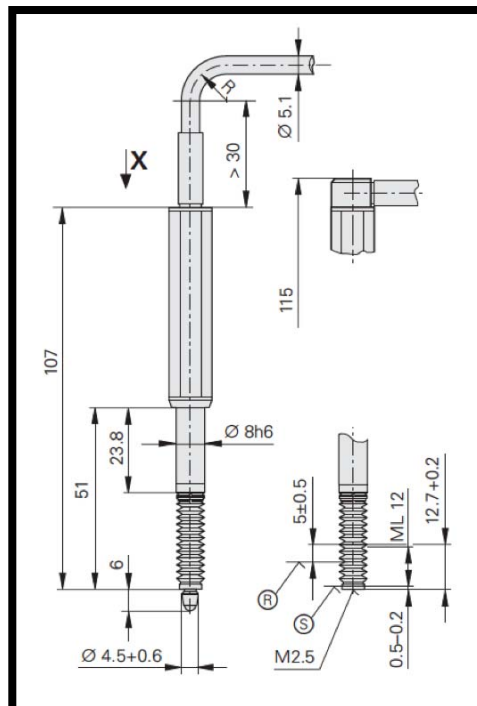


Figura 38 Palpador lineal de medida HEIDENHAIN-SPECTO

Se ha seleccionado por tanto un palpador lineal de medida HEIDENHAIN-SPECTO ST 1288 con una longitud de medición de 12 mm y con una precisión de $\pm 1 \mu\text{m}$ (ver Figura

38). Estos palpadores se caracterizan por disponer del vástago de medición autoguiado. Además están contruidos para un ambiente industrial y se caracterizan por una alta precisión para un largo período de tiempo así como de una alta estabilidad térmica. Por ello resultan óptimos para ser usados en utillajes de verificación y metrología industrial así como en otros instrumentos de medición.

Como alternativas se han valorado las siguientes opciones:

- Palpador lineal HEIDENHAIN-METRO MT1281 de 12 mm de recorrido y con precisión $\pm 0,2 \mu\text{m}$ (ver Figura 39). Este sistema similar al seleccionado ofrece mayor precisión pero evidentemente a un precio más elevado.



Figura 39 Palpador lineal HEIDENHAIN-METRO MT1281

- Palpador lineal MARPOSS HBT 3441557005 con un rango de medida de $\pm 5 \text{ mm}$ con una repetibilidad $< 0,4 \mu\text{m}$ (ver Figura 40). Las prestaciones y el precio de esta alternativa son muy parecidas a la seleccionada, pero finalmente como se ha indicado anteriormente se ha optado por material de la misma marca que la empleada en el encoder lineal por las ventajas que aporta.

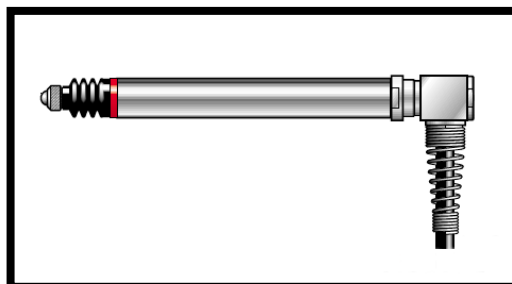


Figura 40 Palpador lineal MARPOSS HBT

2.4.2.4 Reloj comparador altura corona

Se ha sustituido el reloj comparador que determina la altura a la que se encuentra la corona por uno de características y dimensiones similares de la misma marca que el original, pero en este caso con salida de datos para poderlos llevar al PC de control. Se ha seleccionado un reloj comparador digital TESA DIGICO 305 M con un rango de medida de 12 mm con precisión de 8 μm (ver Figura 41). La resolución que se puede ver a través de su pantalla es de 0,001 mm.



Figura 41 Reloj comparador digital TESA DIGICO 305 M

2.5 Modelado CAD final

Tras haber evaluado el estado de cada uno de los elementos que componen la máquina y haber seleccionado los nuevos componentes en función de las necesidades requeridas se procede al rediseño.

Por un lado, y tomando como punto de partida el ensamblaje completo de la máquina en 3D se mantendrán aquellos elementos que se van a aprovechar por estar en buenas condiciones.

Por otro, y teniendo en cuenta las dimensiones y los puntos de anclaje de los nuevos componentes seleccionados habrá una serie de piezas que sufran modificaciones y en el peor de los casos, desde el punto de vista económico, tendrán que hacerse nuevas.

Para que estos cambios sean una realidad previamente hay que modelarlos en un diseño definitivo. Finalmente habrá que desarrollarlos, definirlos y plasmarlos en sus correspondientes planos para su posterior fabricación (ver ANEXO III).

- Nueva pieza guía (pieza única) carro porta sinfín (ver plano 01.02). Existe una alternativa para montaje con galgas (ver plano 01.07) por si el funcionamiento no fuese el deseado.
- Modificación soporte palpador lineal.

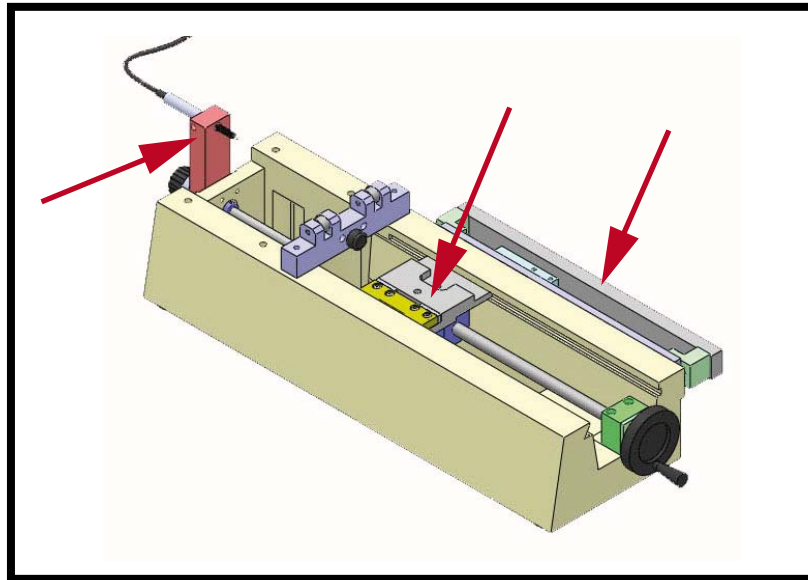


Figura 43 Nuevos componentes o modificaciones bancada

2.5.1.2 Carro porta-sinfín

El carro porta-sinfín incorpora nuevas piezas tanto de bloqueo del carro como las piezas que sujetan el nuevo sistema de accionamiento (ver Figura 44):

- Nuevo soporte motorreductor (ver plano 02.17).
- Nuevo casquillo calce motorreductor (ver plano 02.20).
- Modificación del sistema de bloqueo con sistema elástico (ver plano 02.19) que garantiza que la pieza guía trabaje siempre de la misma forma y en la misma posición.
- Modificación pieza de arrastre del encoder lineal (ver plano 08.08)

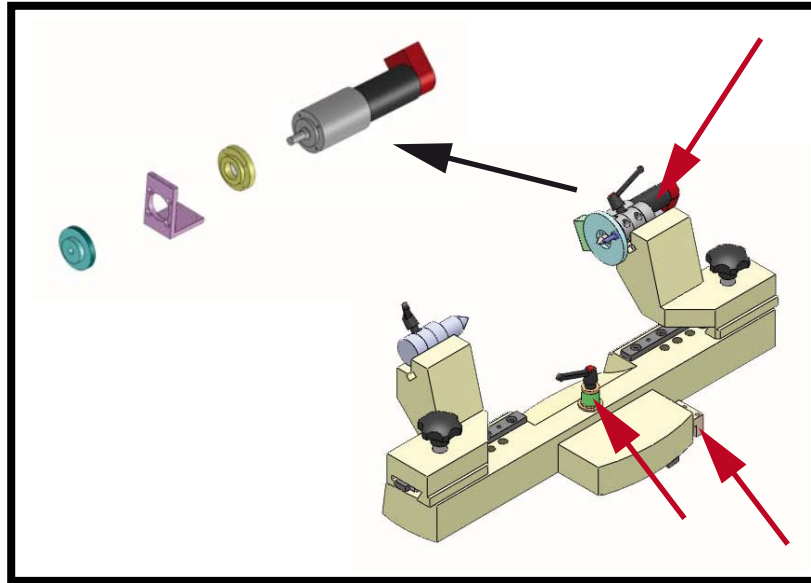


Figura 44 Nuevos componentes o modificaciones carro porta-sinfin

2.5.1.3 Columna soporte corona

En principio la columna soporte corona no sufre variación alguna ya que el reloj de medición de altura estropeado que hay que sustituir no genera ningún cambio porque tiene las mismas dimensiones que el original.

Por otro lado el palpador lineal que es el que mide los desplazamientos de la columna va montado, como ya se ha dicho en el apartado anterior, sobre la propia bancada.

2.5.2 Elementos invariables

El resto de elementos de los que no se ha hecho referencia expresa son elementos invariables, es decir, que mantienen su forma original y no generan trabajo extra a la hora de montarlos y ponerlos en marcha.

Algunos de estos elementos son: bancada, husillo y volante de posicionamiento, tope mecánico, sistema de regulación de la presión del muelle de la columna, soportes y base de puntos, puntos fijo y motriz, sistema de regulación altura columna, sistema elástico regulable columna, palanca de retroceso y bloqueo, etc.

