

## ANEXOS

---

### Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Autor

Laura Lorente Tornos

- Anexo 1. Tipos y métodos de medición de los errores geométricos.
- Anexo 2. Diseños intermedios de la pieza patrón.
- Anexo 3. Funcionamiento del programa de simulación.
- Anexo 4. Identificación de los puntos utilizados en el primer método de Verificación geométrica.
- Anexo 5. Tablas resultantes del primer método de Verificación geométrica.
- Anexo 6. Obtención de la formulación e identificación de las series de puntos utilizadas en el segundo método de Verificación geométrica.
- Anexo 7. Tablas resultantes del segundo método de Verificación geométrica.
- Anexo 8. Características de las herramientas utilizadas en la fabricación de la pieza patrón.

## **Anexo 1. Tipos y métodos de medición de los errores geométricos.**

En este trabajo se ha presentado la medición indirecta y la medición directa para el cálculo de los errores geométricos. A continuación se describen en profundidad los métodos más utilizados de cada tipo de medición.

### **A1.1 Métodos de medición indirecta de los errores geométricos.**

En este apartado se van a describir los métodos que permiten obtener los errores geométricos que se producen en una máquina herramienta de una manera rápida y eficaz utilizando el movimiento de varios ejes. Dentro de la medición indirecta se pueden encontrar distintos métodos de medición de los errores los cuales se describen a continuación.

- **Ensayos circulares:** Para realizar estos ensayos se puede utilizar una barra de bolas, un trazador láser o una escala digital bidimensional. Con estos ensayos se puede medir la precisión geométrica de dos ejes lineales ortogonales [21].
- **Prueba de diagonal y de diagonal escalonada:** Son usadas para realizar el cálculo de la escala lineal y del error de perpendicularidad mediante la utilización de cuatro medidas diagonales del cuerpo [21].
- **Medición de piezas de patrón:** Es un método de medida muy utilizado en la calibración de las máquinas herramienta. Consiste en la fabricación de piezas patrón con la máquina de la que se pretenden obtener los errores geométricos. Posteriormente se realizarán una serie de mediciones con una MMC que permitirán calcular los errores partiendo de las coordenadas nominales de puntos específicos de la pieza y de las coordenadas medidas de estos. Con este método se podrán medir los errores de los ejes lineales y giratorios de la máquina [21].
- **Eslabones pasivos:** Estos eslabones se accionan por la máquina herramienta y su cinemática calibrada se puede utilizar como referencia [21].
- **Test R:** Sirve para medir los movimientos relativos existentes entre la máquina y un lado de la pieza de trabajo. En este caso se emplea una esfera, la cual va fijada a la mesa de la máquina, y un sensor de medición, el cual es acoplado al cabezal de la máquina. Para realizar la medición se utiliza una secuencia de ángulos discretos de la mesa giratoria. Cuando se cambia de punto de medición la rotación de la mesa giratoria es seguida por los ejes lineales. Desde las distintas posiciones el cabezal de la sonda se encarga de medir el desplazamiento relativo de la esfera en los diferentes ejes del sistema a la vez [21].
- **Pruebas de mecanizado:** Hay numerosas pruebas, entre ellas destaca la prueba de mecanizado de cinco ejes de un cono truncado definida por el NAS 979. Estas pruebas son aceptadas por los fabricantes considerándolas pruebas de rendimiento final [21].
- **Láser Tracker:** Es un sistema de medición de coordenadas polares de alta precisión y flexibilidad. Este método de medida resulta útil especialmente en elementos de grandes dimensiones ya que con ellos se pueden obtener mediciones gran valor. Con el uso del Láser Tracker se pueden medir ángulos con la utilización de encoders de precisión en cada uno de los dos ejes móviles del equipo. Por otro lado, están las tecnologías ADM e IFM, las cuales permiten la medición de distancias. Unos

retroflectores son los encargados de reflejar el haz del láser hasta la fuente de origen. Es importante que los retroflectores cumplan con su función con la mínima dispersión posible. La ADM utiliza el tiempo que tarda en llegar el haz láser al receptor después de reflejarse para calcular la distancia. En esta tecnología es necesario considerar los diversos factores externos, como la temperatura o la humedad del aire. La otra tecnología utilizada, la IFM, considera el desfase del haz láser que llega hasta el equipo una vez que ha sido reflejado. Es muy importante para realizar correctamente la medición que el haz no se interrumpa durante la medición. Las dos tecnologías pueden ser combinadas y trabajar en un mismo equipo. Tras las mediciones de las coordenadas polares estas se pueden convertir a coordenadas cartesianas. Las coordenadas cartesianas se pueden importar y tratar en diferentes programas informáticos, como el CAD [15]. En la siguiente figura se muestra el Láser Tracker.

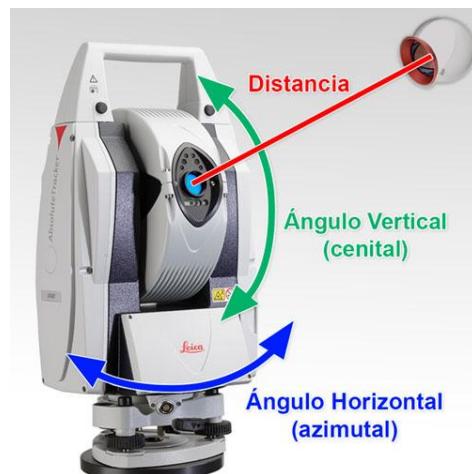


Figura 136. Láser Tracker [15].

- **Palpador MH-Check:** Es un método de medición de alta precisión y fiabilidad. Se compone de tres medidores longitudinales que hacen contacto con las esferas calibradas de un artefacto. El artefacto es un tetraedro de bolas cerámicas. Los centros de las esferas son reconocidos por sensores de forma automatizada en base a la lectura del desplazamiento lineal de unos actuadores y a los cálculos internos de un software. Incluye un láser con el objetivo de conseguir una mejor ubicación espacial del palpador y que de esta manera el proceso de contacto con las esferas se realice de una manera más rápida. Con este proceso se podrán identificar los errores de posición, de perpendicularidad y de longitud. Esto se consigue con la comparación de los valores reales del tetraedro con los que se obtienen de la medición de la máquina herramienta. Será necesario el uso de un software para realizar un análisis general del sistema, para ello se comprueba el estado de todos los palpadores para poder identificar los errores geométricos de la máquina herramienta [16]. En la siguiente figura se muestra el Palpador MH-Check.



Figura 137. Palpador MH-Check [16].

- Ball-bar telescopico: El ball-bar telescopico compara el movimiento del husillo de una máquina herramienta cuando esta sigue una trayectoria circular con la trayectoria de prueba la cual es un círculo perfecto. Este sistema de medición es sencillo, de alta precisión y rapidez. Está compuesto por el ball-bar y por dos montajes magnéticos de precisión. El ball-bar se puede describir como un sensor lineal telescopico que posee en sus extremos unas bolas de precisión. Por otro lado, los montajes magnéticos de precisión son colocados en diferentes posiciones. Uno de ellos está sujeto a la mesa de la máquina y el otro puede estar colocado en el husillo o en el cabezal del husillo de la máquina. Este sistema es capaz de medir las variaciones de radio que se producen cada minuto cuando la máquina recorre una trayectoria de forma circular, la cual ha sido programada alrededor de un montaje de la máquina. Para calcular las mediciones y errores es necesario utilizar un software que utiliza los datos recogidos y que han sido enviados a un ordenador [17]. El ball-bar telescopico se puede ver en la siguiente figura.

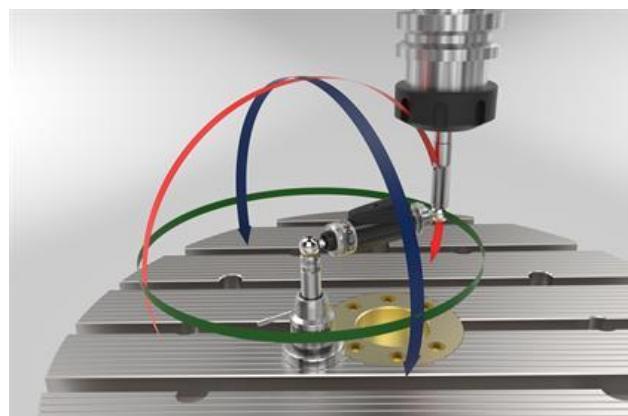


Figura 138. Ball-bar telescopico [17].

