

Influencia de los defectos geométricos en la superficie de contacto de un disipador de calor, orientado a la asignación de sus tolerancias de fabricación

J. Serrano Mira¹, G. M. Bruscas Bellido², C. Vila Pastor³, J. V. Abellán Nebot⁴

¹Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. jserrano@uji.es

²Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. bruscas@uji.es

³Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. vila@uji.es

⁴Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. abellan@uji.es

Las desviaciones de la geometría real en los componentes fabricados respecto de la geometría ideal tratada durante el diseño provocan la aparición de anomalías durante el funcionamiento de componentes ensamblados, siendo necesario limitar estas desviaciones mediante una apropiada síntesis de tolerancias (su especificación y la asignación de sus valores) de modo que se garantice la funcionalidad. Esta síntesis de tolerancias se deberá llevar a cabo efectuando un estudio detallado de cómo las desviaciones de fabricación afectan a la función, y asignando valores de las tolerancias atendiendo a criterios de capacidad y de costes de fabricación. Sin embargo, las relaciones entre el valor de las tolerancias y la calidad de funcionamiento no están siempre claras, por lo que las tolerancias se especifican asignando valores "habituales" o recomendados. Este proceder es frecuente y lleva a que se establezcan, con gran frecuencia, esquemas inconsistentes de tolerancias, que conducen a asignar valores para las tolerancias excesivamente estrechos. Como consecuencia de todo ello las piezas resultan caras y el propio funcionamiento del conjunto puede incluso no quedar garantizado. En este trabajo se analiza un sistema compuesto por un circuito integrado (CI) y un disipador de calor sobre él montado, estudiando cómo influyen los errores de fabricación presentes en la superficie del disipador en la capacidad de transmisión de calor en la zona de contacto entre CI y disipador, siendo el requisito funcional la transmisión de una cantidad de calor Q definida bajo unas condiciones de contorno ambientales. Como resultado se obtendrán las ecuaciones funcionales que ligan el RF con la tipología y magnitud de los errores, particularizado para el caso concreto de los defectos de rugosidad superficial en la superficie del CI.

1. Introducción

Tradicionalmente, el tratamiento de las tolerancias ha sido una de las actividades más difíciles y menos entendidas. Las relaciones entre el valor de las tolerancias y la calidad de funcionamiento no están siempre claras. Es bastante difícil definir conjuntos interrelacionados de requerimientos totalmente consistentes en posición, distancia, concentricidad, rectitud, etc. Usualmente las tolerancias se especifican para todos los requerimientos funcionales sin prestar mucha atención a sus efectos. Este proceder es habitual y lleva a que se establezcan, con gran frecuencia, esquemas inconsistentes de tolerancias que conducen a asignar valores para las mismas excesivamente estrechos. Como consecuencia de todo ello, las piezas resultan caras y el propio funcionamiento del conjunto puede incluso no quedar garantizado.

A lo anterior se ha de añadir que muchas compañías no tienen clara la metodología para especificar las tolerancias. La mayoría de los diseñadores utilizan su intuición y experiencia, y sólo algunas veces siguen reglas generales. Como consecuencia de ello, muchos de los diseños no contienen todas las tolerancias funcionales relevantes mientras algunos valores de las tolerancias son demasiado estrechos. Se requiere, pues, de una estrategia orientada a la especificación de tolerancias de un modo fiable y claro, y que tenga presente en todo momento las consideraciones de fabricación, inspección y montaje.

Cuando se aborda el diseño de detalle de la geometría de los componentes de un producto o de un mecanismo, el punto de partida son un conjunto de Requisitos Funcionales (RF) cuantificables que éste deberá de cumplir y cuyo cumplimiento determinan las condiciones de aptitud del mismo. De entre estos RF iniciales, unos darán lugar a las dimensiones de los componentes mediante la aplicación de "Técnicas y Leyes de Cálculo de

Ingeniería”, y otros darán lugar al establecimiento de los valores de la geometría de precisión, esto es, los valores objetivo de los ajustes y de las variabilidades admitidas: tolerancias dimensionales y geométricas, y acabados superficiales. A aquellos RF que determinan las dimensiones de los componentes se les denominará en adelante RF dimensionales (RFd), y RF de precisión (RFp) a los que determinan la geometría de precisión. El conjunto de los resultados obtenidos para el cumplimiento de ambos tipos de RF conformará el acotado funcional de los componentes, tal como se ilustra en la figura 1.

Los procedimientos y metodologías de cálculo para la obtención de los valores de los parámetros que garantizan el cumplimiento de los RFd suele ser muy claro y ha sido ampliamente tratado por todas las ramas de la ingeniería. Sin embargo, la situación es completamente contraria para el caso de los RFp pues, tal y como indica Srinivasan [1], la interrelación entre los errores geométricos de precisión (o tolerancias establecidas o admitidas) y la funcionalidad de los elementos del mecanismo ha sido, tradicionalmente pésimamente definida y pobremente comprendida. Por ello, el estudio y conocimiento de tales relaciones es una necesidad acuciante en el contexto moderno de avances en materiales y en tecnologías de fabricación, que allanan el camino para obtener una precisión más elevada en los componentes de los mecanismos.

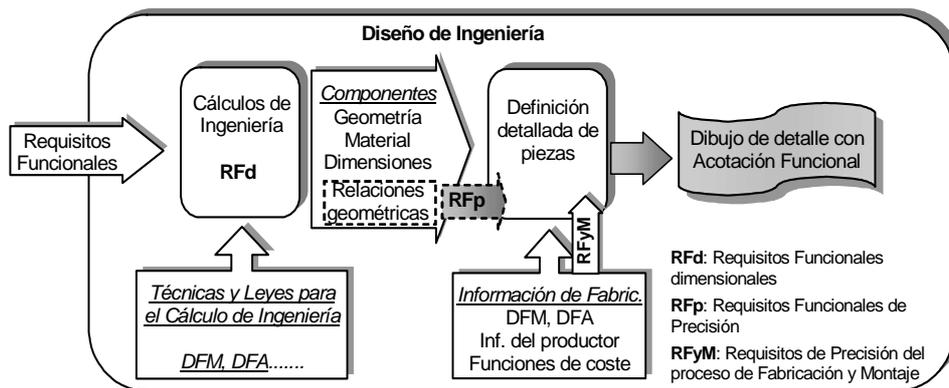


Figura 1: Esquema de tareas y flujo de información para la transformación de los RF en el acotado funcional.

Supóngase el ejemplo del diseño de un árbol de una transmisión que deba transmitir un determinado valor de par a través de un engranaje montado en apriete. El proceso para el dimensionado de su diámetro nominal es bastante claro para cualquier ingeniero mecánico, teniendo en cuenta aspectos de esfuerzos, fatiga, deformaciones, materiales, picos de cargas, coeficientes de seguridad, etc. Sin embargo, para el dimensionado del ajuste mediante interferencia, tendría serias dificultades para (o le sería casi imposible con sus conocimientos) determinar procedimiento a seguir para los cálculos del valor objetivo del apriete y de su variabilidad, siendo la opción adoptada la de utilizar valores habituales o recomendados en manuales de diseño para casos generales. Esta misma dificultad la encontraría asimismo a la hora de establecer otras especificaciones de precisión tales como rectitud del eje del árbol, redondez, y acabado superficial.

Consecuentemente, se hace necesario determinar de las ecuaciones que rigen el comportamiento de los RFp en función de las pequeñas variaciones dimensionales y de forma y orientación controladas mediante las tolerancias, ecuaciones que se denominarán Ecuaciones Funcionales (EcF). El conocimiento de estas EcF permitirá asignar las tolerancias garantizando de un modo mucho más seguro la funcionalidad, a la vez que ofrecerá la posibilidad de reducir los costes de fabricación al poder asignar los valores de las tolerancias utilizando criterios coste mediante el uso de las funciones de coste vs tolerancia. Con ello, se podrán obtener productos más confiables, con mayor fiabilidad, y a un coste menor.

En el presente trabajo se expone un ejemplo de la obtención de estas EcF aplicado al caso del RF de transmisión de calor a través de la superficie de contacto entre la superficie metálica de un circuito integrado (C.I.) y su correspondiente disipador. El objetivo perseguido será la síntesis de tolerancias correspondientes a la superficie metálica del C.I... Este proceso de síntesis de tolerancias consta de dos tareas: la especificación de tolerancias (determinar qué tolerancias son necesarias), y la asignación de tolerancias (qué valores pueden tomar estas tolerancias). Para ello, en el siguiente punto se ha llevado a cabo una revisión de los trabajos previos en este campo, siguiendo con la resolución del problema propuesto (comenzando con el planteamiento del mismo, y continuando con el proceso de especificación de tolerancias, y finalizando con la obtención de las EcF que rigen el comportamiento). Tras la resolución del problema, se realiza un análisis de los resultados obtenidos, para finalizar con la exposición de las principales conclusiones del trabajo y propuesta de futuros trabajos.