2.6 Actuación sobre máquina

Como se ha comentado en el apartado 1.2 “Contexto y Antecedentes” esta máquina se va a utilizar como prototipo para validar las técnicas de caracterización de máquinas de ensayos de rodadura a dos flancos, siendo el primer paso de un proyecto CDTI donde el objetivo global es desarrollar una máquina universal de ensayos de rodadura así como un procedimiento estándar de en el ámbito de una tesis doctoral.

Por la amplitud del proyecto se había determinado una pequeña parte como objetivos para este TFM. En concreto esta fase que se describe a continuación no estaba contemplada desde un principio pero se ha incluido por considerarse interesante qué es lo que se ha seguido haciendo y que camino seguirá justificando así el trabajo realizado.

Una vez que ha quedado claro el estado de la máquina original, se han seleccionado los nuevos componentes y se ha realizado el nuevo diseño definitivo, incluyendo los planos de fabricación, se pasaría a la fase de actuación sobre la máquina donde nos vamos a encontrar con la limpieza, engrase, montaje y comprobaciones de funcionamiento.

2.6.1 Limpieza y puesta a punto

Ya que se aprovechan numerosas piezas y componentes hay que dejarlas con un aspecto que resulte adecuado. Esto pasa por limpiar y desengrasar cada una de las piezas comprobando si necesitan algún tipo de tratamiento superficial como por ejemplo el pavonado, e incluso el pintado.

Se procede en primer lugar a una limpieza general con un desengrasante industrial ecológico diluido en agua (ver Figura 45). Este tipo de desengrasantes deja las superficies completamente limpias y libres de residuos sin contener solventes peligrosos como el percloroetileno o compuestos butílicos, por lo que no es corrosivo, no afecta a la pintura base aceite y no contiene vapores peligrosos.

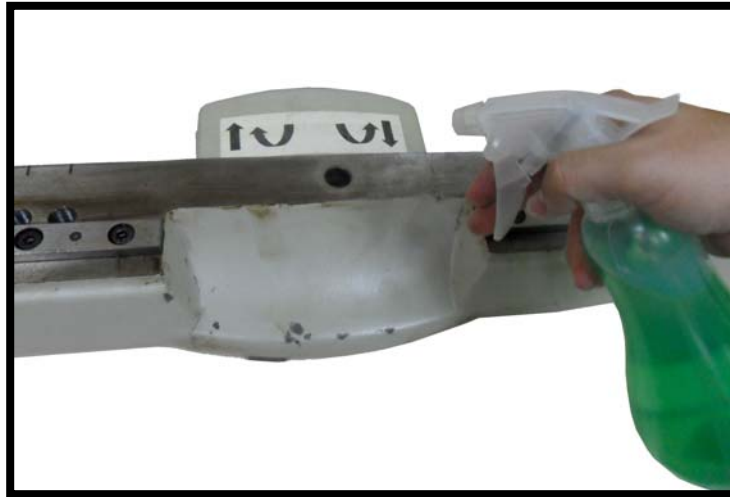


Figura 45 Limpieza con desengrasante

Una vez limpias las piezas, se observa que existen varias superficies mecanizadas en las que hay un poco de oxidación. Para eliminar este óxido sin estropear dichas superficies basta con echar un poco de aceite de engrase de máquina herramienta y lijar con una lija de grano muy fino (ver Figura 46).

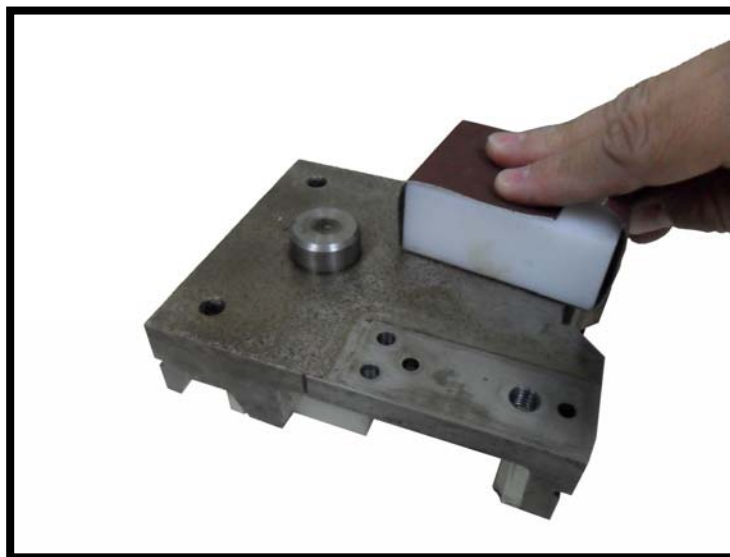


Figura 46 Lijado superficies con oxido

Las piezas de fundición son las que llevan varias superficies pintadas. En general el estado de la pintura es bueno salvo en zonas muy concretas. Aún así se decide pintar de nuevo todas estas piezas y así se le da un nuevo aspecto a la máquina. Este proceso se va a realizar en un taller especializado con secado en horno para que el acabado sea de muy buena calidad.



Figura 47 Pintado piezas fundición

Por último, se procede al engrase de las superficies mecanizadas para evitar de nuevo su oxidación. Aplicaremos con una aceitera cualquier tipo de aceite de engrase de máquina herramienta (ver Figura 48).



Figura 48 Engrase superficies mecanizadas

2.6.2 Montaje

Actualmente el proyecto se encuentra en este punto. Todas las piezas nuevas y modificaciones descritas en el apartado 2.5.1 ya se han realizado. También se ha recibido la mayor parte del material de medida seleccionado en el apartado 2.4.2. Con todo ello se tiene que proceder al montaje y ajuste de la máquina completa.

A pesar de ser un proceso tan sencillo como coger uno a uno los componentes e irlos montando en su posición definitiva, el ajuste de alguno de ellos es realmente complicado y costoso. Por ello antes de comenzar a colocarlos en su sitio habrá que, para no llevarnos ninguna sorpresa, programar y verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de medida, es decir comprobar que:

- El encoder lineal nos da lectura a medida que se desplaza a lo largo de su longitud.
- El palpador lineal también nos da su lectura correspondiente y llega esa información al PC.
- El motor gira de manera controlada.
- El reloj comparador nos envía la lectura.

En lo que respecta a la parte mecánica y a medida que se va desarrollando dicho montaje tendremos que asegurarnos que:

- El husillo gira suavemente pero sin que exista holgura en el carro porta-sinfín.
- El bloqueo del carro porta-sinfín se realiza en el punto que queremos.
- La columna se desplaza suavemente gracias al sistema elástico.
- La fuerza del sistema elástico de la columna varía al mover su maneta correspondiente.
- Funciona el bloqueo y desbloqueo de la columna.
- La altura de la columna varía al actuar sobre su maneta.

Una vez realizadas todas estas comprobaciones generales se procederá a ensamblar completamente la máquina para realizar el ajuste definitivo en función de los resultados de la calibración y comprobación de la máquina descritos en los apartados 3.1 y 3.2.

2.7 Esquema funcionamiento eléctrico

El control de la máquina se realizará desde un PC industrial al que el operador accederá a través de un teclado. En él habrá que incluir el software de medición, gestión de la medición y análisis de resultados que se programará para Windows XP en Visual Basic y en C++, con objeto de implementar en dll en C++ los cálculos geométricos, el tratamiento de datos y los algoritmos de control y la interfaz gráfica en VB (ver). En definitiva el programa contará con módulos de:

- Gestión de la medición, lecturas de los encoders y el palpador lineal, control de motores, procedimiento de calibración y procedimiento de puesta a cero de los ejes.
- Gestión de referencias de pieza, permitiendo la definición de los parámetros básicos de cada engranaje, que alimentarán los módulos de cálculo geométrico completo.
- Base de datos de referencias pieza e historial de ensayos. Módulo de control estadístico de proceso.
- Módulo de gestión y configuración de ensayo a dos flancos, módulo de tratamiento de datos, transformada de Fourier, presentación de resultados y gestión de informes.
- Módulo de gestión de errores.
- Módulo de verificación.
- Manual y ayuda en pantalla.