## A1.2 Métodos de medición directa de los errores geométricos.

En este apartado se van a describir los métodos de medición más utilizados que son capaces de medir los errores geométricos de forma individual. Como se ha presentado anteriormente en el trabajo cada uno tiene un funcionamiento y unas características concretas, lo que hace que sea capaz de medir un tipo de error u otro.

- Niveles electrónicos: Estos métodos de medida se caracterizan por dar una medida versátil y exacta del ángulo y de la rectitud. Las mediciones se obtienen del análisis computacional de una señal de salida producida por el funcionamiento de unas interfaces de péndulo junto con un transductor [22][23]. La siguiente figura muestra un nivel electrónico.



Figura 139. Nivel electrónico [23].

- Interferómetro láser: Es uno de los sistemas más utilizados en las industrias de fabricación y metrología. Este sistema mide la longitud y los desplazamientos de forma muy precisa en las máquinas herramienta CNC y en las máquinas de medición por coordenadas. Consiste en aplicar el fenómeno de la interferencia de las ondas en la medición. Este método se basa en el interferómetro de Michelson, el cuál para su funcionamiento utiliza un desdoblador del haz y dos espejos. Cuando el láser es enviado al desdoblador y este lo desdobra se obtienen dos rayos que toman distintas trayectorias, cada uno hacia uno de los dos espejos. Estos rayos se reflejan en los espejos, juntándose de nuevo en el desdoblador. Después de volver a ser un único rayo este llega al detector. Por último se analiza el patrón de borde de interferencia que se ha producido debido a la diferencia de fase formada por la diferencia de trayectoria de los dos rayos [14]. La siguiente figura muestra un interferómetro láser.



Figura 140. Interferómetro láser [14].

- Autocolimador: Es un instrumento óptico preciso utilizado para medir desviaciones angulares, por lo tanto se pueden obtener los errores de cabeceo y guiñada. Para medir los ángulos sin contacto este instrumento utiliza la luz blanca. Esta luz es proyectada por un objetivo y se refleja en un reflector. Entre la luz reflejada y la proyectada pueden surgir desviaciones, que serán las que se miden, normalmente en arcosegundos. Si se dispone de un fotodetector estos instrumentos pueden ser usados en la detección digital. El modelo digital es mucho más preciso que el modelo óptico [24][25]. A continuación se muestra un autocolimador.

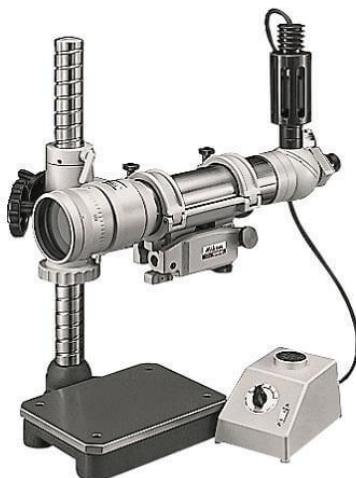


Figura 141. Autocolimador [25].

- Cross Grid Encoder: Es un sistema de comprobación dinámica que se encarga de analizar la precisión del contorneado de las CNC. En diferencia a otros equipos, este es un equipo de medición sin contacto el cual se compone de una placa de rejilla que se incrusta en una base de montaje y de un cabezal de escaneo. Durante el funcionamiento este cabezal se mueve sobre la placa de rejilla. Con este método se pueden detectar movimiento en dos dimensiones a la vez. El análisis de precisión se realiza utilizando un software específico que procesa las señales de medición [22][26]. Este método se muestra en la siguiente figura.



Figura 142. Cross Grid Encoder [26].

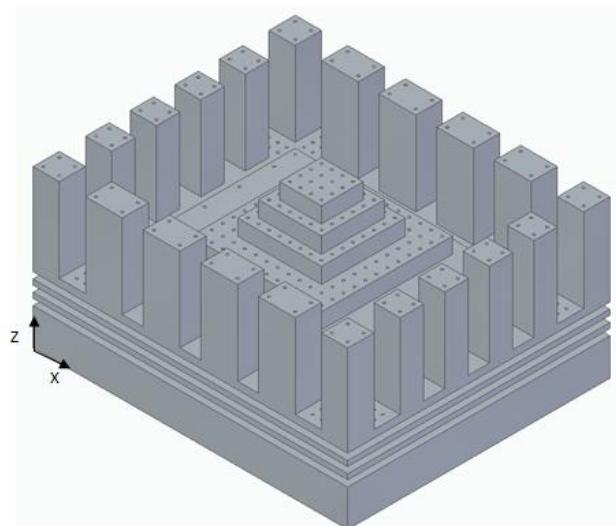
## **Anexo 2. Diseños intermedios de la pieza patrón.**

En el capítulo 5 de este trabajo se ha descrito el procedimiento que se ha llevado a cabo para realizar el diseño paramétrico de la pieza patrón mediante el uso de los programas Solid Edge y Excel. En este anexo se van a presentar los 2 diseños intermedios que se han realizado entre el diseño inicial y el diseño final de la pieza.

### **A2.1 Segundo diseño de la pieza patrón.**

Uno de los problemas del diseño inicial, presentado en el capítulo 5, tras el análisis es la cantidad de material que se desperdiciará en el mecanizado y el tiempo que esto costará. Por este motivo las almenas llegarán hasta la altura total de la pirámide.

Para mejorar la medición de los errores en los ejes X y Z en el segundo método de verificación geométrica las ranuras de las caras exteriores se realizarán en todas las caras laterales exteriores. Estas ranuras serán de menor anchura y profundidad para emplear menos tiempo en el mecanizado. Por último la altura de la pieza final es de 150 mm. El motivo es que se han añadido 30 mm para la sujeción de la pieza en la máquina herramienta y se ha añadido un nivel más en la pirámide para tener más puntos de medición a diferentes alturas. También se han añadido más agujeros cónicos para mejorar la precisión en las medidas. En la siguiente figura se muestra el diseño final de este apartado.



*Figura 143. Vista isométrica del segundo diseño de la pieza patrón.*

## A2.2 Tercer diseño de la pieza patrón.

En este apartado se analiza el segundo diseño para encontrar posibles problemas y realizar mejoras en el diseño. En primer lugar se busca una separación mayor entre las ranuras de las caras laterales exteriores, por este motivo se aumenta la altura de la pieza a 180 mm para poder realizar esta separación. Con este aumento de altura se incrementará el número de niveles de la pirámide. En la pirámide también se aumentan las dimensiones de la base de estos niveles para tener más puntos en la medición y emplear menos tiempo en el mecanizado. Las bases de los niveles pasarán a ser rectangulares, lo que no va a afectar al cálculo de los errores. Al aumentar la superficie de la pirámide se han aumentado el número de agujeros cónicos. Para conseguir la misma separación entre todas las almenas se ha igualado a 20 mm la anchura de las ranuras principales y de las ranuras que crean las almenas. Por esta última razón las dimensiones de la base han pasado a ser 300x260 mm para crear así unas almenas de dimensiones apropiadas. A continuación se puede ver en la figura el diseño mejorado de este apartado.

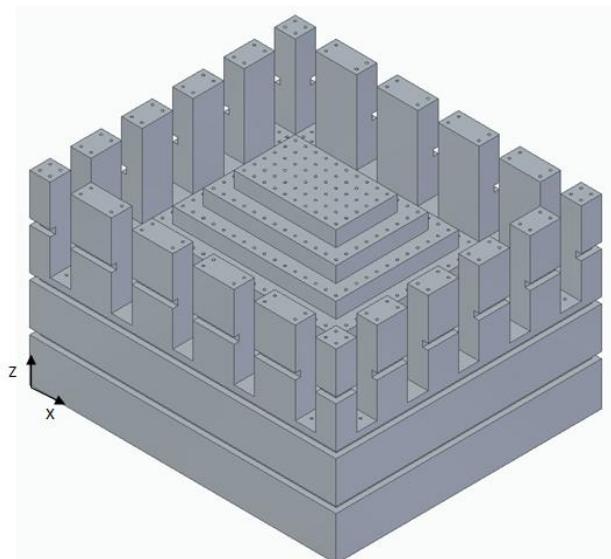


Figura 144. Vista isométrica del tercer diseño de la pieza patrón.

Tras este último diseño intermedio se realiza un análisis de este para obtener el diseño final de la pieza patrón como se describe en la memoria del trabajo.