2. Trabajos previos

La “Teoría del Diseño Axiomático (TDA)” desarrollada por Shu [2-4], y en ejemplos de aplicación mostrados por Johannesson y Söderberg [5], trata la transformación de los RF de alto nivel en Parámetros de Diseño (PD) de bajo nivel relacionándolos mediante matrices, y estos PD a su vez se transforman en Variables de Proceso (VP) que son restricciones geométricas definibles mediante tolerancias. Sin embargo, se centra en la especificación de tolerancias y no trata el establecimiento de las EcF. Por otra parte, Srinivasan, McAdams y Wood [1, 6-8] proponen analizar cómo los errores geométricos debidos a las imperfecciones de fabricación afectan a la condición funcional, centrando sus esfuerzos en el modelado de los errores (empleando la teoría de los fractales en muchos casos) y en el tratamiento matemático del RF en función de los errores de fabricación, con lo que obtienen la relación entre el RF y las variabilidades de la geometría de precisión o tolerancias, si bien no establecen una metodología clara para realizar la especificación de tolerancias. Entre los ejemplos tratados por estos autores, resultan interesantes el del estudio del patín de un cojinete hidrodinámico de empuje axial [1] el del estudio de las vibraciones generadas en un seguidor de leva por los errores en la leva [8]. Otro trabajo interesante es el realizado por Zhang et al. [9] en donde se analiza el modo en el que los errores geométricos presentes en la aguja y en el orificio de salida de un inyector de gasóleo para motores diesel afectan al grado de pulverización del combustible, obteniendo las EcF que relaciona el RF con los errores en los componentes, y llegando a la conclusión de que el parámetro más influyente es la tolerancia dimensional del diámetro y el modo de verificarlo, mientras que los errores de redondez influyen escasamente (el fabricante para el que se realiza el estudio establecía tolerancias dimensionales y de redondez muy estrechas).

Por su parte, Serrano [10] propone una metodología para la transformación de los RF de alto nivel en Características Geométricas Funcionales (CGF) de bajo nivel expresables directamente mediante tolerancias, y estando estas relacionadas directamente con los RF de alto nivel mediante ecuaciones matemáticas. Esta metodología integra las tareas de especificación y asignación de tolerancias con la inclusión de las EcF. Esta metodología se ha aplicado a varios casos de estudio: las vibraciones generadas por los defectos de ondulación en el anillo interno y externo de un rodamiento de bolas de contacto angular [11 y 12] y a un dispositivo de detección de posición mediante la medida de la capacidad del condensador formado por sus componentes [13].

3. Planteamiento del caso de estudio y especificación de tolerancias

El caso de aplicación sobre el que se va a realizar el estudio es el que se describe a continuación.

En el proceso de diseño del encapsulado del circuito integrado (C.I.) mostrado en la figura 2, se ha decidido colocar una superficie plana metálica sobre la que se apoyará un disipador de calor de aluminio, cuya finalidad no es otra que la de evacuar el calor generado durante el funcionamiento del circuito integrado, evitando que éste alcance temperaturas elevadas que comprometan su funcionamiento. Se conocen las características del disipador por tratarse de un elemento habitual del mercado y, por tanto, el problema de diseño se centra en establecer las características que debe cumplir la placa metálica sobre la que se montará el disipador, establecidos los materiales, ubicaciones y demás condiciones de contorno (temperaturas, corrientes de aire, etc.). Así pues, el requisito funcional queda planteado como la necesidad de “Transmitir una cantidad de calor Q desde el circuito integrado hasta el disipador”.

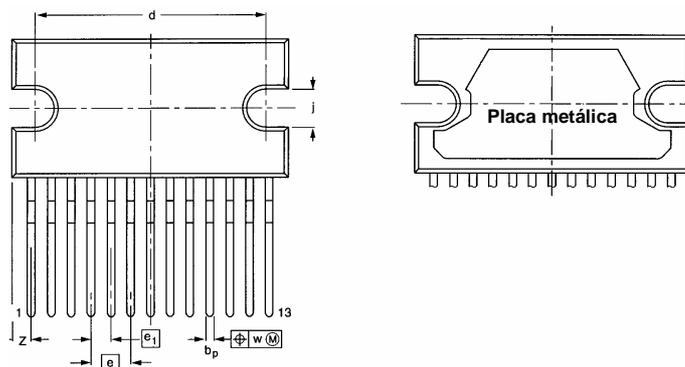


Figura 2: Acotado del circuito integrado a falta de la placa metálica de refrigeración.

Para dar solución al problema planteado, será necesario transformar el RF de alto nivel (“Transmitir una cantidad de calor Q desde el circuito integrado hasta el disipador”) en Características Geométricas Funcionales (CGF) de bajo nivel expresables directamente mediante tolerancias y acabados superficiales, obteniendo asimismo las EcF que relacionan el RF con las CGF.

La primera tarea consiste en las CGF. Para ello se utiliza el proceso de Zigzag Funcional descrito en [10 y 13]. Mediante este proceso, se transforman los RF de primer nivel en los Parámetros de Diseño (PD) de primer nivel que los controlan, los cuales pasan a convertirse en RF de segundo nivel, obteniéndose a continuación los PD de segundo nivel, y así sucesivamente hasta llegar al nivel más bajo en el cual los PD son expresables directamente mediante especificaciones de tolerancias y acabados superficiales. El proceso de Zigzag Funcional para el caso de estudio es el mostrado en la figura 3(a), observándose que se desarrolla en tres niveles, respondiendo a las siguientes consideraciones:

- La transmisión de calor entre dos superficies en contacto depende fundamentalmente de la resistencia térmica de contacto, que a su vez depende del par de materiales en contacto (y de las propiedades del aire en las zonas de no contacto), de la superficie real de contacto, y de la forma del contacto.
- El área real de contacto depende del tamaño de la zona aparente de contacto y de la regularidad de ésta.
- La zona aparente de contacto queda definida por sus dimensiones, en este caso su largo y su ancho.
- La regularidad de la zona de contacto queda determinada fundamentalmente por la planicidad y por la rugosidad. La combinación de ambas es quien determina el área real de contacto por unidad de superficie.

Como resultado de la especificación se obtiene un conjunto de cuatro CGF que dan lugar al acotado mostrado en la figura 3(b). El paso posterior es el de obtención de las EcF que es tratado en el apartado siguiente.

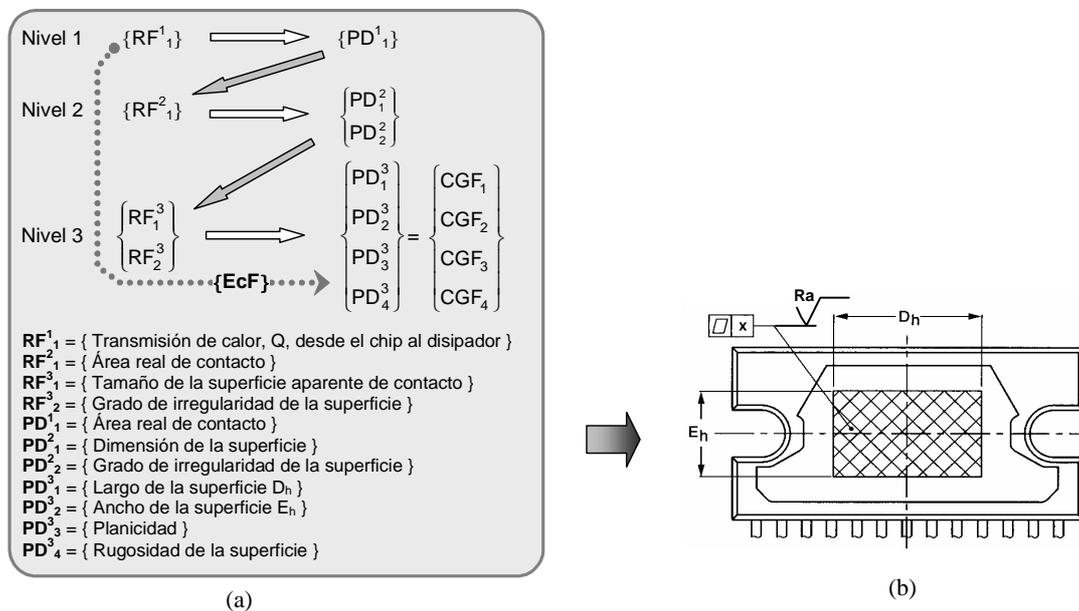


Figura 3: Proceso de Zigzag Funcional (a), y esquema de acotado de la placa metálica del C.I. resultante (b).