SINFIN

Número de entradas: 4 Zsf

Diámetro primitivo: 40 Dp mm

Módulo normal: 4,853 mn

Ángulo de presión: 20 αn °

Sentido hélice: DERECHA

Calidad Nominal: 7

Definición de altura de dentado

☒ Juego de cabeza

Factor de juego de cabeza: 0,2 c*

Factor de altura de cabeza: 0,803 ha'

☐ Altura de pie

hf = 1,77 * mn (mm)

Rodillos de medición

Teórico: 8,112 mm Empleado: 8 mm

CORONA

Número de dientes: 45 Zc

Factor de desplazamiento de perfil: -0,001 X mm

Distancia del plano medio a la cara de referencia: 38 mm

Calidad Nominal: 7

ENGRANE

Tolerancia de diseño distancia entre centros

ts: 0,04 mm

ti: 0 mm

Holgura admisible

Hmax: 0,08 mm

Hmin: 0,04 mm

INFORME

Param.	Valor	U.	Descripción
SINFIN			
da	47,852	mm	Diámetro del círculo de cabeza
df	28,266	mm	Diámetro del círculo de pie
Beta	6,969	°	Ángulo de hélice
pn	15,246	mm	Paso normal
mx	4,889	mm	Módulo axial
px	15,360	mm	Paso axial
pz	15,360	mm	Altura de paso (Paso de hélice)
q	8,181	mm	Coefficiente de forma
Betam	83,031	°	Ángulo de chafán de centrado
ha	3,926	mm	Altura de cabeza
hf	5,867	mm	Altura de pie
h	9,793	mm	Altura de diente
b1	82,899	mm	Longitud de diseño
smn	7,623	mm	Espesor normal del diente
smx	7,680	mm	Espesor axial del diente
emn	7,623	mm	Anchura entre dientes normal
emx	7,680	mm	Anchura entre dientes axial
altax	20,137	°	Ángulo de presión axial
MDR	50,436	mm	Medida entre rodillos
CORONA			
mt	4,889	mm	Módulo frontal
DERECHA			Dirección de flancos
d2	220,010	mm	Diámetro del círculo primitivo
p2	15,360	mm	División del círculo primitivo
m*x	-0,005	mm	Desplazamiento del perfil
Beta2	6,969	°	Ángulo de hélice
altan2	20,000	°	Ángulo de presión normal
s2	7,620	mm	Espesor de diente
e2	7,627	mm	Anchura entre dientes
m1	20,000	mm	Radio de la moldura de centrado
ha2	3,921	mm	Altura de cabeza
hf2	4,909	mm	Altura de pie
h2	8,830	mm	Altura de dientes
da2	227,852	mm	Diámetro del círculo de cabeza
de2	232,742	mm	Diámetro exterior (aproximación)
df2	210,193	mm	Diámetro del círculo de pie
dw2	220,000	mm	Diámetro primitivo de funcionamiento
rk	16,074	mm	Radio del canal superior

Editando Referencias

SINFIN: 0300001

CORONA: 0300009

F2 Calcular F3 Almacenar Referencias F4 Impresión Informes F5 Actualizar Referencias F8 Salir

Figura 49 Ejemplo interface de control

Como breve idea de cómo tendrán que ir conectados cada uno de los sistemas de medida podemos fijarnos en la Figura 50. Ahí observamos que el control del motorreductor 8,112 mm "Faulhaber" se hace mediante un driver situado en el armario eléctrico y

cuya información entra y sale por uno de los puertos RS232 del PC. Por el otro puerto RS232 simplemente se tiene la lectura del reloj que nos mide la altura a la que se encuentra la corona. Por último, a través de una tarjeta PCI de captura de datos colocada en el interior del PC se puede saber en que posición se encuentran los centros de los ejes y cuanto oscilan durante el ensayo gracias a los sistemas de medición "Heidenhain".

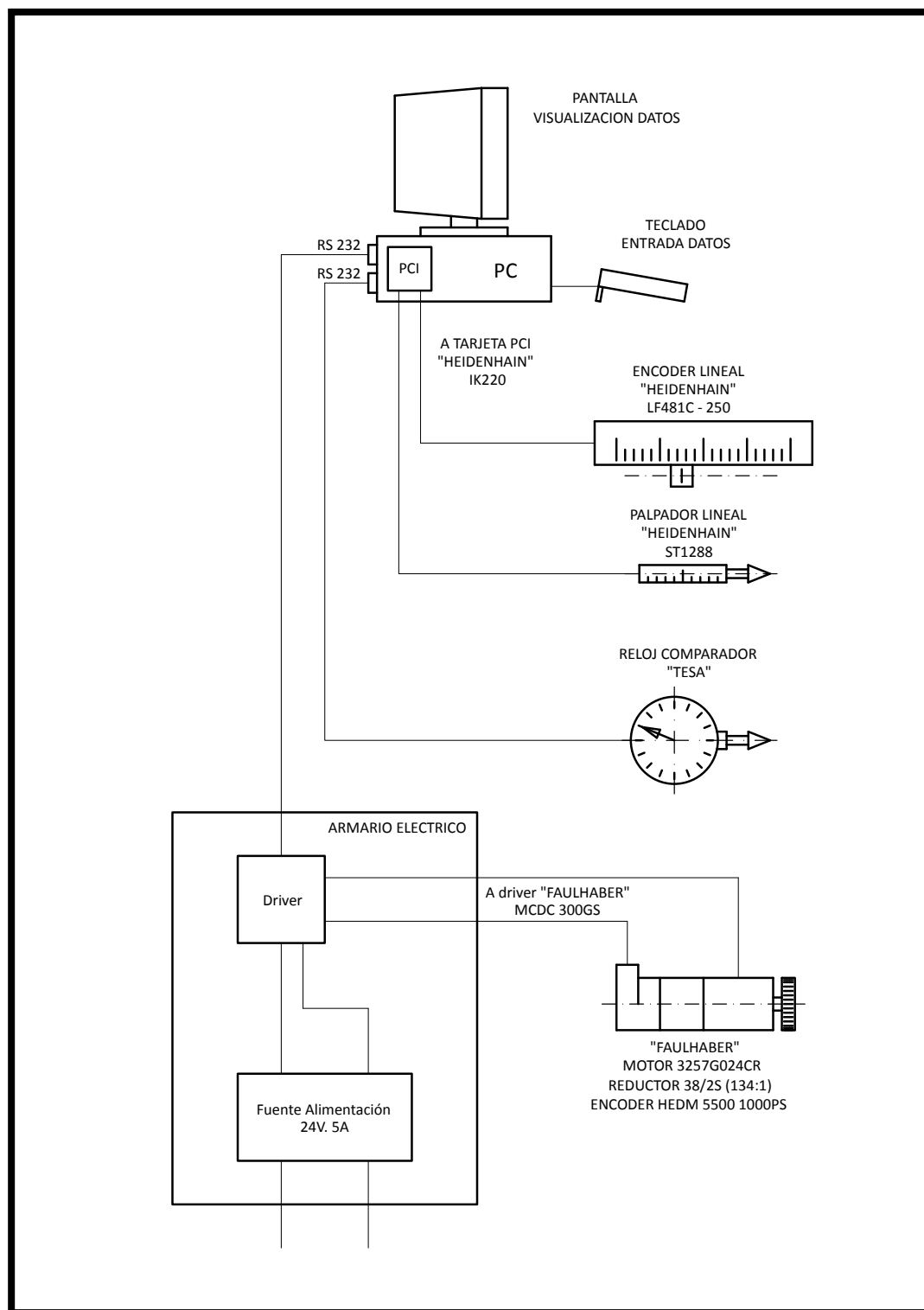


Figura 50 Esquema eléctrico de conexión

2.8 Seguridad

La máquina una vez acabada será conforme con la Directiva de Máquinas 98/37/CE. Además cumplirá con las normas técnicas armonizadas de seguridad en máquinas EN 292-1 y EN 292-2 “Principios generales para el diseño” y EN-418 “Equipos para emergencia, aspectos funcionales”.

Sobre la máquina será colocada la marca “CE” y además se adjuntará una “Declaración de Conformidad” en la que se indicará el fabricante, la marca, el tipo, el nº de serie, el cliente, el año de construcción, las directivas y normas a cumplir anteriormente citadas, la fecha y la firma del responsable.

3 PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CARACTERIZACION

En este apartado se describe los diferentes protocolos de verificación mecánica y funcionales para este tipo de máquinas, así como los ensayos necesarios para una adecuada caracterización metrológica. Además, en último lugar y como innovación, se incluye un apartado donde se relaciona resultados de rodadura con tolerancias de montaje.

3.1 Verificaciones mecánicas

En este primer apartado se ha desarrollado el protocolo de verificación mecánico de las diferentes partes de la máquina, es decir un protocolo con diferentes comprobaciones para garantizar que los diferentes elementos que componen la máquina están dentro de unos valores de error aceptables. Estos métodos y procedimientos son habitualmente utilizados en calibración y verificación de máquinas herramienta.

3.1.1 Verificación del utillaje porta-coronas

Apoyando la base del reloj comparador sobre la propia bancada se realizarán comprobaciones de la planicidad de la cara de apoyo del utillaje (ver Figura 51) sobre la que asienta la cara de referencia de las coronas, utilizada tanto para el mecanizado como para el montaje de estas.

Además se comprobará también realizando el mismo montaje de reloj comparador, es decir apoyando la base de este sobre la propia bancada, la oscilación radial o concentricidad del utillaje a medida que gira sobre su eje de revolución.

En ambos casos la oscilación de la aguja nos marcará la variación entre el máximo y el mínimo valor.

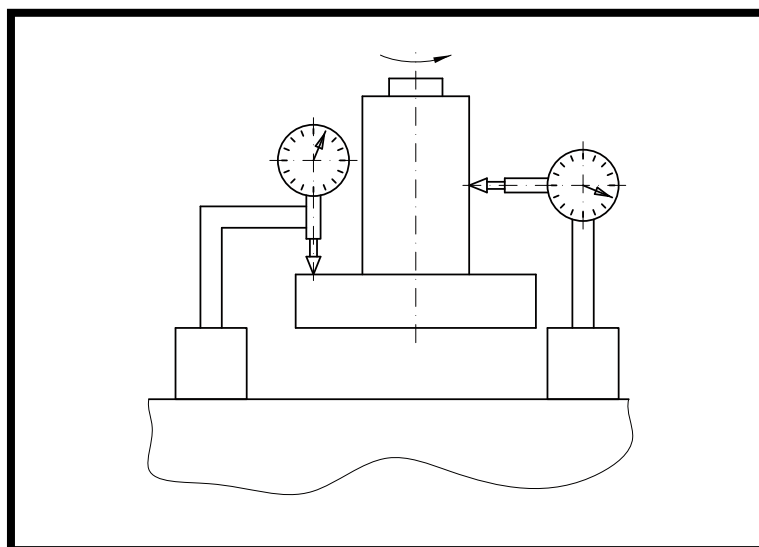


Figura 51 Comprobación utillaje porta-corona

3.1.2 Alineación de punto y contrapunto

Apoyando la base del reloj comparador sobre el punto que sea fijo y asegurándose de que no varía su posición, se comprueba que no exista variación durante el giro del punto rotatorio (ver Figura 52). Si existiese alguna desalineación la aguja marcaría las oscilaciones teniendo que corregir la posición de los puntos hasta su perfecta alineación.