### **Anexo 3. Funcionamiento del programa de simulación.**

En este trabajo se ha programado un programa de simulación de Matlab para la obtención de las coordenadas reales que se utilizarán en los cálculos de los errores geométricos en todos los métodos de verificación geométrica y en el método de verificación volumétrica. Este programa utiliza la ecuación del modelo matemático de la máquina herramienta para el cálculo de las coordenadas reales, en este caso la máquina herramienta tiene un modelo de cadena cinemática XFYZ.

Para obtener las coordenadas reales de la pieza es necesario definir algunos campos. En primer lugar se introducirá el offset de la herramienta que se va a aplicar. Se deberá introducir el offset correspondiente a cada uno de los tres ejes lineales. A continuación se introducen las funciones teóricas del error. Para cada uno de los 21 errores geométricos se deberá introducir una función, dependiendo de las características del ensayo se puede dejar como 0 el valor de la función de un error en concreto. De esta forma se podrán calcular los errores sabiendo que errores influyen en su resultado. Por último se introducen las coordenadas nominales en los tres ejes de los puntos seleccionados de la geometría total de la pieza.

El siguiente paso es ejecutar el programa y este devuelve las coordenadas reales que ha calculado en función de los datos introducidos.

Con este programa se obtiene el valor de las coordenadas reales de los 480 puntos de la geometría total de la pieza patrón diseñada. Para los cálculos bastará con seleccionar los puntos que son necesarios de entre todo el conjunto.

Variando el código de este programa se podrá aplicar el modelo matemático básico o el modelo matemático simplificado de la máquina herramienta, pudiéndose utilizar en una mayor cantidad de ensayos.

## **Anexo 4. Identificación de los puntos utilizados en el primer método de Verificación geométrica.**

En el capítulo 6 de este trabajo se presentan los distintos métodos de verificación geométrica. En este anexo se va a indicar cómo se va a obtener cada error y se van a indicar exactamente qué puntos se han utilizado con sus correspondientes coordenadas nominales para calcular cada error mediante formulación en el primer método de verificación geométrica, para ello ha resultado necesario el análisis de trabajos anteriores [7]. Inicialmente se han identificado 480 puntos distribuidos en la geometría total de la pieza para la identificación de todos los errores geométricos de los cuales se ha realizado la selección. Las coordenadas reales de los puntos se obtendrán por simulación partiendo de las coordenadas nominales como se ha explicado en la memoria del trabajo. Para cada error se adjunta una tabla en la que se indican las coordenadas nominales de todos los puntos utilizados y una figura que los sitúa en la pieza.

- EXX: El error se ha calculado con la desviación entre los valores nominales y los valores reales la coordenada X de una serie de puntos en las caras laterales de las almenas en dirección X.

*Tabla 11. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EXX en el primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
385	0	10	175
387	20	10	175
389	40	10	175
391	80	10	175
393	100	10	175
395	140	10	175
397	160	10	175
399	200	10	175
401	220	10	175
403	260	10	175
405	280	10	175
407	300	10	175

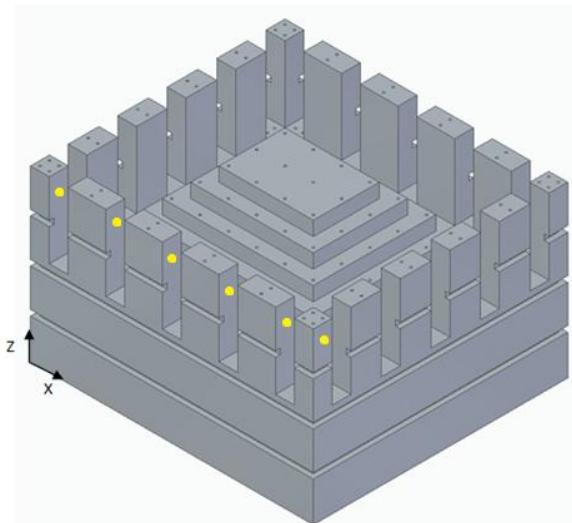


Figura 145. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EXX en el primer método de verificación geométrica.

- EYX: El error se obtiene de la desviación entre los valores nominales y los reales de la coordenada Y de una fila de puntos de las ranuras superiores de las caras exteriores de la pieza en dirección X.

Tabla 12. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EYX en el primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
357	5	5	137
358	15	5	137
359	60	5	137
360	120	5	137
361	180	5	137
362	240	5	137
363	285	5	137
364	295	5	137

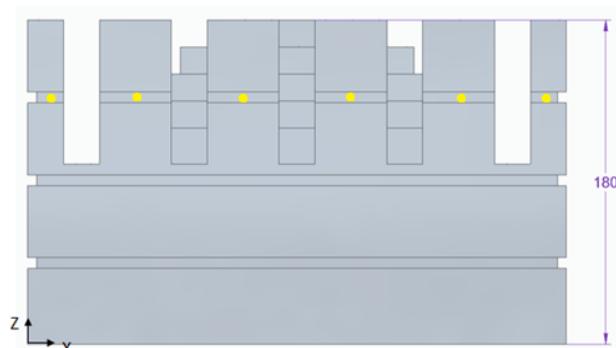


Figura 146. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EYX en el primer método de verificación geométrica.

- EZX: Este error se calcula como la desviación entre los valores nominales y los valores reales de la coordenada Z. Los puntos utilizados son los que se encuentran en una fila en dirección X en la base de las ranuras principales de la pieza.

Tabla 13. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EZX en el primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
49	15	26	98,01
50	45	26	98,01
51	75	26	98,01
52	105	26	98,01
53	135	26	98,01
54	165	26	98,01
55	195	26	98,01
56	225	26	98,01
57	255	26	98,01
58	285	26	98,01

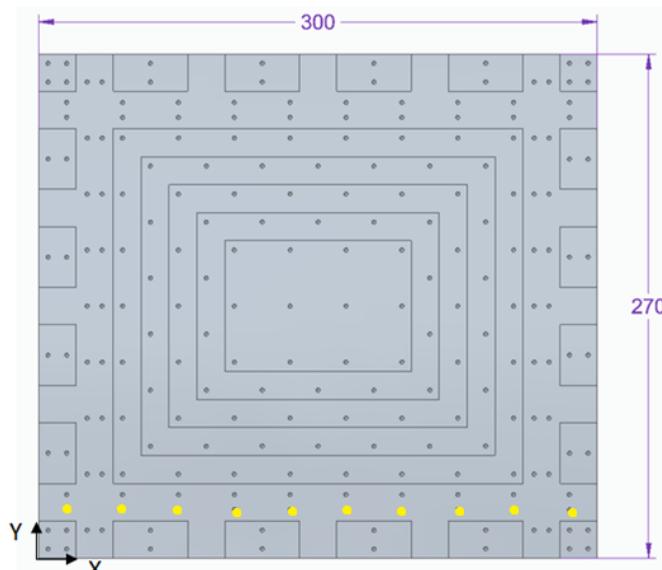
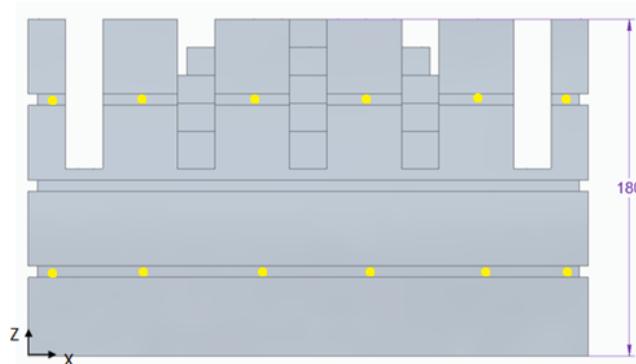


Figura 147. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EZX en el primer método de verificación geométrica.

- EAX: Para el cálculo de este error se utilizan dos filas paralelas de puntos en dirección X separadas en Z situados en las ranuras de las caras exteriores. Se calcula como la desviación en la dirección Y entre el punto superior y el inferior partido de su distancia vertical.