4. Obtención de las Ecuaciones Funcionales (EcF)

Tras haber realizado el Proceso de Zigzag Funcional, el estado de resolución del problema es el mostrado en la figura 4, en donde se observa que ha sido establecido el único RF exigido y obtenidas las CGF que los determinan, quedando pendiente de obtener las EcF que los relacionan.

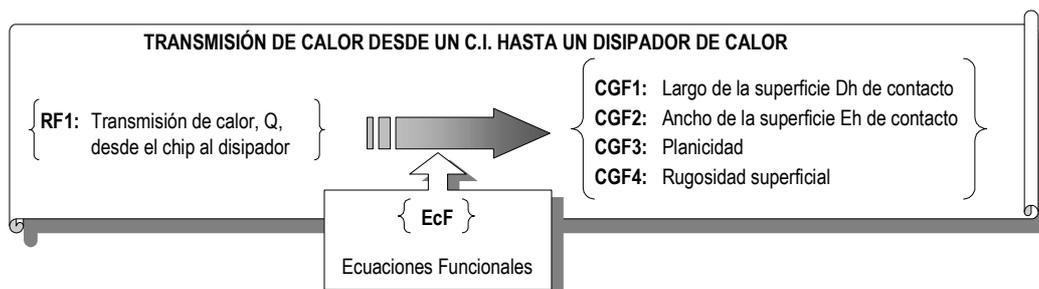


Figura 4: Planteamiento del problema de transmisión de calor desde el C.I. hacia el disipador.

Dada la extensión del trabajo, y puesto que el objeto es mostrar la necesidad y utilidad de la obtención de las EcF que vinculan los RF con las especificaciones de precisión CGF, únicamente se va a abordar la obtención de la EcF4 que relaciona el RF1 con la rugosidad superficial (CGF4), lo que implica asumir que la superficie es perfectamente plana pero no lisa. Además, y dado que el objetivo es analizar la influencia de los defectos presentes en la placa metálica del C.I., se asumirá también la hipótesis de que la superficie de contacto del disipador es ideal (plana y perfectamente lisa).

Para obtener esta EcF es necesario establecer el principio físico que rige el comportamiento del RF en función. Posteriormente se deberán modelar los errores geométricos controlados mediante las CGF (en este caso sólo la CGF4), y analizar cómo influyen estos errores en el valor final del RF.

Entre dos superficies ideales que se encuentran en contacto y a distinta temperatura se produce un flujo de calor de la más caliente a la más fría. Una parte de este flujo de calor se produce por conducción a través de la zona de contacto entre ellas, y otra parte del flujo es debida a la transmisión de calor por radiación.

Sin embargo, en las superficies reales, debido a las pequeñas irregularidades de las superficies, el área correspondiente a la superficie real de contacto es tanto menor que la superficie aparente cuanto mayor sea el grado de irregularidad. Debido a ello, en las zonas en las que haya contacto físico entre las superficies el flujo de calor es por conducción entre las superficies en contacto y por radiación en el vacío; pero en aquellas zonas en las que no hay contacto físico el flujo de calor se produce por conducción a través de la capa de aire entre ellas (despreciando el efecto de la transmisión de calor por convección dado que al ser el espacio muy pequeño no se produce movimiento del aire), y otra parte del flujo es debida a la transmisión de calor por radiación a través del aire. Esto se puede ver en la figura 5, en donde se muestra que en las zonas de contacto irregular a lo largo del espesor de la zona de contacto en un elemento diferencial de superficie el calor se transmite por conducción a través del metal de la irregularidad (q_m) y por conducción y radiación (q_{a-c} y q_{a-r} respectivamente) a través del espacio con aire.

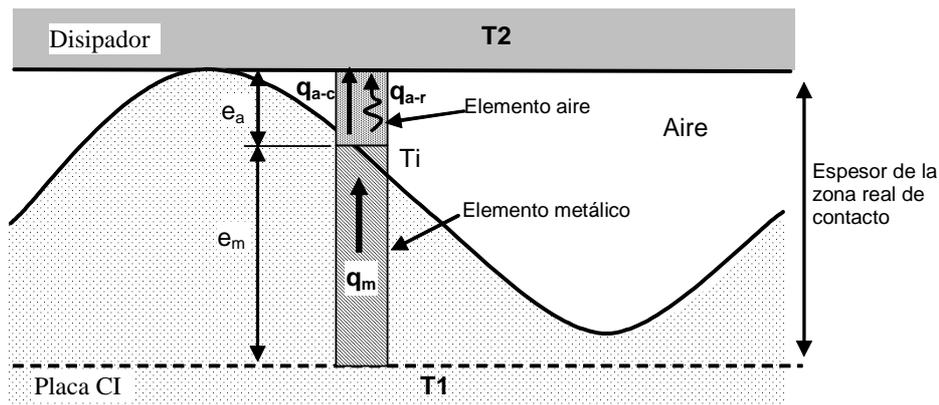


Figura 5: Modelo de la transmisión de calor desde el C.I. hacia el disipador en presencia de irregularidades.

Aplicando las ecuaciones de transmisión de calor a ambas zonas, se obtiene que el flujo de calor por elemento diferencial de superficie viene determinado por las expresiones de la ecuación (1), en donde k_m representa la conductividad del metal, k_a la conductividad del aire, y T_i la temperatura intermedia, siendo el resto de los parámetros los ilustrados en la figura 5.

$$\left. \begin{aligned} q_m &= k_m \Delta T \frac{dA}{e_m} = k_m (T_m - T_i) \frac{dA}{e_m} \\ q_a &= q_{a-c} + q_{a-r} = \left(k_a \Delta T \frac{dA}{e_a} \right) + q_{a-r} = \left(k_a (T_i - T_2) \frac{dA}{e_a} \right) + q_{a-r} \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_m = q_a \quad (1)$$

La componente de transmisión de calor por radiación a través del aire (q_{a-r}) se puede expresar mediante la ecuación (2), donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$), ϵ la emisividad o emitancia de cada componente (aproximadamente 0,035 para el aluminio sin oxidar), y $\rho = 1 - \epsilon$.

$$q_{a-r} = \frac{\sigma (T_i^4 - T_2^4)}{\frac{\rho_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{i,2}} + \frac{\rho_2}{\epsilon_2}} dA \xrightarrow{F_{i,2} \approx 1} q_{a-r} = \frac{\sigma (T_i^4 - T_2^4)}{\frac{\rho_i}{\epsilon_i} + 1 + \frac{\rho_2}{\epsilon_2}} dA \quad (2)$$

Las temperaturas de la zona intermedia T_i y la del disipador T_2 serán muy similares al tratarse de transmisión de calor a baja temperatura, por lo que el término de calor transmitido por radiación será despreciable debido a lo pequeño de la constante σ . De este modo, aplicando el principio de conservación de la cantidad de calor transmitido, se obtiene que el valor del calor transmitido queda expresado por la ecuación (3).

$$\left. \begin{array}{l} q_{a-r} \approx 0 \\ q_m = q_a \\ \text{Ecuac.(1)} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{dq}{dA} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e_m}{k_m} + \frac{e_a}{k_a}} \quad (3)$$

El siguiente paso consistirá en modelar los errores geométricos definidos por la CGF4, y proceder a la definición matemática de la relación entre el RF y la CGF4.

Fijando las dimensiones de la zona de contacto D_h y E_h y despreciando su variabilidad por suponerse muy pequeñas en comparación con su valor nominal, el área aparente de contacto A_p queda fijada, por lo que el RF de flujo de calor total Q se puede expresar en forma de flujo de calor por unidad de superficie aparente como $q_p = Q/A_p$. Aplicando el símil eléctrico, para una diferencia de temperaturas $\Delta T = (T_1 - T_2)$, el valor dado para este RF será $q_p = \Delta T/R_c$, siendo R_c la resistencia de contacto en la zona de contacto (concepto utilizado en transferencia de calor), la cual es función de la CGF4.

Consecuentemente, se deberá proceder a obtener $R_c = f(CGF4)$. Para ello, se ha de modelar la rugosidad superficial CGF4, para lo que se deberá suponer un posible proceso de fabricación.