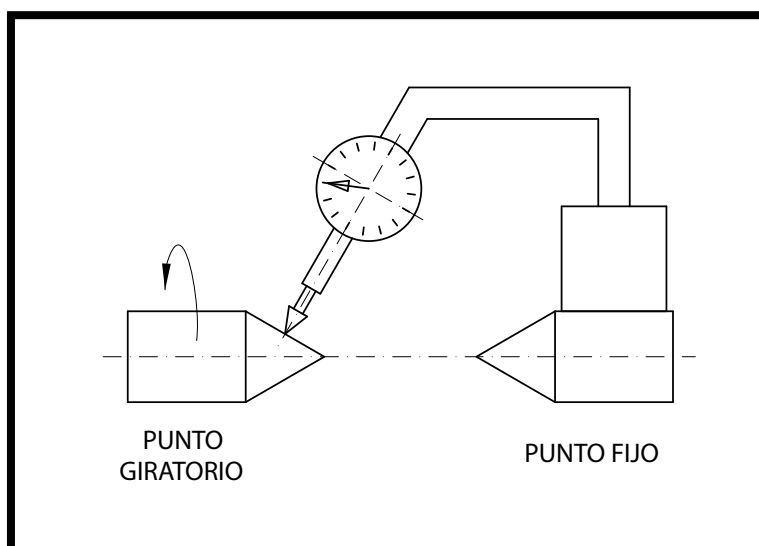


Figura 52 Alineación de punto y contrapunto

3.1.3 Medición de errores de la guía

Hay que incluir como verificación mecánica la medición de los errores producidos debido al juego en la guía. Para ello, mediante un interferómetro láser, se determinarán

los errores de posición a lo largo del eje de la guía, los 2 de rectitud hacia los otros dos ejes y los errores debido al cabeceo, deriva y vuelco según sea en cada eje (ver Figura 53). En un principio se estima que con 3 repeticiones sin bloqueo más 3 repeticiones con bloqueo, tomando 10 posiciones de ida y de vuelta, sería suficiente ya que la guía no es especialmente larga (recorrido máximo 210 mm).

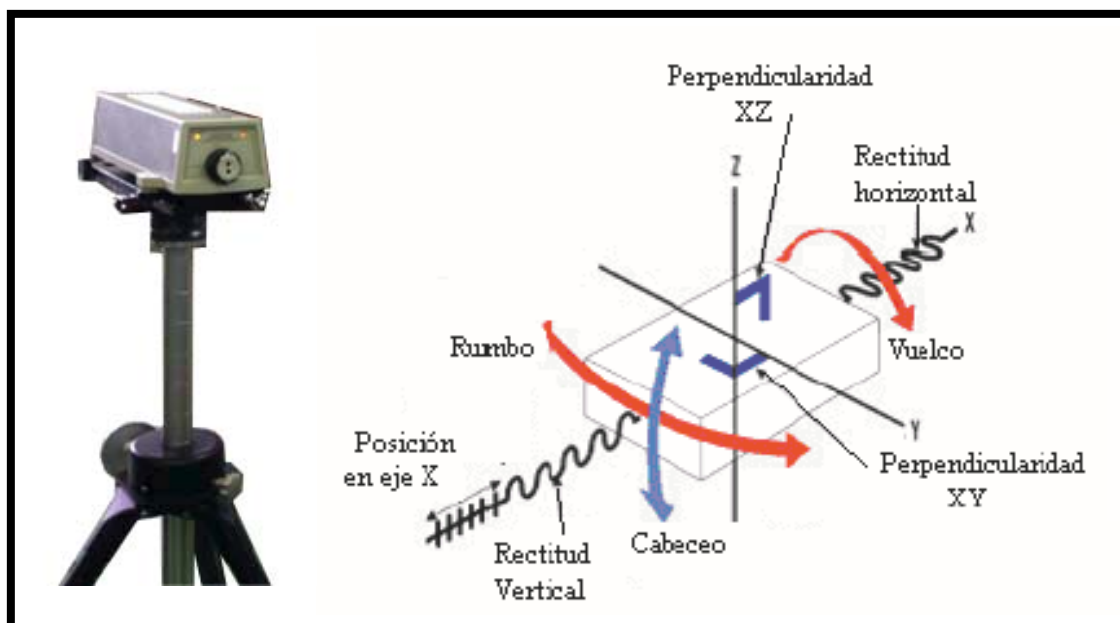


Figura 53 Medición errores guías

Con estos datos se estaría en disposición de determinar el grado de precisión que tiene este sistema mecánico. Si las desviaciones máximas están por debajo de un valor límite que se debe determinar experimentalmente se tendrá la certeza que los errores debidos a la guía no afectan a los resultados de los ensayos.

Reseñar también que el uso del interferómetro se debería de aprovechar también para comprobar y validar los valores que nos da el encoder lineal.

3.2 Procedimiento de calibración

En este apartado se ha desarrollado el procedimiento de calibración que hay que realizar periódicamente para garantizar los resultados obtenidos en los ensayos. Seguir el orden en el que están descritos es importante ya que primero se debe garantizar el paralelismo del eje del sinfín con el plano medio teórico del tallado de la corona para posteriormente calibrar la altura a la que se debería encontrar este plano con respecto al plano de referencia de la máquina (apoyo en el utillaje). Solo cuando se tenga garantía de

la posición del eje teórico del sinfín se podrá calibrar la distancia entre centros, siendo la medición de la variación de esta el objetivo fundamental del ensayo.

Mencionar que durante el desarrollo de la fase de montaje de la máquina y antes de su puesta en marcha definitiva habrá que realizar dicho procedimiento varias veces para conseguir el ajuste deseado.

3.2.1 Calibración paralelismo eje sinfín con cara de referencia

Colocando la base del reloj comparador sobre la cara de apoyo del utillaje, donde asienta la cara de referencia (tanto para el mecanizado como para el montaje) de las coronas, se hace girar el útil unos 90 grados para comprobar que el valor en el reloj comparador de los dos puntos más altos de contacto coincide (ver Figura 54). Si esto no fuese así significaría que el eje no es paralelo al plano de referencia y que durante el ensayo de rodadura en el que se mide la variación de la distancia entre ejes la medida estaría falseada, dando valores mayores a los reales.

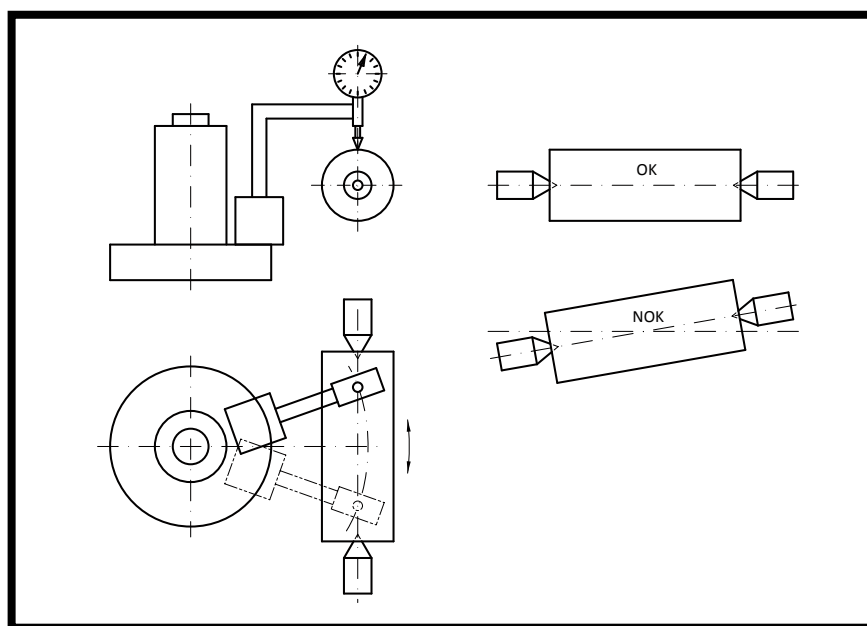


Figura 54 Calibración paralelismo eje sinfín

3.2.2 Calibración altura plano medio corona

Tomando como referencia la bancada de la máquina, es decir, apoyando la base del reloj comparador sobre esta y mediante bloques patrón podremos calibrar la altura teórica a la que debería de estar el plano medio teórico del tallado de la corona con respecto al plano de referencia de la máquina. Colocando entre puntos un patrón

cilíndrico de diámetro controlado palparemos con el reloj comparador buscando el punto más alto poniéndolo a cero en dicho punto. Una vez obtenido este punto se determinará su altura colocando sobre la cara de apoyo del utillaje galgas patrón (ver Figura 55), teniendo especial cuidado en que sus caras pulidas estén bien en contacto. La posición “cero” que tendrá que marcar el reloj comparador electrónico que verifica la altura en la máquina vendrá a ser la dimensión medida con las galgas patrón menos el radio del patrón cilíndrico empleado.