*Tabla 14. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EAX en el primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
301	5	5	45
302	15	5	45
303	60	5	45
304	120	5	45
305	180	5	45
306	240	5	45
307	285	5	45
308	295	5	45
357	5	5	137
358	15	5	137
359	60	5	137
360	120	5	137
361	180	5	137
362	240	5	137
363	285	5	137
364	295	5	137

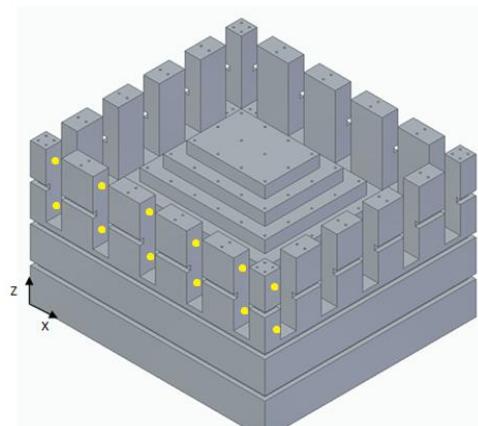


*Figura 148. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EAX en el primer método de verificación geométrica.*

- EBX: Se utilizan dos filas paralelas de puntos de las caras laterales de las almenas en dirección X y separadas en Z. Se calcula como la desviación en la dirección X entre el punto superior y el inferior partido de su distancia vertical.

*Tabla 15. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EBX en el primer método de verificación geométrica.*

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
385	0	10	175
386	0	10	105
387	20	10	175
388	20	10	105
389	40	10	175
390	40	10	105
391	80	10	175
392	80	10	105
393	100	10	175
394	100	10	105
395	140	10	175
396	140	10	105
397	160	10	175
398	160	10	105
399	200	10	175
400	200	10	105
401	220	10	175
402	220	10	105
403	260	10	175
404	260	10	105
405	280	10	175
406	280	10	105
407	300	10	175
408	300	10	105



*Figura 149. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EBX en el primer método de verificación geométrica.*

- ECX: Se utilizan dos filas de puntos de las caras laterales de las almenas en dirección X con separación en Y. Se calcula como la desviación en la dirección X entre los puntos partido de su distancia horizontal.

Tabla 16. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de ECX en el primer método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
385	0	10	175
387	20	10	175
389	40	10	175
391	80	10	175
393	100	10	175
395	140	10	175
397	160	10	175
399	200	10	175
401	220	10	175
403	260	10	175
405	280	10	175
407	300	10	175
433	300	260	175
435	280	260	175
437	260	260	175
439	220	260	175
441	200	260	175
443	160	260	175
445	140	260	175
447	100	260	175
449	80	260	175
451	40	260	175
453	20	260	175
455	0	260	175

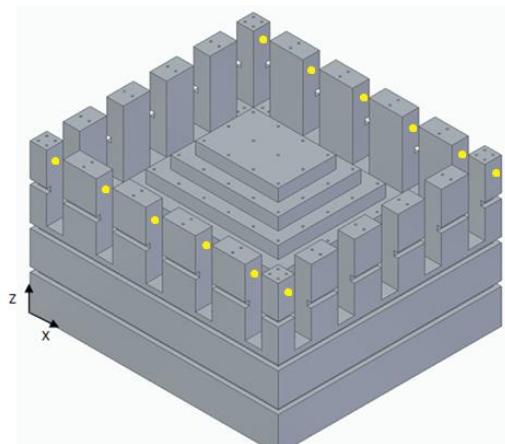


Figura 150. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de ECX en el primer método de verificación geométrica.

- EXY: Se usarán los puntos que se encuentran en las ranuras superiores de las caras exteriores de la pieza alineados en dirección Y. Se calcula como la desviación entre el valor real y el valor nominal en la coordenada X.

Tabla 17. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EXY en el primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
364	295	5	137
365	295	15	137
366	295	56,25	137
367	295	108,75	137
368	295	161,25	137
369	295	213,75	137
370	295	255	137
371	295	265	137

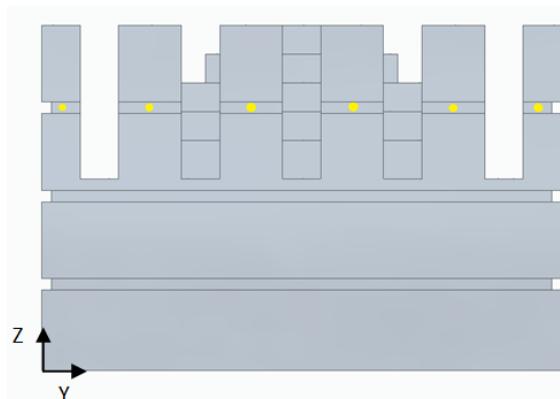
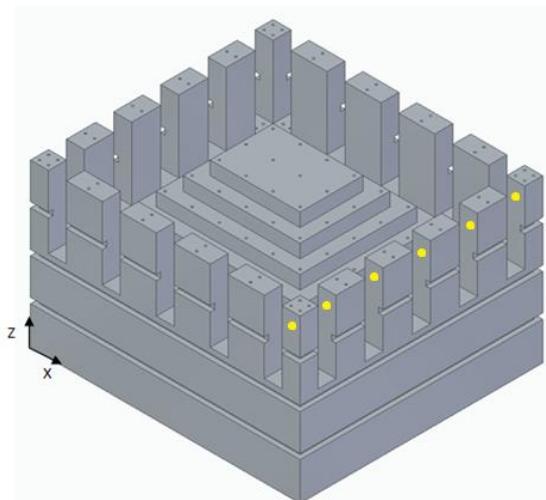


Figura 151. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EXY en el primer método de verificación geométrica.

- EYY: Se utilizan los puntos de las caras laterales de las almenas de la pieza alineados en dirección Y. Se calcula como la desviación entre los valores reales y los valores nominales de la coordenada Y.

*Tabla 18. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EYY en el primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
409	290	0	175
411	290	20	175
413	290	40	175
415	290	72,5	175
417	290	92,5	175
419	290	125	175
421	290	145	175
423	290	177,5	175
425	290	197,5	175
427	290	230	175
429	290	250	175
431	290	270	175



*Figura 152. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EYY en el primer método de verificación geométrica.*

- EZY: Los puntos utilizados son los de las ranuras principales de la pieza alineados en dirección Y. La desviación entre los valores reales y los valores nominales de la coordenada Z sirven para calcular el error.

Tabla 19. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EZY en el primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
89	26	255	98,01
90	26	225	98,01
91	26	195	98,01
92	26	165	98,01
93	26	135	98,01
94	26	105	98,01
95	26	75	98,01
96	26	45	98,01
97	26	15	98,01

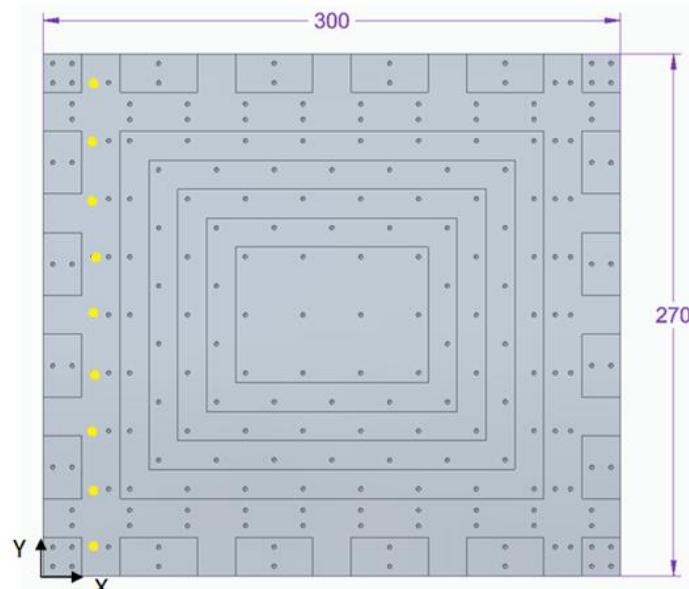
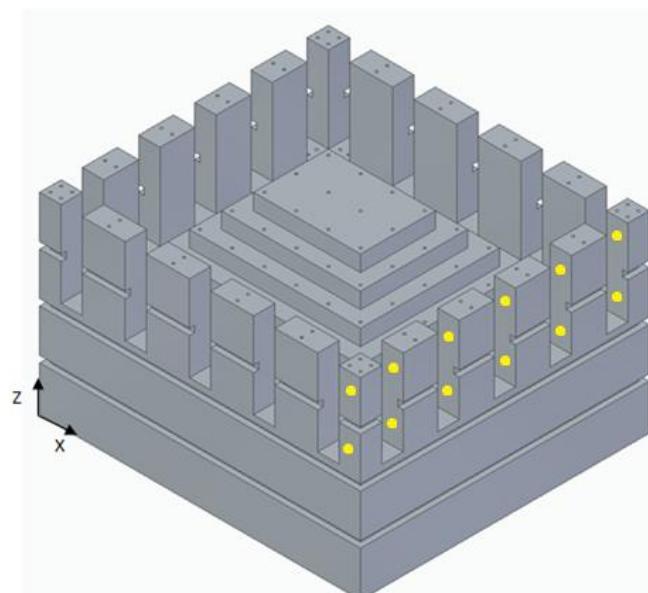


Figura 153. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EZY en el primer método de verificación geométrica.