Suponiendo que la superficie final se obtiene mediante un proceso de mecanizado convencional, por ejemplo planeado frontal en fresado, la rugosidad dependerá del radio de punta de la herramienta, del avance (avance por diente en este caso), de la velocidad de corte, del radio de la fresa y de la profundidad de pasada axial. Aunque hay múltiples trabajos que estudian de forma experimental la relación entre la rugosidad media (R_a) y los parámetros de corte, por simplificación se va a utilizar la expresión aceptada para torneado utilizando como avance el avance por diente, de modo que se puede estimar que la rugosidad máxima (R_M) y la R_a están relacionadas con el radio de punta de la herramienta (r) y con el avance por diente (s_z) mediante las relaciones dadas en (4), expresándose R_M y R_a en μm , y r y s_z en mm.

$$R_M = \frac{s_z^2}{8 \cdot r} \cdot 10^3 \quad R_a = \frac{s_z^2}{32 \cdot r} \cdot 10^3 \quad (4)$$

El perfil teórico $y(x)$ obtenido para la rugosidad es el mostrado en línea continua en la figura 6, que se corresponde al caso de $s_z = 0,2$ mm y $r = 0,8$ mm, siendo $y(x) = r \cdot (r^2 - x^2)^{1/2}$ la expresión matemática del perfil de rugosidad para el primer tramo (entre cero y la mitad del periodo) en el caso general. De este modo, fijado un radio de punta, para una rugosidad dada el avance por diente quedará fijado de forma que también lo estará el paso de la ondulación de la rugosidad siendo igual a dicho avance. Con ello, el objetivo será el cálculo de la resistencia de contacto R_c para un periodo completo de la oscilación de rugosidad. Para ello se puede proceder a realizar la integral de R'_c (correspondiente al valor de R_c por unidad lineal de perfil) a lo largo de un semiperiodo, integración que se puede llevar a cabo numéricamente o bien mediante integración discreta o numérica. El método que se va a utilizar es este segundo, de modo que el modelo discretizado para integración será el mostrado en la figura 6.

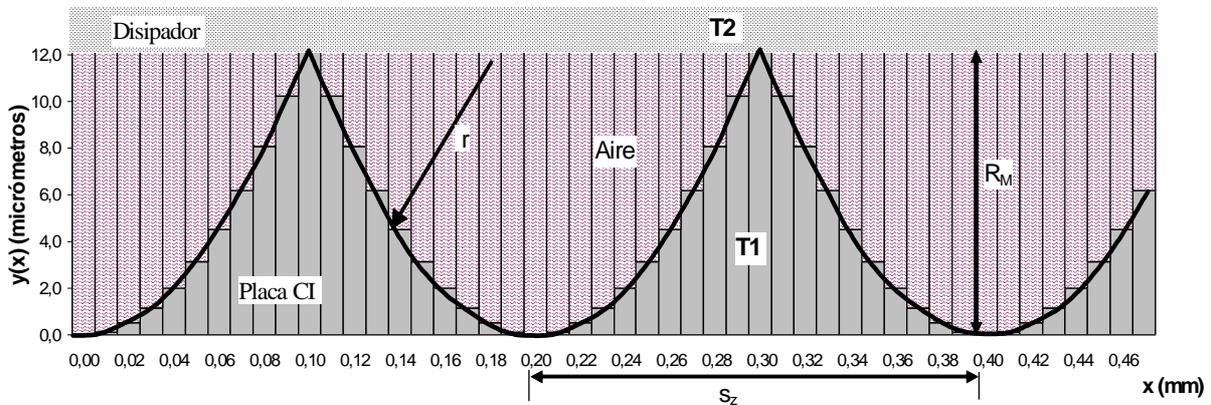


Figura 6: Modelo utilizado para la integración discreta a lo largo de un periodo de oscilación de rugosidad.

El modelo anterior se ha aplicado para diferentes valores de R_a , y para dos valores de r , en concreto 0,4 y 0,8 mm, tomando como conductividad del metal la del aluminio $k_m=205$ W/mK y para el aire $k_a=0,029$ W/mK que se corresponde con la de éste a 40°. La integración numérica se ha realizado con 18 elementos de discretización por periodo, siendo los resultados obtenidos los mostrados en la tabla 1. Por otra parte, y para observar visualmente la evolución de la resistencia de contacto en función de la rugosidad superficial media y de los radios de punta, en la figura 7 se ilustra la representación gráfica de estos resultados

Tabla 1: Parámetros de cálculo de los diferentes casos estudiados y valores de R_c obtenidos.

Radio de punta r (mm)	Rugosidad media R_a (μm)	Rugosidad máxima R_M (μm)	Avance por diente s_z (mm)	Resistencia de contacto térm. R_c ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Resistencia de contacto térm. $R_c \times 10^6$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
0,8	1,0	4	0,160	2,7E-06	2,72
0,8	2,0	8	0,226	5,3E-06	5,33
0,8	3,0	12	0,277	7,8E-06	7,84
0,8	4,0	16	0,320	1,0E-05	10,23
0,8	5,0	20	0,358	1,2E-05	12,49
0,8	6,0	24	0,392	1,5E-05	14,60
0,8	7,0	28	0,423	1,7E-05	16,56
0,8	8,0	32	0,453	1,8E-05	18,35
0,4	1,0	4	0,113	2,7E-06	2,67
0,4	2,0	8	0,160	5,1E-06	5,11
0,4	3,0	12	0,196	7,3E-06	7,30
0,4	4,0	16	0,226	9,2E-06	9,18
0,4	5,0	20	0,253	1,1E-05	10,66
0,4	6,0	24	0,277	1,2E-05	11,67
0,4	7,0	28	0,299	1,2E-05	12,03
0,4	8,0	32	0,320	1,2E-05	11,55

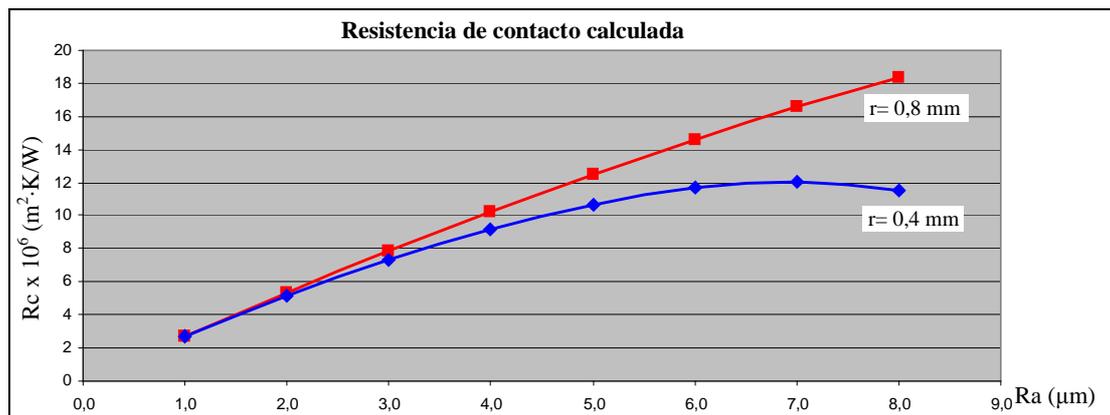


Figura 7: Resistencia de contacto calculada en función de la rugosidad media R_a , y para dos radios de punta.

Con los resultados obtenidos, se han calculado las curvas de ajuste para cada uno de los dos radios de punta, las cuales presentan un coeficiente de correlación prácticamente unidad. Con ello, se puede escribir la EcF buscada que relaciona el RF con la CGF4. Así, la EcF se puede expresar mediante (5), en donde R_a se expresa en μm , la resistencia de contacto R_c en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, el área aparente A_p en m^2 , las temperaturas en K y el flujo de calor en W.

$$\left. \begin{aligned} r = 0,8\text{mm} &\rightarrow R_c = (-0,0682R_a^2 + 2,8571R_a - 0,0919) \cdot 10^{-6} \\ r = 0,4\text{mm} &\rightarrow R_c = (-0,0188R_a^3 + 0,0193R_a^2 + 2,4693R_a + 0,2158) \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c} \cdot A_p \quad (5)$$

5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha expuesto de forma resumida una metodología que permite determinar aquellos errores observados en las piezas fabricadas que influyen en los requisitos funcionales (RF) que implican geometría de precisión (RFp) en los componentes de un mecanismo o de un dispositivo. Además, se ha mostrado mediante un caso de aplicación cómo obtener las EcF que relacionan los RF y los errores en las piezas fabricadas mediante el estudio detallado del principio físico que rige el comportamiento del RF y cómo éste se ve afectado por las variabilidades geométricas.