Con esta operación exclusivamente se calibrará la altura teórica de la posición de la corona en altura, pero cuando se realiza un ensayo habrá que regular dicha altura y ajustarla a aquella que dé la mínima distancia entre centros (ver 1.3.4).

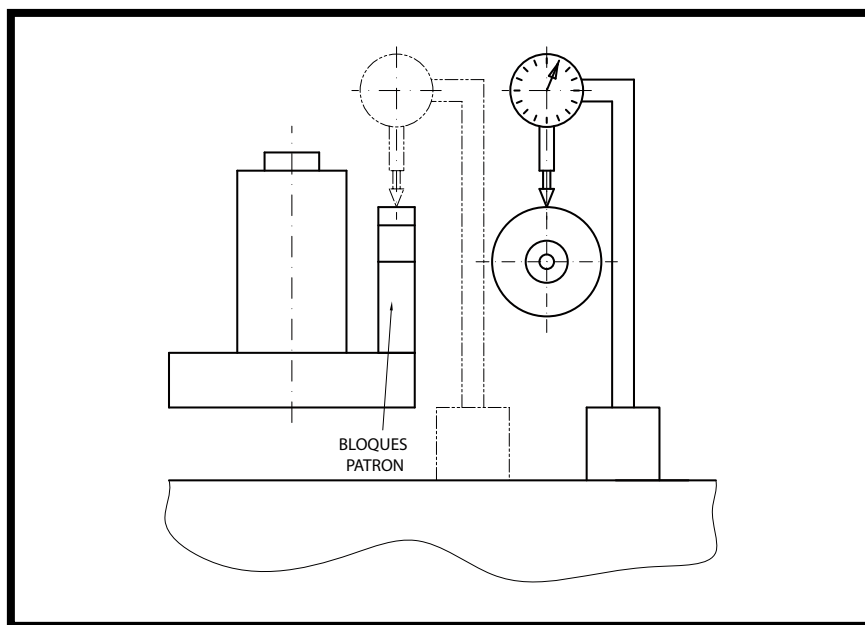


Figura 55 Puesta a cero altura columna

3.2.3 Calibración distancia entre centros

Existen dos métodos para calibrar la distancia entre centros ($D_{\text{nominal centros}}$). En ambos métodos lo que se necesita es capturar el valor de lectura tanto del encoder lineal (K_{encoder}) como del palpador (K_{palpador}) durante el proceso de calibración. Relacionando correctamente entre sí esos valores se estará en disposición de determinar la posición real entre centros durante los ensayos.

$$D_{\text{real centros}} = (D_{\text{no min al centros}} + D_{\text{encoder}}) + D_{\text{palpador}}$$

donde,

$$D_{no\ min\ al\ centros} = R_{corona\ patron} + L_{bloques\ patron} + R_{sin\ fin\ patron}$$

$$D_{encoder} = K_{encoder} - M_{encoder}$$

$$D_{palpador} = M_{palpador} - K_{palpador}$$

siendo,

$R_{corona\ patrón}$: el radio del patrón del porta-coronas.

$L_{bloques\ patrón}$: la suma de los bloques patrón empleados.

$R_{sinfin\ patrón}$: el radio del patrón del porta-sinfines.

$K_{encoder}$: valor capturado y fijo del encoder en el momento de la calibración.

$K_{palpador}$: valor capturado y fijo del palpador en el momento de la calibración.

$M_{encoder}$: valor leído por el encoder para poder situar la máquina en la distancia entre centros nominal teórica en los diferentes ensayos.

$M_{palpador}$: valor leído por el palpador durante la realización de ensayos.

El primero de ellos, denominado como método indirecto (ver Figura 56), sería colocando bloques patrón entre dos cilindros de diámetro conocido (con precisión) que hacen de corona y sinfín. Este método requiere tener bloqueado el desplazamiento de la columna y avanzar con el sinfín hasta hacer tope en los bloques patrón.

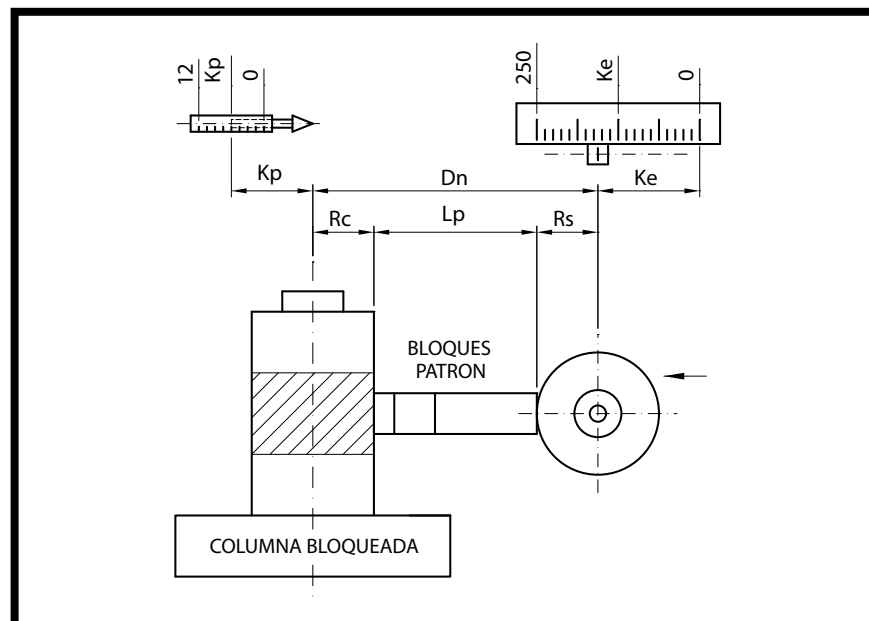


Figura 56 Calibración distancia entre centros mediante columna bloqueada

El segundo, método directo (ver Figura 57), el contacto se produce directamente sobre los cilindros de diámetro conocido con precisión. En este caso no hace falta que la columna permanezca fija por lo que el valor $L_{\text{bloques patrón}}$ en este caso será cero. Por lo que:

$$D_{\text{no min al centros}} = R_{\text{corona patron}} + R_{\text{sin fin patron}}$$

En ambos casos justo cuando se produce el contacto bien con los bloques patrón o bien entre los cilindros es el punto de calibración, es decir, hay que memorizar los valores de referencia tanto para el palpador lineal como para el encoder.

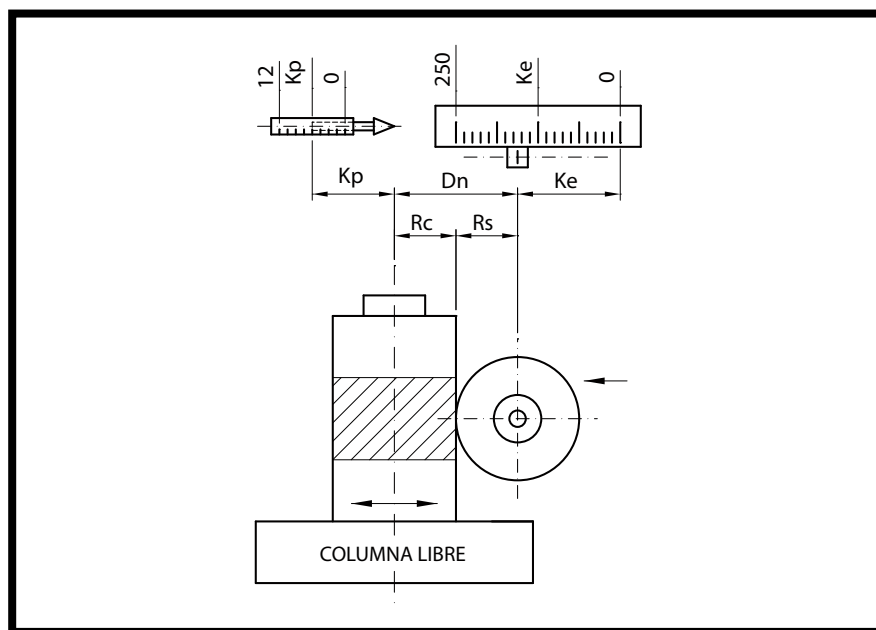


Figura 57 Calibración distancia entre centros mediante columna libre

3.3 Caracterización metrológica

En este apartado se ha desarrollado la caracterización metrológica de la máquina. Se han determinado una serie de ensayos necesarios para determinar la precisión y la incertidumbre de los resultados obtenidos. Estos ensayos están enfocados para ver cuál es la repetibilidad de la máquina, bien repitiendo el mismo ensayo en las mismas condiciones o bien modificando uno a uno los diversos parámetros que puedan afectar al resultado.

Para caracterizar metrológicamente la máquina se emplea un sinfín calibrado como patrón de rodadura con una calidad al menos 3 veces superior al de la corona de producción. Como la máquina está pensada para coronas de calidad media, calidad entre 6 y 8, se necesitará un patrón con una calidad de al menos 3. Con esto se consigue que todos los valores de desviación obtenidos en los ensayos de rodadura sean achacables a la corona que se verifica.

El ensayo tipo con la máquina bien calibrada según el apartado 3.2 “Procedimiento de calibración” está descrito en el apartado 1.3.5 “Descripción del funcionamiento de la máquina”. Básicamente consiste en montar la corona sobre el utillaje con la columna previamente retirada. Se posiciona el carro porta-sinfín, con el sinfín patrón calibrado entre sus puntos, a la distancia nominal y en este punto se desbloquea la columna para que haga contacto con el sinfín gracias a su sistema elástico que garantiza el contacto continuo durante el ensayo. Por último se graduará la altura de la corona localizando la mínima distancia entre centros de los engranajes. Una vez todo listo el ensayo consiste en medir la variación que se produce entre los centros del par de engranajes durante una vuelta completa de la corona.