- EAY: Se utilizan los puntos de una fila superior en dirección Y y otra inferior separadas en Z de las caras laterales de las almenas de la pieza. Se calcula como la desviación en la dirección Y entre el punto superior y el inferior partido de su distancia vertical.

*Tabla 20. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EAY en el primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
409	290	0	175
410	290	0	105
411	290	20	175
412	290	20	105
413	290	40	175
414	290	40	105
415	290	72,5	175
416	290	72,5	105
417	290	92,5	175
418	290	92,5	105
419	290	125	175
420	290	125	105
421	290	145	175
422	290	145	105
423	290	177,5	175
424	290	177,5	105
425	290	197,5	175
426	290	197,5	105
427	290	230	175
428	290	230	105
429	290	250	175
430	290	250	105
431	290	270	175
432	290	270	105



*Figura 154. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EAY en el primer método de verificación geométrica.*

- EBY: Se utilizan los puntos alineados en dirección Y que se encuentran en las ranuras superior e inferior de las caras exteriores de la pieza. Se calcula como la desviación en la dirección X entre el punto superior y el inferior partido de su distancia vertical.

Tabla 21. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EBY en el primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
308	295	5	45
309	295	15	45
310	295	56,25	45
311	295	108,75	45
312	295	161,25	45
313	295	213,75	45
314	295	255	45
315	295	265	45
364	295	5	137
365	295	15	137
366	295	56,25	137
367	295	108,75	137
368	295	161,25	137
369	295	213,75	137
370	295	255	137
371	295	265	137
322	5	265	45
323	5	255	45
324	5	213,75	45
325	5	161,25	45
326	5	108,75	45
327	5	56,25	45
328	5	15	45
301	5	5	45
378	5	265	137
379	5	255	137
380	5	213,75	137
381	5	161,25	137
382	5	108,75	137
383	5	56,25	137
384	5	15	137
357	5	5	137

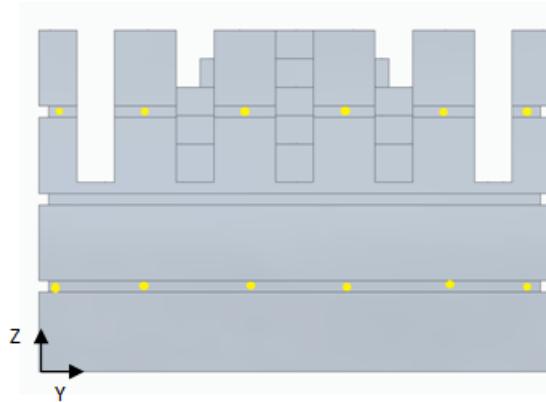


Figura 155. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EBY en el primer método de verificación geométrica.

- ECY: Se utilizan dos filas de puntos de las caras laterales de las almenas en dirección Y separadas en X. Se calcula como la desviación en la dirección Y entre los puntos partido de su distancia horizontal.

Tabla 22. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de ECY en el primer método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
409	290	0	175
411	290	20	175
413	290	40	175
415	290	72,5	175
417	290	92,5	175
419	290	125	175
421	290	145	175
423	290	177,5	175
425	290	197,5	175
427	290	230	175
429	290	250	175
431	290	270	175
457	10	270	175
459	10	250	175
461	10	230	175
463	10	197,5	175
465	10	177,5	175
467	10	145	175
469	10	125	175
471	10	92,5	175
473	10	72,5	175
475	10	40	175
477	10	20	175
479	10	0	175

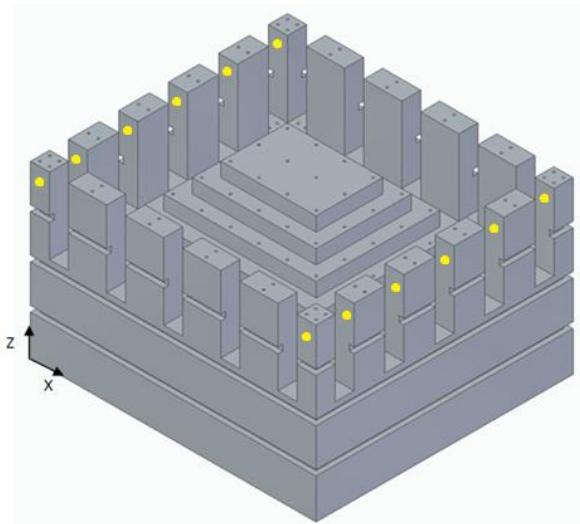
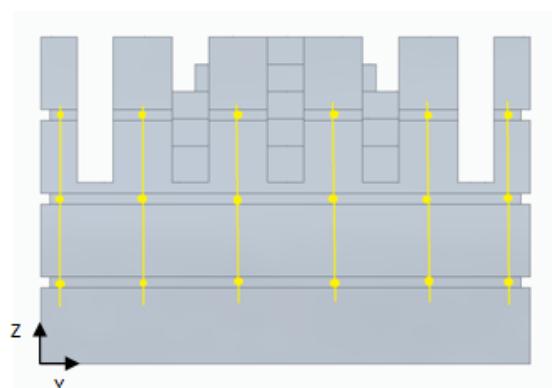


Figura 156. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de ECY en el primer método de verificación geométrica.

- EXZ: Se utilizan los puntos situados en las ranuras de las caras exteriores de la pieza formando una fila en dirección Z. Los puntos deben tener sus vectores normales en dirección X. Con la desviación entre los valores reales obtenidos y los valores nominales de la coordenada en X medimos el error.

*Tabla 23. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EXZ en el primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
308	295	5	45
309	295	15	45
310	295	56,25	45
311	295	108,75	45
312	295	161,25	45
313	295	213,75	45
314	295	255	45
315	295	265	45
336	295	5	91
337	295	15	91
338	295	56,25	91
339	295	108,75	91
340	295	161,25	91
341	295	213,75	91
342	295	255	91
343	295	265	91
364	295	5	137
365	295	15	137
366	295	56,25	137
367	295	108,75	137
368	295	161,25	137
369	295	213,75	137
370	295	255	137
371	295	265	137



*Figura 157. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EXZ en el primer método de verificación geométrica.*

- EYZ: Se usan los puntos que se encuentran en las ranuras de las caras exteriores de la pieza que forman una línea en dirección Z. Los puntos tendrán sus vectores normales en dirección Y. La desviación entre los valores reales y los valores nominales de la coordenada en Y sirve para calcular el error.

Tabla 24. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EYZ en el primer método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
301	5	5	45
302	15	5	45
303	60	5	45
304	120	5	45
305	180	5	45
306	240	5	45
307	285	5	45
308	295	5	45
329	5	5	91
330	15	5	91
331	60	5	91
332	120	5	91
333	180	5	91
334	240	5	91
335	285	5	91
336	295	5	91
357	5	5	137
358	15	5	137
359	60	5	137
360	120	5	137
361	180	5	137
362	240	5	137
363	285	5	137
364	295	5	137

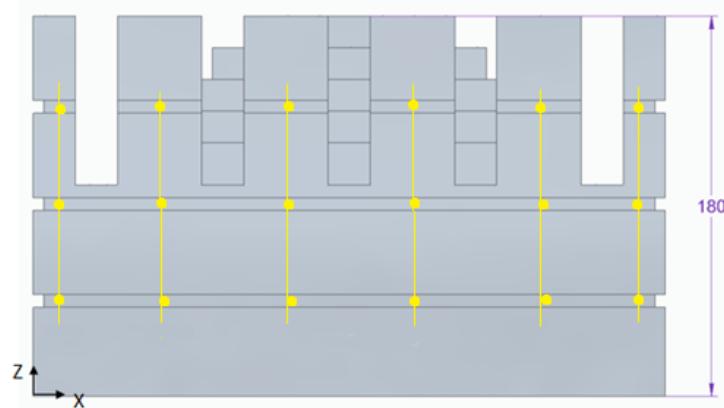
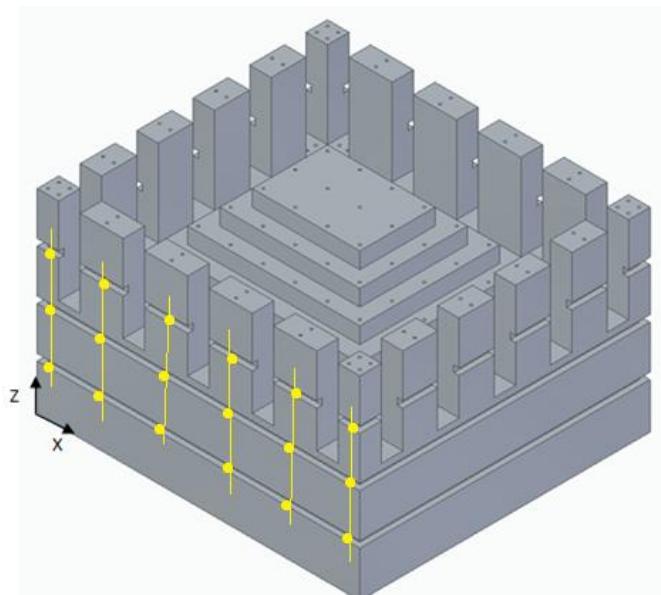


Figura 158. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EYZ en el primer método de verificación geométrica.