La utilidad de es doble. Por un lado, el hecho de conocer en detalle el comportamiento del RF y su relación con la variabilidad geométrica permite analizar en detalle la funcionalidad y establecer valores objetivo y variabilidad admitida para el RF de una forma más coherente. Por otro, el conocer de una forma objetiva y cuantitativa la relación entre los errores geométricos y la funcionalidad permite seleccionar aquellas tolerancias que realmente son funcionales (garantizan la funcionalidad) y asignarles valores apropiados. Ambas utilidades permiten mejorar la calidad y la fiabilidad, así como reducir los costes por cuanto solo se especifican aquellas tolerancias realmente necesarias (evitando sistemas de acotado incoherentes y/o sobrerrestringidos) y tanto a éstas como a los RF permite asignarles la mayor variabilidad posible compatible con la función.

Además, estas relaciones matemáticas entre la variabilidad funcional y las tolerancias pueden ser utilizadas para realizar un reparto directo de la variabilidad funcional entre las tolerancias que la influyen mediante el uso de funciones de coste vs tolerancias, evitando así un doble reparto de tolerancias, lo cual redundaría en la reducción de costes. Esta utilidad se observa claramente en los resultados obtenidos en el ejemplo, puesto que mediante las ecuaciones (4) y (5) se puede relacionar directamente el RF con los parámetros de proceso (s_z y r) de modo que la variación en la exigencia funcional repercute directamente en el tiempo de procesado y, con ello, en el coste.

En cuanto al caso de estudio aplicativo de la metodología, éste se ha realizado únicamente para la variabilidad de la rugosidad superficial de la superficie de la placa metálica del C.I. Como continuación del trabajo se propone el incorporar la influencia de la rugosidad superficial de la superficie del disipador, así como los errores de planicidad de ambas superficies. Además, es deseable contrastar la validez de los resultados teóricos obtenidos, para lo que se propone la realización de experimentos que permitan obtener el valor de la resistencia de contacto para diferentes casos de piezas mecanizadas mediante medición directa de dicha resistencia de contacto.

6. Referencias

- [1] R.S.Srinivasan. A Theoretical Framework for Functional Form Tolerances in Design for Manufacturing; These of PhD, University of Texas at Austin, (1994).
- [2] N. P. Suh. The Principles of Design. Oxford University Press New York, (1990). ISBN 0-19-504345-6.
- [3] N. P. Suh. Axiomatic design theory for systems, Research in Engineering Design, 10 (1998), 189-209.
- [4] N. P. Suh. Axiomatic Design: Advances and Applications, Oxford University Press, (2001), ISBN 978-0195134667.
- [5] R. Söderberg; H. Johannesson. Tolerance Chain Detection by Geometrical Constraint Based Coupling Analysis. Journal of Engineering Design, 10 (1999), 5-24.
- [6] R.S.Srinivasan, K. Wood. Geometric Tolerancing in Mechanical Design Using Fractal-Based Parameters, ASME Journal of Mechanical Design, 117 (1995), 203-205.
- [7] R.S.Srinivasan, K. Wood, D. McAdams. Functional Tolerancing: A Design for Manufacturing Metodology, ASME Journal of Mechanical Design, 8 (1996), 99-115.
- [8] D. McAdams, K. Wood. The effect of a fractal tolerance on the dynamic performance of cams, ASME Design For Manufacturing Conference, Irvine, Canadá, (1996).
- [9] C. Zhang, X. Zhang, B.Wang. Functional Dimensioning and Tolerancing of Manufactured Parts for Fluid Leakage Control, Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications, Chapman & Hall, (1998), ISBN 0412 83000 0, 157-170.
- [10] J. Serrano Mira. De la Función a la Fabricación: Metodología para el Tratamiento Integrado de Tolerancias en Conjuntos Mecánicos; Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, (2016).
- [11] J. Serrano Mira, J. Sancho Brú. Análisis de la influencia de defectos geométricos en los anillos de un rodamiento en la generación de vibraciones, orientado a la asignación de tolerancias de fabricación, Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica, 1 (2000), 461-466. ISSN: 0212-5072.
- [12] J. Serrano Mira, G. M. Bruscas Bellido, J. V. Abellán Nebot, F. Romero Subirón. Influence of Geometric Defects in Bearing Outer Race on Vibration Generation: An Oriented Study for Manufacturing Tolerances Specification and Allocation, 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croacia, (2010).
- [13] F. Romero Subirón, J. Serrano Mira. Tratamiento Integrado de las Tolerancias en Diseño-Fabricación-Inspección, X Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, Chile, (2002).

Actualización/retrofiteado de una máquina de una coordenada

E. García Bellido¹, M. A. Sáenz-Nuño², F. Moreno Bellido³, N. Díez³, F. Parejo⁴

¹Graduado en Ingeniería Electromecánica por Universidad Pontificia Comillas, eduardogarciabellido@gmail.com

²Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Pontificia Comillas, msaenz@icai.comillas.edu

³Laboratorio Metrología Dimensional, Readaptación profesional. Hospital de Majadahonda FREMAP
francisco_moreno@fremap.es, noelia_diez@fremap.es

⁴Renishaw, Francisco.Parejo@Renishaw.com

Este trabajo muestra una solución viable y económica para la puesta a punto de máquinas de una coordenada. Actualmente son muchos los laboratorios que disponen de equipos con una mecánica completamente operativa pero obsoletos en su electrónica. Así fue el caso que se presentó en el laboratorio acreditado por ENAC dueño del equipo retrofiteado, una Mahr 828. La casa comercial no ofreció una solución viable económicamente y se optó por implementar una solución que ya en CMM's funciona. En este estudio se presenta la solución alcanzada y los resultados obtenidos en la intercomparación en la que participó la máquina actualizada.

1. Introducción

Durante el año 2014, la máquina de medición de una coordenada (según la denominación de [1]) Mahr 828 del laboratorio de Metrología Dimensional de FREMAP acreditado por ENAC, sufrió una avería. Posiblemente por un mal posicionamiento del encoder lineal, éste fue sufriendo un constante deterioro que terminó por arañar la superficie de la regla, haciendo imposible la lectura óptica del mismo.



Figura 1: Mahr 828 antes de su reparación en el laboratorio acreditado.



Figura 2: Al desmontar la máquina, se observó que el problema se encontraba en la deslizadera principal. La regla óptica (la parte más sensible) estaba dañada. Se pueden ver los arañazos en la imagen.

A pesar de ser un equipo de muy alta precisión y de bajo tiempo de uso, la casa comercial no pudo suministrar piezas de recambio con el mismo encoder Heidenhain. Dicho tipo de regla ya no se fabricaba, por lo que la única opción que proporcionaban era la adquisición de un nuevo equipo de medición de una coordenada.

Un equipo de estas características ronda los 100 000 euros, presupuesto del que no disponía en dicho momento el laboratorio. Con el agravante de tener que dejar de dar servicio en la calibración de patrones de diámetro, parte del alcance de su acreditación.

Después de un cuidadoso estudio se decidió intentar la puesta a punto con la sustitución del encoder dañado por uno nuevo. Puesto que la tecnología ha avanzado notablemente desde la compra de esta máquina hace aproximadamente 15 años, las reglas ópticas han cambiado tanto en material, forma y tamaño a la par que se ha mejorado la resolución y repetibilidad. Por lo que todo esto implicó que los anteriores soportes internos ya no eran válidos y se precisó de unos nuevos totalmente distintos, que permitieron todos los grados de libertad necesarios para la alineación de la nueva regla y encoder.

Aquí presentamos los diseños realizados y la posterior intercomparación en la que participó el equipo, mejorando aún más las prestaciones.

2. Diseño, desarrollo y fabricación

Al igual que en cualquier otro proceso de retrofiteado, se desglosó la tarea en las siguientes etapas.

2.1. Modelado del equipo a retrofitear.

Se desmontó el equipo dañado y se procedió a la medición de todos los componentes involucrados en la solución.

Con ello se dispuso de un modelo mecánico a simular en Solidworks, que permitió valorar cada una de las soluciones en cuanto a la movilidad de los ensamblajes, correcta alineación y posicionamiento de la regla. Principalmente se llevaron a cabo *Motion Studies*, utilizando la terminología de Solidworks.