Cabe destacar que actualmente no existe ningún procedimiento de calibración estándar para este tipo de máquinas por lo que se proponen los siguientes ensayos descritos a continuación. Se han clasificado en dos apartados en función de la posición inicial del ensayo. El punto de partida de los ensayos del primer apartado es siempre con la corona en la misma posición, es decir que hay que empezar el ensayo siempre en el mismo diente. En cambio en los ensayos del segundo apartado el diente de inicio del ensayo es escogido al azar, ya que es precisamente la repetibilidad en cualquier posición lo que se quiere comprobar.

3.3.1 Ensayos misma posición inicial

Como ya se ha comentado anteriormente en este apartado se describen diferentes ensayos cuyo punto de partida debe de ser siempre el mismo, es decir el ensayo hay que empezarlo siempre desde el mismo diente.

Además el ensayo nº1 es el “ensayo tipo” de repetibilidad que hay que realizar en el resto de ensayos pero sufriendo diferentes variaciones para ir determinando cada una de las influencias en el resultado final.

Todos los valores obtenidos habrá que anotarlos en unas tablas para posteriormente tratar esos datos y poder determinar el grado de repetibilidad y la influencia de cada uno de los parámetros.

Ensayo nº1) Repetición 5 veces sin modificar ningún parámetro

Se trata de realizar 5 veces el mismo ensayo sin que haya ningún cambio en ninguno de los parámetros. Una vez que se haya procedido a preparar el primer ensayo, colocando la corona, llevando el sinfín a su posición nominal y desbloqueando la columna para asegurar la rodadura se le daría marcha a la primera repetición, una vuelta a una velocidad constante de 25 rpm. Asegurándonos de que el diente de comienzo es el mismo que la primera vuelta se volvería a realizar cuatro veces más el ensayo a la misma velocidad y sin tocar ni la columna ni el carro porta-sinfín. Con este ensayo se comprueba el grado de repetibilidad de la máquina en igualdad de condiciones.

Los datos los registraríamos en una tabla similar a la Tabla 1.

Nº dientes:		Distancia nominal:		Velocidad:	
ENSAYO 1: Repetición 5 ensayos sin modificar ningún parámetro comenzando en el mismo diente de la corona y sin desplazar la columna.					
	Nº	Fi''	Fr''	fi''	Aa''
Ensayos	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Media					
Recorrido					
Desviación típica					

Tabla 1 Toma de datos Ensayo nº1

Ensayo nº2) Alternancia del sentido de giro

En este ensayo se trata de repetir 2 veces el ensayo 1) pero en este caso alternando los sentidos de giro (ver Tabla 2). Es decir si en un primer ensayo el giro ha sido horario, el siguiente, sin tocar nada y asegurándonos de que el punto de comienzo de la segunda vuelta se produce en el mismo diente que la primera, tendrá que ser antihorario. Con este ensayo se pueden determinar la repetibilidad de la máquina independientemente del sentido de giro. Normalmente los ensayo se suelen realizar girando en un sentido único, pero cabe pensar que en algún caso resulta interesante comprobar el estado de las caras del diente tanto de entrada como de salida.

Nº dientes:		Distancia nominal:		Velocidad:	
ENSAYO 2: Repetición 10 ensayos sin modificar ningún parámetro comenzando en el mismo diente de la corona y sin desplazar la columna, alternando el sentido de giro cada vez.					
	Nº	Fi''	Fr''	fi''	Aa''
Ensayos	1 Horario				
	1 Antihorario				
	2H				
	2A				
	3H				
	3A				
	4H				
	4A				
	5H				
	5A				
Media					
Recorrido					
Desviación típica					

Tabla 2 Toma de datos Ensayo nº2

Ensayo nº3) Ensayos a diferentes velocidades

Este tercer ensayo consiste en comprobar como puede afectar la velocidad de ensayo a los resultados, pudiendo extrapolar los datos a las velocidades de funcionamiento real. Para ello se tiene que repetir el ensayo nº1) a distintas velocidades como por ejemplo a 20, 22, 25, 28 y 30 rpm (ver Tabla 3).

Nº dientes:					Distancia nominal:																			
ENSAYO 3: Repetición de 5 ensayos a diferentes velocidades (5 ensayos por velocidad) comenzando en el mismo diente de la corona y sin desplazar la columna entre ensayo y ensayo.																								
	Rpm	20				22				25				28				30						
	Nº	Fi''	Fr''	fi''	Aa''	Fi''	Fr''	fi''	Aa''	Fi''	Fr''	fi''	Aa''	Fi''	Fr''	fi''	Aa''	Fi''	Fr''	fi''	Aa''			
Ensayos	1																							
	2																							
	3																							
	4																							
	5																							
Media																								
Recorrido																								
Desviación típica																								

Tabla 3 Toma de datos Ensayo nº3

Ensayo nº4) Comprobación repetibilidad del sistema elástico

El cuarto ensayo consiste en volver a repetir el ensayo nº1) pero en este caso separando la columna y volviéndola a poner en su sitio otra vez (ver Tabla 4) para comprobar si existe repetibilidad cuando el sistema elástico trabaja correctamente, es decir garantizando el continuo contacto entre los dientes durante todo el ensayo.

Nº dientes:		Distancia nominal:		Velocidad:	
ENSAYO 4: Repetición 5 ensayos comenzando en el mismo diente de la corona desplazando la columna antes de comenzar con el siguiente.					
	Nº	Fi''	Fr''	fi''	Aa''
Ensayos	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Media					
Recorrido					
Desviación típica					

Tabla 4 Toma de datos Ensayo nº4

Ensayo nº5) Modificación de la presión del sistema elástico

Además de comprobar la repetibilidad del sistema elástico en el siguiente ensayo se relaciona la repetibilidad del sistema en función de la fuerza que ejerce. Para ello se repetirá el ensayo nº1) pero en este caso modificando en cada una de las vueltas la presión que ejerce el muelle sobre la columna, que en definitiva es aumentar o disminuir la fuerza existente entre las caras de los dientes durante la rodadura.

Tanto en este ensayo como en los restantes las tablas de toma de datos son muy similares a la nº1 por lo que carece de especial interés incluirlas.

Ensayo nº6) Desplazamiento del carro porta-sinfín

Para ver la influencia del desplazamiento del carro porta-sinfín se realizará el ensayo nº1) pero en el que cada vez antes de comenzar se tenga que retirar completamente para volver a situarlo en la posición nominal entre centros. Con ello aseguraremos la repetibilidad del sistema central de bloqueo.

Ensayo nº7) Modificación altura de la corona

Este ensayo requiere actuar como en el ensayo nº1) pero separando la columna, modificando la altura de la corona aleatoriamente y volviéndola a poner en contacto con el sinfín. Por lo que antes de comenzar el ensayo habrá que buscar la altura adecuada, es decir, donde exista la menor distancia entre centros de los engranajes.

Ensayo nº8) Desmontaje corona

Por último en lo que a ensayos se refiere, comenzando desde el mismo diente, se realizará el ensayo nº1) pero desmontando la corona de la columna para posteriormente volverla a montar en la misma posición.

3.3.2 Ensayos posición inicial aleatoria

Tomando como referencia los ensayos del apartado anterior, en este se describen aquellos ensayos cuyo punto de partida es aleatorio, es decir el ensayo podrá empezarse desde cualquier diente.

Ensayo nº9) Repetición de ensayos 1 a 8 con posición inicial aleatoria

Para poder caracterizar completamente la máquina habrá que realizar los mismos ensayos (1 a 8) descritos anteriormente en el punto 3.3.1 pero teniendo en cuenta que en

este caso la posición inicial al comienzo del ensayo se escoge aleatoriamente. En cada ensayo se cogerá al azar el diente desde donde comenzar siendo muy interesante numerarlos para anotar el punto de partida en cada caso. También se aconseja que en esa aleatoriedad exista la mayor variedad posible.

Ensayo nº10) Coronas de diferentes tamaños

Por último habrá que repetir el ensayo nº1) del apartado anterior con coronas de diferentes tamaños, es decir con diferente número de dientes. Mediante este ensayo se comprobará como puede afectar el tamaño de la corona.

Con los datos obtenidos en estos ensayos (1 a 10) se podría pensar en realizar otros combinados sobre todo de aquellos parámetros que más afecten a la repetibilidad de la máquina. Por ejemplo se podría repetir un ensayo iniciando en un diente al azar, a diferentes velocidades y modificando la presión del sistema elástico para ver sus variaciones y poderlas comparar con los resultados de los ensayos más controlados en los que solo se hacen variaciones en un solo parámetro.

3.4 Relación ensayos de rodadura con tolerancias de montaje

En este apartado se propone una técnica para enlazar los resultados del ensayo de rodadura a dos flancos de reducciones sinfín-corona con la tolerancia de montaje de la distancia entre centros. Dicha tolerancia de montaje resulta de extrema importancia desde el punto de vista funcional de la reducción y puede ser tenida en cuenta en el ensayo presentado de modo que sea posible evaluar si tendrán un correcto funcionamiento. Pudiera ocurrir que aunque una pareja de engranajes cumpliera con la calidad de rodadura tuviese algún problema en el funcionamiento dentro de algún rango de sus tolerancias de montaje de la distancia entre centros, por lo que con esta técnica se puede pronosticar y evitar futuras interferencias.