- EZZ: Para el cálculo de este error se utilizan los puntos alineados situados en la base de las ranuras de las caras exteriores de la pieza con sus vectores normales en dirección Z. La desviación entre los valores reales y los valores nominales de la coordenada Z representan el error.

*Tabla 25. Coordenadas nominales de los puntos utilizados en el cálculo de EZZ en el primer método de verificación geométrica.*

Puntos	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
217	3	3	42
218	15	3	42
219	60	3	42
220	120	3	42
221	180	3	42
222	240	3	42
223	285	3	42
224	297	3	42
245	3	3	88
246	15	3	88
247	60	3	88
248	120	3	88
249	180	3	88
250	240	3	88
251	285	3	88
252	297	3	88
273	3	3	134
274	15	3	134
275	60	3	134
276	120	3	134
277	180	3	134
278	240	3	134
279	285	3	134
280	297	3	134



*Figura 159. Localización de los puntos utilizados en el cálculo de EZZ en el primer método de verificación geométrica.*

## Anexo 5. Tablas resultantes del primer método de Verificación geométrica.

En este trabajo se han desarrollado una serie de cálculos para la obtención del valor de los distintos errores geométricos de una máquina herramienta de tres ejes mediante dos métodos distintos de verificación geométrica. En este anexo se va a tratar el primer método de verificación geométrica y se van a mostrar los resultados obtenidos en los cálculos. Las fórmulas que utiliza este trabajo han sido obtenidas del análisis que se ha realizado del artículo de Pezeshki et al. [7]. La formulación utiliza las coordenadas nominales y las coordenadas reales de una serie de puntos de la pieza patrón y se basa en la comparación de los valores de ambas coordenadas para la obtención del error. En la siguiente tabla se muestran las fórmulas utilizadas.

Tabla 26. Fórmulas para el cálculo de los errores geométricos mediante el primer método de verificación geométrica.

Error	Fórmula	Función teórica
EXX	Xnom-Xreal	4,5e-8*x^2-1,5e-4*x
EYX	Ynom-Yreal	-3,35e-8*x^2
EZX	Znom-Zreal	5e-8*x^2
EAX	$dy/\Delta z = (yb' - ya')/(zb' - za')$	-2,2e-10*x^2-1,1e-6*x
EBX	$dx/\Delta z = (xb' - xa')/(zb' - za')$	-7,2e-10*x^2+2,1e-6*x
ECX	$dx/\Delta y = (xb' - xa')/(yb' - ya')$	1,4e-10*x^2-1,7e-6*x
EXY	Xreal-Xnom	5,1e-8*y^2-6,4e-5*y
EYY	Yreal-Ynom	-3,56e-8*y^2+6,07e-5*y
EZY	Zreal-Znom	-1,19e-7*y^2
EAY	$dy/\Delta z = (yb' - ya')/(zb' - za')$	-3,2e-10*y^2+4,6e-6*y
EBY	$dx/\Delta z = (xb' - xa')/(zb' - za')$	5,7e-10*y^2-3,2e-6*y
ECY	$dy/\Delta z = (yb' - ya')/(xb' - xa')$	4,6e-10*y^2+2,6e-6*y
EXZ	Xreal-Xnom	1,8e-7*z^2+1,2e-5*z
EYZ	Yreal-Ynom	-4,96e-8*z^2-4,2e-5*z
EZZ	Zreal-Znom	-6,03e-8*z^2+1,36e-4*z
EAZ	-	-3,3e-10*z^2-2,2e-6*z
EBZ	-	8,2e-10*z^2-5,5e-6*z
ECZ	-	6,2e-10*z^2+6,1e-6*z
ECO	-	4e-4*x
EBO	-	-5e-4*x
EAO	-	-9,5e-4*y

En este anexo se incluyen las tablas que contienen los errores geométricos obtenidos en este método. En las tablas en primer lugar aparece la columna con la numeración que se ha asignado a los distintos puntos pertenecientes al conjunto utilizado en la simulación. La elección de los puntos se ha explicado anteriormente en el anexo 4. A continuación se encuentran las coordenadas nominales de los puntos en cada uno de los tres ejes. Junto a las coordenadas nominales se encuentran las coordenadas reales del punto en los tres ejes que se han obtenido en la simulación con Matlab. Por último se encuentran las columnas del error y del error teórico. Los valores de la columna del error han sido obtenidos por la aplicación de la formulación desarrollada en cada punto utilizado y por las características del ensayo correspondiente. Los valores de la columna del error teórico se obtienen de la aplicación de las funciones teóricas del error utilizando el valor de la coordenada nominal del eje en el que se está estudiando el error en cada punto, el eje de la dirección de movimiento.

### **A5.1 Resultados de los cálculos individuales de los errores geométricos.**

En este apartado los valores de las coordenadas reales se corresponden a los valores obtenidos de introducir en la simulación de Matlab únicamente la función teórica del error que se quiere medir, no habrá influencia del resto de errores geométricos. Por este motivo ha sido necesario realizar una simulación con cada error, de esta forma aunque en el cálculo de dos errores se utilicen los mismos puntos estos tendrán coordenadas reales diferentes.

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 27. EXX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXX (mm)	EXX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
385	0	10	175	0	10	175	0	0
387	20	10	175	20,003	10	175	-0,0030	-0,0030
389	40	10	175	40,0059	10	175	-0,0059	-0,0059
391	80	10	175	80,0117	10	175	-0,0117	-0,0117
393	100	10	175	100,0146	10	175	-0,0146	-0,0146
395	140	10	175	140,0201	10	175	-0,0201	-0,0201
397	160	10	175	160,0228	10	175	-0,0228	-0,0228
399	200	10	175	200,0282	10	175	-0,0282	-0,0282
401	220	10	175	220,0308	10	175	-0,0308	-0,0308
403	260	10	175	260,036	10	175	-0,0360	-0,0360
405	280	10	175	280,0385	10	175	-0,0385	-0,0385
407	300	10	175	300,041	10	175	-0,0410	-0,0410

Tabla 28. EYX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYX (mm)	EYX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
357	5	5	137	5	5	137	0	-8,375E-07
358	15	5	137	15	5	137	0	-7,5375E-06
359	60	5	137	60	5,0001	137	-1E-04	-0,00012
360	120	5	137	120	5,0005	137	-0,00050	-0,00048
361	180	5	137	180	5,0011	137	-0,00110	-0,00109
362	240	5	137	240	5,0019	137	-0,00190	-0,00193
363	285	5	137	285	5,0027	137	-0,00270	-0,00272
364	295	5	137	295	5,0029	137	-0,00290	-0,00292

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 29. EZX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZX (mm)	EZX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
49	15	26	98,01	15	26	98,01	0	0,00001
50	45	26	98,01	45	26	98,0099	0,00010	0,00010
51	75	26	98,01	75	26	98,0097	0,00030	0,00028
52	105	26	98,01	105	26	98,0094	0,00060	0,00055
53	135	26	98,01	135	26	98,0091	0,00090	0,00091
54	165	26	98,01	165	26	98,0086	0,00140	0,00136
55	195	26	98,01	195	26	98,0081	0,00190	0,00190
56	225	26	98,01	225	26	98,0075	0,00250	0,00253
57	255	26	98,01	255	26	98,0067	0,00330	0,00325
58	285	26	98,01	285	26	98,0059	0,00410	0,00406