Las piezas modeladas en Solidworks se ajustaron a la geometría de la máquina, con el fin de enmarcar el entorno en el que se construiría el soporte adicional para el encoder, tal y como se muestra a continuación:

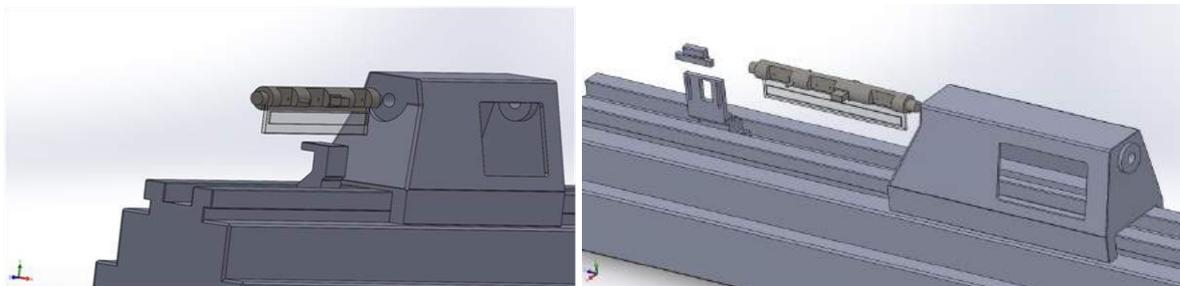


Figura 3: Modelado de la Mahr (izquierda). Modelado de los soportes integrados en la máquina (derecha).

Se estudió la compatibilidad del software de Mahr y señales recibidas por éste del encoder a fin de que la nueva regla y cabezal fueran compatibles con el sistema. En base a ello se realizó un estudio de mercado de la posible regla óptica a utilizar en la nueva solución. La que mejor cubrió las necesidades fue la solución de Renishaw [3], modelo TONiC T101x con una precisión de fábrica de $1,5 \mu\text{m}$ (siguiendo las características de la regla que anteriormente tenía el equipo). Posteriormente se caracterizó el equipo con los patrones del laboratorio, para su participación en la intercomparación que se cita.

2.2. Selección de la regla de medición

Se eligió una nueva regla óptica, mucho más compacta que la original pero que no podía anclarse en las pinzas de la máquina original, por lo que se optó por pegar la nueva regla óptica sobre la original.

Las ventajas de usar la regla antigua como soporte fueron principalmente tres:

- Estos sistemas deben reducir al máximo los efectos de las dilataciones y contracciones térmicas. Puesto que el soporte era de hecho una regla óptica, su dilatación térmica es mínima y así se evitaría la creación de tensiones sobre la nueva regla pegada con adhesivo a ella.

- Se evita tener que fabricar un nuevo soporte para la regla o tener que modificar los existentes. Simplemente se mantiene el sistema de anclajes original y a efectos prácticos sólo supone que la regla haya aumentado en grosor. Esto se solucionará ajustando el diseño de los soportes del cabezal. Notesé que los grados de libertad existentes en el diseño son incontables.
- Al mantener los soportes originales, el nuevo conjunto no ha perdido ningún grado de libertad en su ajuste. La regla puede modificar su posición angular respecto a la horizontal para que la alineación (en ángulo y altura) sea perfecta.

2.3. Diseño de nuevos soportes aptos para la nueva regla. Prototipado rápido.

Una vez elegida la regla con la precisión requerida por el laboratorio, se procedió a la fabricación de los soportes que permitieran la incorporación de la regla al sistema de medición.

Es importante señalar que la pieza se hizo en Aluminio, para aligerar el soporte. La importancia del soporte no fue tanto su precisión en la fabricación.

El objetivo principal del diseño fue obtener suficientes grados de libertad en todos los sentidos de movimiento, que permitieran fijar la regla óptica en la posición adecuada, facilitando así la alineación.

Al fijarse en el soporte principal del nuevo encoder, se pudo ajustar la proximidad a la regla óptica, el ángulo de su cara principal respecto a la superficie de la regla óptica en el eje vertical, y por medio de calzas en su base, el ángulo de la cara principal respecto a la regla óptica en el eje horizontal. La precisión de fabricación del soporte no fue algo crítico en el diseño, y se utilizaron las técnicas habituales de mecanizado por arranque de viruta.

A continuación se muestra el diseño (figura 4 y 5):

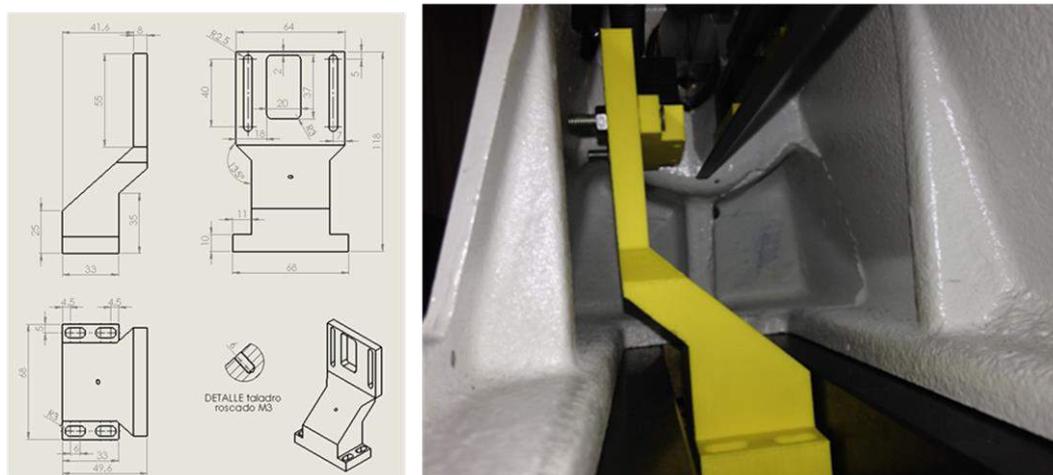


Figura 4: Sujeción y prototipo rápido (amarillo).

Con las dos deslizaderas en el soporte principal se pudo ajustar la altura del cabezal de lectura y también su alineación con la regla óptica, y de esta forma se tuvieron todos los grados de libertad para que el ajuste fuera total (se ha de decir que alguno incluso es recursivo, ya que la regla en sí también permite cambios en su posición). Sin todos estos grados de libertad, el ajuste de posición relativa y seguimiento entre cabezal y regla habría sido impensable.

El prototipo rápido en plástico de los dos soportes del cabezal (amarillo) y modelo del cabezal lector (negro), se modificaron ligeramente en algunas de sus medidas. Hubo que poner especial atención en los tornillos donde anclar la pieza, puesto que el espacio era reducido. El prototipo rápido permitió optimizar el diseño final.

Se muestra a continuación los soportes ya fabricados, tornillos y arandelas fijadas en posición inferior. El cabezal ha sido atornillado al sub-soporte deslizadera. La ventana es crucial para la instalación. El diseño facilita el montaje, que es complicado debido a la pequeña ventana de acceso de la deslizadera principal de la máquina.

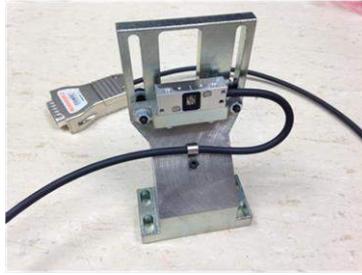


Figura 5: Versión definitiva del soporte.

3. Montaje y alineación

Se procedió al montaje (véase figura 6) de los soportes y las reglas sobre el equipo, una vez que el soporte proporcionaba los suficientes grados de libertad para el posicionamiento y alineación de la regla.

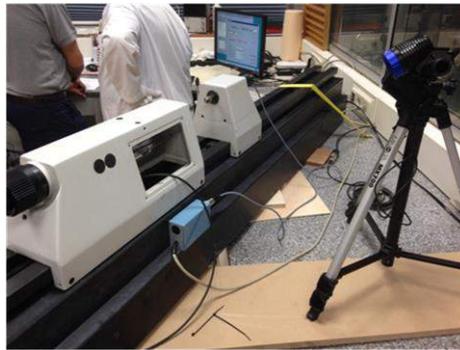


Figura 6: Montaje del nuevo sistema óptico. Uso de gatos hidráulicos para sostener la máquina en posición de trabajo. Iluminación focalizada al interior de la deslizadera.

Tras el montaje y la instalación, se realizó el reseteo del encoder y se comprobó la alineación. El cabezal debía distar $1 \pm 0.1 \text{ mm}$ de la regla en todo momento, siendo las tolerancias de montaje

Rideheight $2.1 \text{ mm} \pm 0.15 \text{ mm}$ Yaw tol. $\pm 0.4^\circ$ Roll tol. $\pm 0.5^\circ$

La desviación en los ángulos entre cabezal y regla pueden variar hasta 2° . Se ajustó con paciencia la altura, aproximación y distintos ángulos mediante cada tornillo gradualmente. Los leds debían permanecer verdes en todo el recorrido, ya que son indicadores de que la señal reflejada sobre la regla está siendo recibida (véanse figuras 7 y 8).