Una corona y un sinfín, durante su funcionamiento en una carcasa, tienen sus ejes a una “distancia de funcionamiento” que vendrá determinada por la tolerancia de montaje. En esta posición existe una holgura radial entre los dientes de ambos que es la que permite la rodadura. Si pudiésemos acercar los engranajes hasta que la holgura desapareciera la nueva distancia entre centros es la que denominamos “distancia entre ejes a fondo real”, que es justamente la que se mide en el ensayo de rodadura a dos flancos. Pues bien, determinando los valores máximos y mínimos de esta distancia en función de la holgura radial podremos relacionarla directamente con la tolerancia de la distancia entre centros del montaje del par de engranajes y averiguar donde se puede producir alguna interferencia forzando el funcionamiento de dicho par.

Para ello vamos a definir en primer lugar las primeras variables:

- L : distancia media de funcionamiento nominal
- a''_{\min} : distancia entre ejes a fondo mínima
- a''_{\max} : distancia entre ejes a fondo máxima
- t_{\min} : diferencia mínima entre distancia ejes a fondo real y teórica
- t_{\max} : diferencia máxima entre distancia ejes a fondo real y teórica
- h_{\min} : holgura mínima
- h_{\max} : holgura máxima
- h'_{\min} : holgura normal mínima
- h'_{\max} : holgura normal máxima
- α : ángulo de presión

- Beta: ángulo oblicuo

Para calcular la distancia entre ejes a fondo en un engranaje sinfín-corona hay que tener en cuenta los ángulos de presión y de inclinación de la hélice (ver Figura 58).

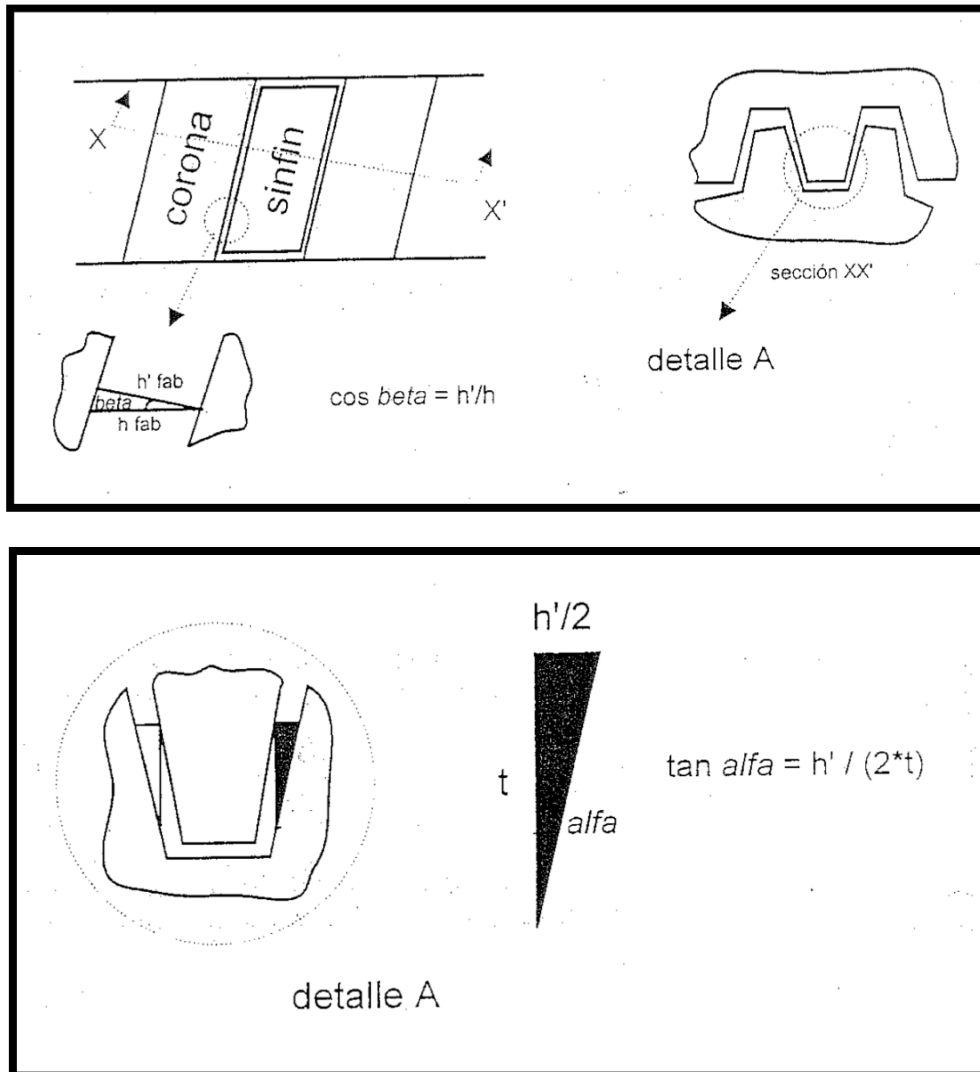


Figura 58 Detalle transformación holgura a distancia entre ejes a fondo

Por lo tanto se puede determinar que las diferencias máximas y mínimas entre distancia ejes a fondo real y teórica serán:

$$t_{\min} = \frac{(h'_{\min} / 2)}{\tan \alpha} = \frac{h_{\min} \cdot \cos \beta}{2 \cdot \tan \alpha}$$

$$t_{\max} = \frac{(h'_{\max} / 2)}{\tan \alpha} = \frac{h_{\max} \cdot \cos \beta}{2 \cdot \tan \alpha}$$

Si nos fijamos en la Figura 59 y con los valores obtenidos anteriormente se puede calcular rápidamente los valores máximos y mínimos de la distancia entre centros a fondo:

$$a''_{\max} = L - t_{\min}$$

$$a''_{\min} = L - t_{\max}$$

Por último las variables que quedan por definir son las siguientes:

- a''_{med} : distancia media entre ejes a fondo
- Aa'' : diferencia distancia ejes a fondo real y distancia media ejes a fondo
- Aa''_{inf} : diferencia Aa'' inferior
- Aa''_{sup} : diferencia Aa'' superior

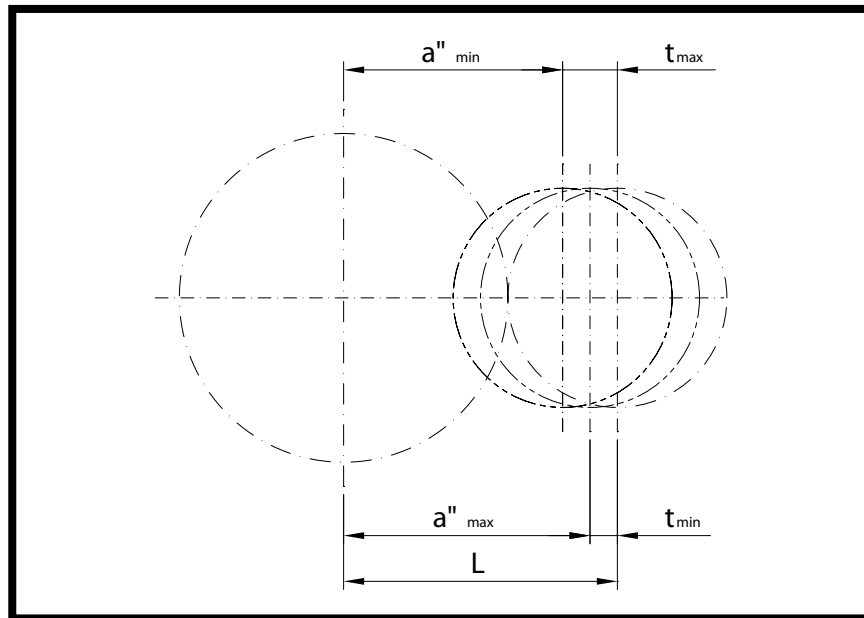


Figura 59 Detalle distancia entre ejes a fondo

Se puede determinar entonces el valor medio (a''_{med}) de la distancia entre centros a fondo el cuál se coge como referencia cero y con él calcular el parámetro Aa'' que relaciona los resultados de los ensayos de rodadura con las tolerancias de montaje.

$$a''_{\text{med}} = (a''_{\max} + a''_{\min}) / 2 \quad (\text{referencia cero})$$

$$Aa''_{\text{inf}} = a''_{\min} - a''_{\text{real}} \quad (\text{valor negativo})$$

$$Aa''_{\text{sup}} = a''_{\max} - a''_{\text{real}} \quad (\text{valor positivo})$$

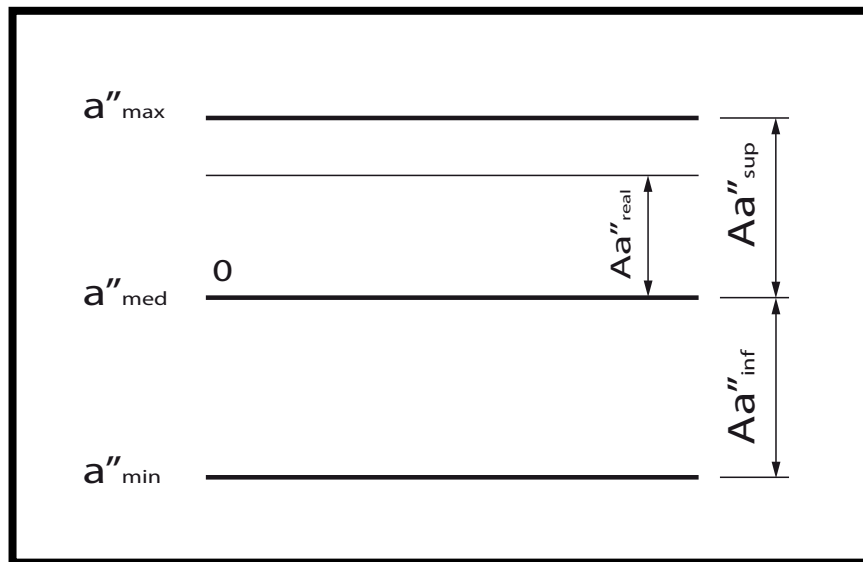


Figura 60 Detalle límites inferior y superior a''

Cualquier valor real Aa''_{real} , es decir medido en el ensayo, tendrá que estar dentro de los límites superior e inferior (ver Figura 60). En el caso del que el valor Aa''_{real} esté por encima del límite superior la transmisión entre los dientes se producirá con mayor juego que el máximo determinado produciendo una de mala calidad. Por el contrario, si el valor Aa''_{real} se encuentra por debajo del límite inferior el juego entre dientes será demasiado pequeño pudiéndose clavar unos dientes con otros.