Tabla 30. EXY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXY (mm)	EXY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
364	295	5	137	294,9997	5	137	-0,00030	-0,00032
365	295	15	137	294,9991	15	137	-0,00090	-0,00095
366	295	56,25	137	294,9966	56,25	137	-0,00340	-0,00344
367	295	108,75	137	294,9936	108,75	137	-0,00640	-0,00636
368	295	161,25	137	294,991	161,25	137	-0,00900	-0,00899
369	295	213,75	137	294,9887	213,75	137	-0,01130	-0,01135
370	295	255	137	294,987	255	137	-0,01300	-0,01300
371	295	265	137	294,9866	265	137	-0,01340	-0,01338

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 31. EYY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYY (mm)	EYY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
409	290	0	175	290	0	175	0	0
411	290	20	175	290	20,0012	175	0,00120	0,00120
413	290	40	175	290	40,0024	175	0,00240	0,00237
415	290	72,5	175	290	72,5042	175	0,00420	0,00421
417	290	92,5	175	290	92,5053	175	0,00530	0,00531
419	290	125	175	290	125,007	175	0,00700	0,00703
421	290	145	175	290	145,0081	175	0,00810	0,00805
423	290	177,5	175	290	177,5097	175	0,00970	0,00965
425	290	197,5	175	290	197,5106	175	0,01060	0,01060
427	290	230	175	290	230,0121	175	0,01210	0,01208
429	290	250	175	290	250,0129	175	0,01290	0,01295
431	290	270	175	290	270,0138	175	0,01380	0,01379

Tabla 32. EZY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZY (mm)	EZY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
89	26	255	98,01	26	255	98,0023	-0,00770	-0,00774
90	26	225	98,01	26	225	98,004	-0,00600	-0,00602
91	26	195	98,01	26	195	98,0055	-0,00450	-0,00452
92	26	165	98,01	26	165	98,0068	-0,00320	-0,00324
93	26	135	98,01	26	135	98,0078	-0,00220	-0,00217
94	26	105	98,01	26	105	98,0087	-0,00130	-0,00131
95	26	75	98,01	26	75	98,0093	-0,00070	-0,00067
96	26	45	98,01	26	45	98,0098	-0,00020	-0,00024
97	26	15	98,01	26	15	98,01	0	-0,00003

Tabla 33. EXZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXZ (mm)	EXZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
308	295	5	45	295,0009	5	45	0,00090	0,00090
309	295	15	45	295,0009	15	45	0,00090	0,00090
310	295	56,25	45	295,0009	56,25	45	0,00090	0,00090
311	295	108,75	45	295,0009	108,75	45	0,00090	0,00090
312	295	161,25	45	295,0009	161,25	45	0,00090	0,00090
313	295	213,75	45	295,0009	213,75	45	0,00090	0,00090
314	295	255	45	295,0009	255	45	0,00090	0,00090
315	295	265	45	295,0009	265	45	0,00090	0,00090
336	295	5	91	295,0026	5	91	0,00260	0,00258
337	295	15	91	295,0026	15	91	0,00260	0,00258
338	295	56,25	91	295,0026	56,25	91	0,00260	0,00258
339	295	108,75	91	295,0026	108,75	91	0,00260	0,00258
340	295	161,25	91	295,0026	161,25	91	0,00260	0,00258
341	295	213,75	91	295,0026	213,75	91	0,00260	0,00258
342	295	255	91	295,0026	255	91	0,00260	0,00258
343	295	265	91	295,0026	265	91	0,00260	0,00258
364	295	5	137	295,005	5	137	0,00500	0,00502
365	295	15	137	295,005	15	137	0,00500	0,00502
366	295	56,25	137	295,005	56,25	137	0,00500	0,00502
367	295	108,75	137	295,005	108,75	137	0,00500	0,00502
368	295	161,25	137	295,005	161,25	137	0,00500	0,00502
369	295	213,75	137	295,005	213,75	137	0,00500	0,00502
370	295	255	137	295,005	255	137	0,00500	0,00502
371	295	265	137	295,005	265	137	0,00500	0,00502

*Tabla 34. EYZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYZ (mm)	EYZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
301	5	5	45	5	4,998	45	-0,00200	-0,00199
302	15	5	45	15	4,998	45	-0,00200	-0,00199
303	60	5	45	60	4,998	45	-0,00200	-0,00199
304	120	5	45	120	4,998	45	-0,00200	-0,00199
305	180	5	45	180	4,998	45	-0,00200	-0,00199
306	240	5	45	240	4,998	45	-0,00200	-0,00199
307	285	5	45	285	4,998	45	-0,00200	-0,00199
308	295	5	45	295	4,998	45	-0,00200	-0,00199
329	5	5	91	5	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
330	15	5	91	15	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
331	60	5	91	60	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
332	120	5	91	120	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
333	180	5	91	180	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
334	240	5	91	240	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
335	285	5	91	285	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
336	295	5	91	295	4,9958	91	-0,00420	-0,00423
357	5	5	137	5	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
358	15	5	137	15	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
359	60	5	137	60	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
360	120	5	137	120	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
361	180	5	137	180	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
362	240	5	137	240	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
363	285	5	137	285	4,9933	137	-0,00670	-0,00668
364	295	5	137	295	4,9933	137	-0,00670	-0,00668

*Tabla 35. EZZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Puntos	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZG (mm)	EZG teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3	3	42,0056	0,00560	0,00561
218	15	3	42	15	3	42,0056	0,00560	0,00561
219	60	3	42	60	3	42,0056	0,00560	0,00561
220	120	3	42	120	3	42,0056	0,00560	0,00561
221	180	3	42	180	3	42,0056	0,00560	0,00561
222	240	3	42	240	3	42,0056	0,00560	0,00561
223	285	3	42	285	3	42,0056	0,00560	0,00561
224	297	3	42	297	3	42,0056	0,00560	0,00561
245	3	3	88	3	3	88,0115	0,01150	0,01150
246	15	3	88	15	3	88,0115	0,01150	0,01150
247	60	3	88	60	3	88,0115	0,01150	0,01150
248	120	3	88	120	3	88,0115	0,01150	0,01150
249	180	3	88	180	3	88,0115	0,01150	0,01150
250	240	3	88	240	3	88,0115	0,01150	0,01150
251	285	3	88	285	3	88,0115	0,01150	0,01150
252	297	3	88	297	3	88,0115	0,01150	0,01150
273	3	3	134	3	3	134,0171	0,01710	0,01714
274	15	3	134	15	3	134,0171	0,01710	0,01714
275	60	3	134	60	3	134,0171	0,01710	0,01714
276	120	3	134	120	3	134,0171	0,01710	0,01714
277	180	3	134	180	3	134,0171	0,01710	0,01714
278	240	3	134	240	3	134,0171	0,01710	0,01714
279	285	3	134	285	3	134,0171	0,01710	0,01714
280	297	3	134	297	3	134,0171	0,01710	0,01714

En este ensayo se observa que se han obtenido muy buenos resultados. En todos los errores que se han calculado el error obtenido por formulación es muy próximo al error teórico esperado, llegando a obtener valores exactos como ocurre en el caso de EXX. Para realizar un ensayo con estas características el método resulta adecuado.

## A5.2 Resultados de los cálculos de los errores geométricos con la influencia de todos los errores.

En este apartado en la obtención del valor de las coordenadas reales se han utilizado todas las funciones teóricas de los 21 errores geométricos y se ha realizado una única simulación con todo el conjunto de los puntos utilizados. En este caso el error que se representa en la tabla es el resultante de aplicar la formulación planteada y de eliminarle la influencia del resto de errores como se ha explicado detalladamente en la memoria de este trabajo.