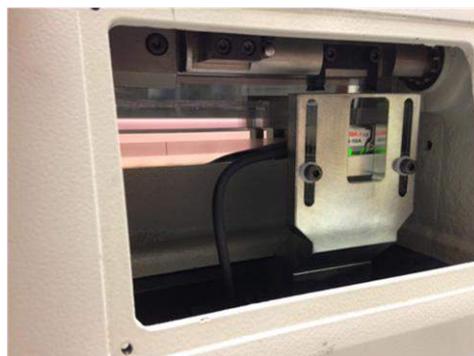


Figura 7: Montaje electrónico de los componentes del encoder, de la regla óptica Renishaw y alineación.

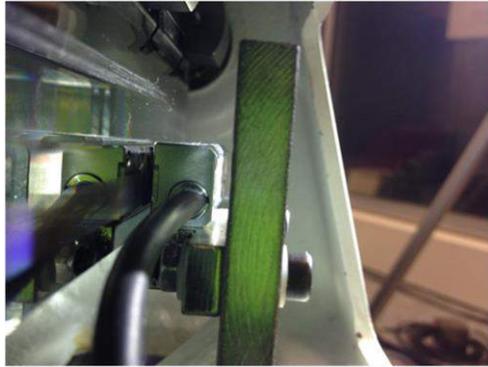


Figura 8: Ajuste fino.

4. Intercomparación LC-ENAC-2014/D02

Una vez reconstruido se procedió a participar en una intercomparación nacional (según la denominación de [2]) que avalase la viabilidad de la solución y su consiguiente mantenimiento dentro del alcance de la acreditación del laboratorio.

En dicha intercomparación el objeto era la determinación de la longitud central de cuatro bloques patrón longitudinales superiores a 100 mm, lc, definida según la norma UNE EN-ISO 3650 [4].

El Centro Español de Metrología (CEM) actuó como laboratorio de referencia (LR) y laboratorio coordinador (LC). Los laboratorios participantes fueron 14, incluido el CEM.

Los patrones circulados fueron: bloque patrón longitudinal de 125 mm. Marca: FRANK, número de serie: 6530; bloque patrón longitudinal de 500 mm. Marca: MITUTOYO, número de serie: 000023; bloque patrón longitudinal de 700 mm. Marca: TESA, número de serie: B49020; bloque patrón longitudinal de 1000 mm. Marca: CEJ, código de identificación: C2014.

Tabla 1: Alcance: bloques patrón longitudinales

Bloques (mm)	
$100 \text{ mm} < L \leq 200 \text{ mm}$	0,004 mm
$200 \text{ mm} < L \leq 1000 \text{ mm}$	0,006 mm

Los resultados obtenidos quedaron recogidos en el informe de dicha intercomparación, con fecha de noviembre de 2015. En las figuras 9 a 12 se resalta la “posición” del nuevo equipo frente a los otros laboratorios nacionales, quedando patente el éxito del retrofitado.

Tabla 2: Índice de compatibilidad

Mensurando de la comparación	Índice de Compatibilidad C	Abrir No conformidad	
		SI	NO
BPL 125 mm	0,13		X
BPL 500 mm	0,13		X
BPL 700 mm	0,01		X
BPL 1000 mm	0,04		X

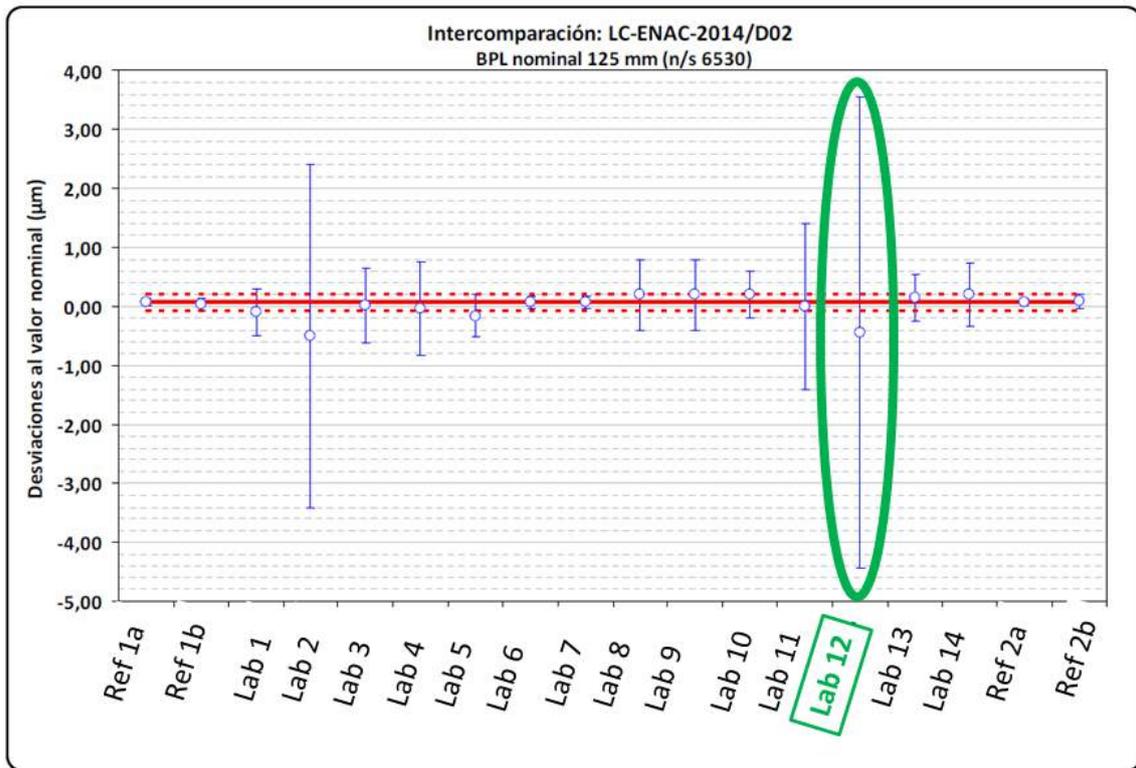


Figura 9: Gráficos de resultados BPL 125 mm. (Se resalta el resultado del sistema retrofitado).

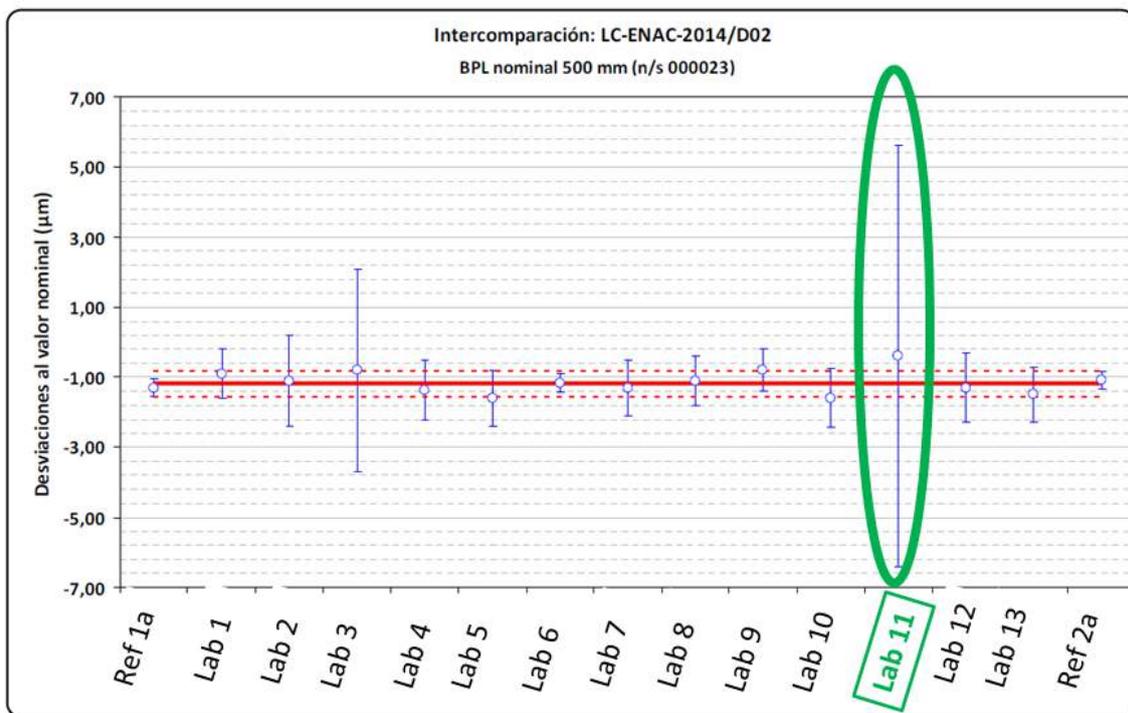


Figura 10: Gráficos de resultados BPL 500 mm. (Se resalta el resultado del sistema retrofitado).