4 CONCLUSIONES

Los ensayos de rodadura tanto a un flanco como a dos flancos se revelan como el ensayo más cercano a las condiciones de funcionamiento real, por lo que dan idea directa del funcionamiento futuro del engranaje una vez montado en su aplicación final, aportando de manera directa información más allá de la verificación geométrica. En este trabajo fin de master se ha realizado un completo retrofit de una máquina de rodadura a dos flancos para reducciones sinfín corona de tamaño medio, partiendo de una máquina fuera de uso. Se ha presentado el modelado CAD de la máquina y analizado su funcionamiento mecánico, como paso previo al planteamiento de las alternativas de selección de los componentes idóneos tanto de medición como de accionamiento en función de las tolerancias a comprobar y condiciones de ensayo previstas. Se ha descrito con detalle el ensayo de rodadura a dos flancos y se han planteado varios procedimientos de calibración de la máquina en casa del usuario, a modo de procedimientos de calibración periódica de la distancia entre centros, ángulo entre ejes y altura de contacto, para garantizar el correcto posicionamiento de la pareja de engranajes durante el ensayo.

Se ha planteado así mismo un protocolo de verificación mecánica y funcional para este tipo de máquinas, así como los ensayos necesarios para una adecuada caracterización metrológica del instrumento. Este procedimiento sienta además las bases de un procedimiento estándar de verificación de este equipo, inexistente en la actualidad.

Por último se ha implementado una herramienta que permite relacionar el resultado del parámetro Aa'' , diferencia de distancia entre ejes a fondo, con las futuras condiciones de montaje de la reducción, partiendo de las tolerancias de montaje de distancia entre centros nominales de diseño de la carcasa receptora de los engranajes. Dicha herramienta permite relacionar el resultado del ensayo con esta tolerancia de detectando problemas de montaje o funcionamiento antes de dicho procedimiento, evitando problemas en la última etapa de la fabricación desde su origen. Aún obteniendo resultados de parámetros de rodadura dentro de tolerancia para la calidad nominal, que indicarían un correcto funcionamiento de la reducción, dependiendo del valor de este parámetro en combinación con la tolerancia de montaje de la distancia entre centros es posible que se produzca interferencias en condiciones de funcionamiento, por lo que se considera una herramienta muy útil de aplicación industrial directa .

5 MIRADAS AL FUTURO

En la actualidad no existe ningún procedimiento de calibración estándar para este tipo de máquinas. Tampoco existen laboratorios acreditados para calibrar estos dispositivos siendo necesario el desarrollo de un procedimiento de calibración trazable y eficiente que permita a un laboratorio establecer la incertidumbre de medida de un determinado equipo con referencia a patrones nacionales. Existe alguna recomendación sobre verificación de máquinas de rodadura (AGMA 935-A05), donde aparecen recogidos algunos procedimientos de verificación rápida basados en engranajes patrón y procedimientos específicos para algunas partes de la máquina.

Con esto es necesario obtener un procedimiento de calibración que permita sentar las bases de normalización en el procedimiento y presentación de resultados de precisión y repetibilidad, con objeto de que puedan existir laboratorios que se acrediten para calibrar este tipo de máquinas.

Como trabajo futuro, además de dicho procedimiento de verificación, se plantea el desarrollo de un modelo cinemático completo de la máquina que permita obtener la incertidumbre de medida en base a la consideración de las distintas fuentes de error del equipo. Ninguna de las recomendaciones existentes de verificación de este tipo de equipos determina ningún procedimiento de calibración trazable que permita establecer la incertidumbre de calibración o medición, por lo que ninguno de los fabricantes existentes en la actualidad con la capacidad de realización de este tipo de ensayos ofrece un resultado con incertidumbre, siendo muy necesaria dado los escasos márgenes de tolerancia en comparación con las dimensiones exteriores de los engranajes.

La extrema influencia del posicionamiento relativo adecuado entre el sinfín y la corona durante el ensayo hace que los resultados en los parámetros obtenidos sean muy sensibles a las posibles fuentes de error. Por ello se plantea el modelado conjunto de dichas fuentes en un modelo matemático de la máquina que permita simular la influencia de los errores sobre el resultado final permitiendo obtener por simulación la incertidumbre de medida asociada a unas determinadas condiciones de ensayo. Se plantea por tanto el modelado de los errores de posicionamiento del eje del sinfín, el modelado de error de los sistemas de medida y el modelado cinemático de las líneas de

contacto entre flancos, que permitan obtener dicha influencia sobre los parámetros resultado del ensayo.

Todo este trabajo se pretende realizar en el ámbito de una tesis doctoral y sirva este TFM como una etapa de previa de iniciación al mundo de la verificación de engranajes y sus particularidades.

6 BIBLIOGRAFÍA

- AGMA 2015-1-A02, 2002, Accurace Classification System - Tangential Measurements for Cylindrical Gears.
- AGMA 915-1-A02 Inspection Practices - Part 1: Cylindrical Gears - Tangential Measurements.
- AGMA 915-2-A05 Inspection Practices - Part 2: Cylindrical Gears - Radial Measurements.
- AGMA 935-A05 Recommendations Relative to the Evaluation of Radial Composite Gear Double Flank Testers.
- ANSI/AGMA 2015-1-A01 Accuracy Classification System -Tangential Measurements for Cylindrical Gears
- ANSI/AGMA 2015-2-A06 Accuracy Classification System – Radial Measurements for Cylindrical Gears
- BauBmann, U., 2002, Geometrisches Prüfverfahren kombiniert mit Geräuschverhaltensanalyse, Antriebstechnik 41 (2002), no. 8, p. 26-27.
- Chen, J. S.; Kou, T. W.; Chiou, S. H. “Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer”. Precision Engineering, vol. 23, nº 4, 1999, pp. 243-252.
- Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth
- Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
- DIN 3963 Tolerances for cylindrical gear teeth-Tolerances for working deviations
- DIN 3965 Tolerancing of bevel gears-Tolerances for tangential composite errors
- DIN 58405-2 Spur gear drives for fine mechanics-Gear fit selection, tolerances, allowances.
- Einflanken- Walzprüfung PSKE 900, PSE 600, PEW 03. Klingelnberg Sohne GmbH.
- Functional gauging products. M&M Precision Systems Corporation, Dayton, Ohio, 1998.
- Gear Roll testing Instruments, MSB 2550, Gleason-Mahr product description, Gottingen, Germany, 2002.
- Hirt, M., Pinnekamp, B., 2002, Trends in Research and Development in German Gear Industry, In, International Conference on Gears Vol. 1, VDI Berichte 1665, p. 13-22.
- ISO DIS 18683, 2002, Gears-Evaluation of instruments for the measurement of gears.

ISO 1328, Cylindrical gears - ISO system of accuracy. Part 1, 1995-02, and Part 2, 1997-08.

Knapp, W. "Measurement uncertainty and machine tool testing". Annals of the CIRP, vol. 51, nº 1, 2002, pp. 459-462.

Kunzmann H.; Trapet E.; Wäldele, F. "An uniform concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects". Annals of the CIRP, vol. 39, nº 1, 1990, pp. 561-564.

ISO/TR 10064, Cylindrical gears - Code of inspection practice. Part 1-5, 1998.

Metrology Systems, M&M Precision Systems Corporation, Dayton, Ohio, 1997.

Pommer, A., 2002, Gear ROLLSCAN for High Speed Gear Measurement. A Revolutionary New Method for a Complete Topographical Inspection of Gears, in: International Conference on Gears Vol. 2, VDI Berichte 1665, p. 785-796.

URM Gear Rollscan, ears. UWS-E, Version 02/2000, FRENCO GmbH, 2000.

VDI/VDE 2608, Draft 1999-06, Einflanken- und Zweiflanken- Walzprüfung an Zylinderrädern, Kegelrädern, Schnecken und Schneckenrädern. (Tangential composite and radial composite inspection of cylindrical gears, bevel gears, worms and worm wheels.)

Weck, M., Plewnia, C., Einflanken-Walzabweichung und Getriebegetrausche von kegelradvelzahnungen, 1991, Antriebstechnik30 (1991), No 11, p. 70-73.

Zhang, G., Veale, R., Charlton, T., Brochardt, B., Hocken, R., "Error compensation of coordinate measuring machines" *CIRP* vol 34/1, pp. 445-448, 1985.