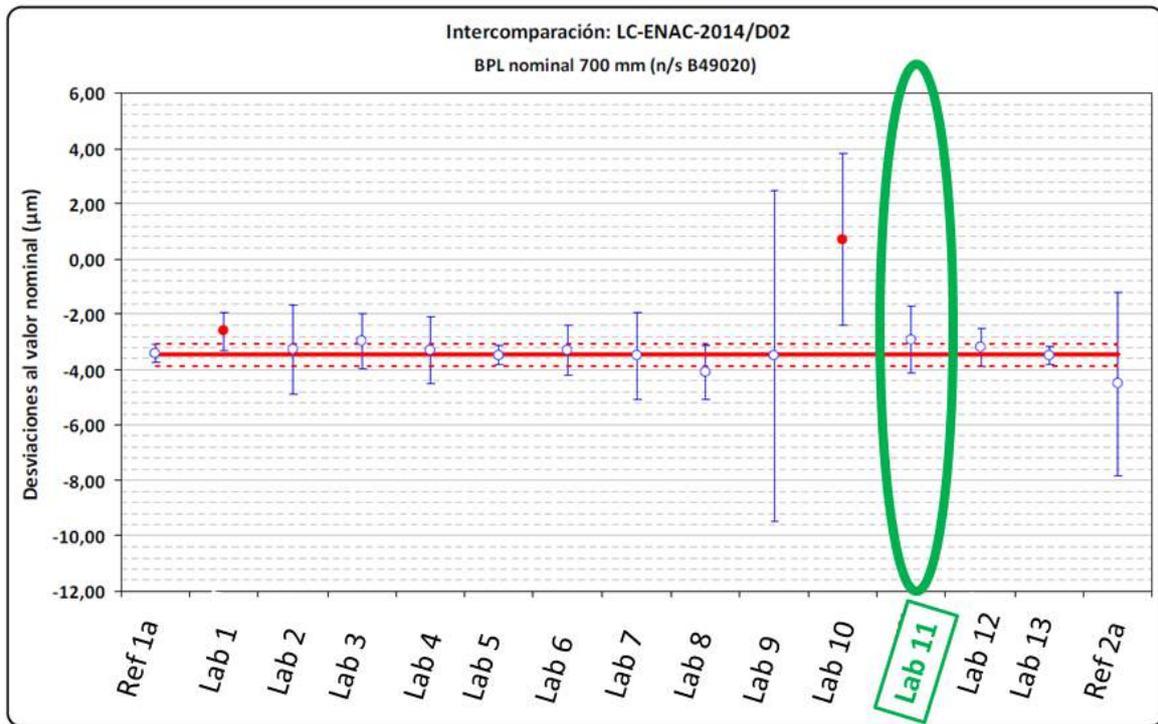


Figura 11: Gráficos de resultados BPL 700 mm. (Se resalta el resultado del sistema retrofiteado).

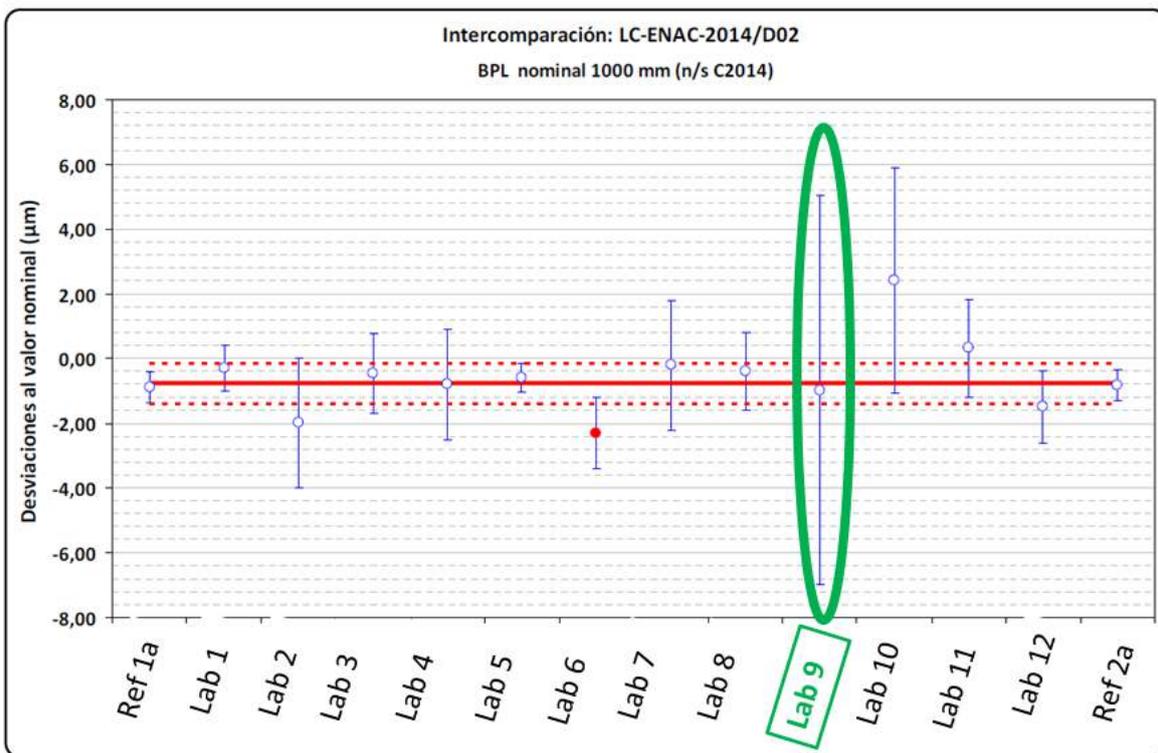


Figura 12: Gráficos de resultados BPL 1000 mm. (Se resalta el resultado del sistema retrofiteado).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos caben señalar la viabilidad de esta solución para otras muchas máquinas de una coordenada que ahora mismo se encuentran fuera de servicio en los laboratorios españoles.

El presupuesto necesario para el retrofiteado de este tipo de equipos puede realizarse sobre equipos fuera de servicio, o en equipos donde se quieran mejorar sus prestaciones. Y en ningún caso exceden como mucho el 10% del coste total del equipamiento (aunque dependerá mucho de las precisiones finales requeridas).

La incertidumbre propuesta en las primeras mediciones demostró ser muy conservadora, por lo que actualmente se está procediendo a una revisión de la misma y optimización para los resultados obtenidos en la intercomparación de 2015.

La propuesta de este trabajo fue el resultado del trabajo desarrollado dentro de la colaboración que existe entre FREMAP y la Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Se optó por desarrollar las tareas con la asistencia de un alumno de la universidad, que pudiese formarse en este tipo de soluciones de la ingeniería, por lo que al tener que compaginarse con sus estudios, se dilató el trabajo a un curso académico aproximadamente.

Una vez vista la viabilidad de la solución, estos plazos podrán ajustarse mucho más a las necesidades de cada proyecto.

La utilización de prototipos rápidos para la mejora de los primeros diseños se muestra como una potente herramienta para el diseño de piezas tan específicas como las necesarias en los laboratorios de metrología dimensional.

Por último, una gran dificultad del proyecto fue la interoperabilidad entre los componentes electrónicos del conjunto de Renishaw y los propios de la máquina Mahr. Se trata de intentar acoplar dos partes de distintos fabricantes que además distan una quincena de años en tiempo, con el consecuente avance tecnológico que supone. A nivel de hardware cambia prácticamente todo, incluyendo las clavijas que llegan al ordenador. A nivel de software era necesario que las señales que le llegaban al ordenador de la Mahr para el programa de medición coincidiesen con las que la regla óptica montada en la actualidad genera. Este fue un punto de crucial importancia para el proyecto que podría haber puesto en entredicho la viabilidad de la solución, y que sin embargo fue resuelto finalmente.

6. Referencias

- [1] Centro Español de Metrología (CEM): Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional, 1ª Edición, 261 páginas, NIPO 165-02-003-4, Ministerio de Fomento, 2002, Madrid.
- [2] Centro Español de Metrología (CEM): Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 3ª edición en español 2008, traducción de la 3ª edición del VIM 2008, 87 páginas, NIPO 706-08-008-4.
- [3] Catálogos de reglas ópticas de Renishaw. <http://resources.renishaw.com>
- [4] UNE EN ISO 3650:, Especificación geométrica de productos (GPS)-Patrones de longitud- Bloques patrón (ISO:3650:1998).