*Tabla 36. EXX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXX (mm)	EXX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
385	0	10	175	0,0069776	9,9917	175,0219	0	0
387	20	10	175	20,01	9,9917	175,0219	-0,00302	-0,00298
389	40	10	175	40,0129	9,9918	175,0219	-0,00592	-0,00593
391	80	10	175	80,0187	9,9919	175,0216	-0,01172	-0,01171
393	100	10	175	100,0215	9,9921	175,0214	-0,01452	-0,01455
395	140	10	175	140,0271	9,9924	175,021	-0,02012	-0,02012
397	160	10	175	160,0298	9,9926	175,0207	-0,02282	-0,02285
399	200	10	175	200,0352	9,9931	175,0199	-0,02822	-0,02820
401	220	10	175	220,0378	9,9934	175,0195	-0,03082	-0,03082
403	260	10	175	260,0429	9,994	175,0186	-0,03592	-0,03596
405	280	10	175	280,0454	9,9944	175,018	-0,03842	-0,03847
407	300	10	175	300,0479	9,9947	175,0174	-0,04092	-0,04095

*Tabla 37. EYX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYX (mm)	EYX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
357	5	5	137	5,0055	4,9936	137,0175	0	-8,375E-07
358	15	5	137	15,0069	4,9936	137,0175	0	-7,5375E-06
359	60	5	137	60,0135	4,9937	137,0173	-1E-04	-0,00012
360	120	5	137	120,0221	4,9941	137,0168	-0,00050	-0,00048
361	180	5	137	180,0302	4,9947	137,0159	-0,00110	-0,00109
362	240	5	137	240,0381	4,9955	137,0146	-0,00190	-0,00193
363	285	5	137	285,0438	4,9963	137,0134	-0,00270	-0,00272
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131	-0,00290	-0,00292

*Tabla 38. EZX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZX (mm)	EZX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
49	15	26	98,01	15,0035	25,997	98,0227	0	0,00001
50	45	26	98,01	45,0079	25,997	98,0226	0,00010	0,00010
51	75	26	98,01	75,0123	25,9971	98,0224	0,00030	0,00028
52	105	26	98,01	105,0165	25,9973	98,0221	0,00060	0,00055
53	135	26	98,01	135,0207	25,9976	98,0218	0,00090	0,00091
54	165	26	98,01	165,0248	25,9979	98,0213	0,00140	0,00136
55	195	26	98,01	195,0288	25,9982	98,0208	0,00190	0,00190
56	225	26	98,01	225,0327	25,9987	98,0201	0,00260	0,00253
57	255	26	98,01	255,0366	25,9991	98,0194	0,00330	0,00325
58	285	26	98,01	285,0404	25,9997	98,0186	0,00410	0,00406

*Tabla 39. EXY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXY (mm)	EXY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131	0	-0,00032
365	295	15	137	295,0444	14,9971	137,0131	-0,00060	-0,00095
366	295	56,25	137	295,0419	56,2495	137,0128	-0,00310	-0,00344
367	295	108,75	137	295,039	108,7524	137,0117	-0,00600	-0,00636
368	295	161,25	137	295,0364	161,2551	137,0101	-0,00860	-0,00899
369	295	213,75	137	295,034	213,7576	137,0077	-0,01100	-0,01135
370	295	255	137	295,0324	255,0094	137,0054	-0,01260	-0,01300
371	295	265	137	295,032	265,0098	137,0048	-0,01300	-0,01338

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 40. EYY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYY (mm)	EYY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
409	290	0	175	290,0473	-0,0060513	175,0177	0	0
411	290	20	175	290,0461	19,9951	175,0177	0,00115	0,00120
413	290	40	175	290,0448	39,9963	175,0176	0,00235	0,00237
415	290	72,5	175	290,043	72,4982	175,0171	0,00425	0,00421
417	290	92,5	175	290,0418	92,4993	175,0167	0,00535	0,00531
419	290	125	175	290,0401	125,001	175,0159	0,00705	0,00703
421	290	145	175	290,0391	145,002	175,0152	0,00805	0,00805
423	290	177,5	175	290,0376	177,5036	175,014	0,00965	0,00965
425	290	197,5	175	290,0367	197,5045	175,0131	0,01055	0,01060
427	290	230	175	290,0353	230,006	175,0115	0,01205	0,01208
429	290	250	175	290,0345	250,0069	175,0103	0,01295	0,01295
431	290	270	175	290,0338	270,0077	175,0091	0,01375	0,01379

Tabla 41. EZY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZY (mm)	EZY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
89	26	255	98,01	25,9938	255,0086	98,015	-0,00770	-0,00774
90	26	225	98,01	25,995	225,0073	98,0167	-0,00600	-0,00602
91	26	195	98,01	25,9962	195,0059	98,0182	-0,00450	-0,00452
92	26	165	98,01	25,9976	165,0045	98,0195	-0,00320	-0,00324
93	26	135	98,01	25,9991	135,003	98,0205	-0,00220	-0,00217
94	26	105	98,01	26,0006	105,0014	98,0214	-0,00130	-0,00131
95	26	75	98,01	26,0023	74,9998	98,022	-0,00070	-0,00067
96	26	45	98,01	26,004	44,9981	98,0225	-0,00020	-0,00024
97	26	15	98,01	26,0058	14,9963	98,0227	0	-0,00003

Tabla 42. EXZ con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EXZ (mm)	EXZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
308	295	5	45	295,0409	5,0012	45,0016	0,00090	0,00090
309	295	15	45	295,0403	15,0018	45,0016	0,00090	0,00090
310	295	56,25	45	295,0378	56,2542	45,0013	0,00090	0,00090
311	295	108,75	45	295,0349	108,7571	45,0002	0,00090	0,00090
312	295	161,25	45	295,0322	161,2598	44,9986	0,00090	0,00090
313	295	213,75	45	295,0299	213,7623	44,9962	0,00090	0,00090
314	295	255	45	295,0282	255,0141	44,9939	0,00090	0,00090
315	295	265	45	295,0279	265,0145	44,9933	0,00090	0,00090
336	295	5	91	295,0426	4,999	91,0075	0,00260	0,00258
337	295	15	91	295,042	14,9996	91,0075	0,00260	0,00258
338	295	56,25	91	295,0395	56,252	91,0071	0,00260	0,00258
339	295	108,75	91	295,0366	108,7549	91,0061	0,00260	0,00258
340	295	161,25	91	295,0339	161,2575	91,0044	0,00260	0,00258
341	295	213,75	91	295,0316	213,76	91,0021	0,00260	0,00258
342	295	255	91	295,0299	255,0118	90,9998	0,00260	0,00258
343	295	265	91	295,0295	265,0123	90,9992	0,00250	0,00258
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131	0,00500	0,00502
365	295	15	137	295,0444	14,9971	137,0131	0,00500	0,00502
366	295	56,25	137	295,0419	56,2495	137,0128	0,00500	0,00502
367	295	108,75	137	295,039	108,7524	137,0117	0,00500	0,00502
368	295	161,25	137	295,0364	161,2551	137,0101	0,00510	0,00502
369	295	213,75	137	295,034	213,7576	137,0077	0,00500	0,00502
370	295	255	137	295,0324	255,0094	137,0054	0,00510	0,00502
371	295	265	137	295,032	265,0098	137,0048	0,00500	0,00502

*Tabla 43. EYZ con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EYZ (mm)	EYZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
301	5	5	45	5,0013	4,9983	45,006	-0,00200	-0,00199
302	15	5	45	15,0028	4,9983	45,006	-0,00200	-0,00199
303	60	5	45	60,0094	4,9984	45,0058	-0,00200	-0,00199
304	120	5	45	120,0179	4,9988	45,0053	-0,00200	-0,00199
305	180	5	45	180,0261	4,9994	45,0044	-0,00200	-0,00199
306	240	5	45	240,034	5,0002	45,0031	-0,00200	-0,00199
307	285	5	45	285,0397	5,001	45,0019	-0,00200	-0,00199
308	295	5	45	295,0409	5,0012	45,0016	-0,00200	-0,00199
329	5	5	91	5,003	4,9961	91,0119	-0,00420	-0,00423
330	15	5	91	15,0045	4,9961	91,0119	-0,00420	-0,00423
331	60	5	91	60,0111	4,9962	91,0117	-0,00420	-0,00423
332	120	5	91	120,0196	4,9966	91,0112	-0,00420	-0,00423
333	180	5	91	180,0278	4,9972	91,0103	-0,00420	-0,00423
334	240	5	91	240,0357	4,998	91,009	-0,00420	-0,00423
335	285	5	91	285,0414	4,9988	91,0078	-0,00420	-0,00423
336	295	5	91	295,0426	4,999	91,0075	-0,00420	-0,00423
357	5	5	137	5,0055	4,9936	137,0175	-0,00670	-0,00668
358	15	5	137	15,0069	4,9936	137,0175	-0,00670	-0,00668
359	60	5	137	60,0135	4,9937	137,0173	-0,00670	-0,00668
360	120	5	137	120,0221	4,9941	137,0168	-0,00670	-0,00668
361	180	5	137	180,0302	4,9947	137,0159	-0,00670	-0,00668
362	240	5	137	240,0381	4,9955	137,0146	-0,00670	-0,00668
363	285	5	137	285,0438	4,9963	137,0134	-0,00670	-0,00668
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131	-0,00670	-0,00668

*Tabla 44. EZZ con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EZZ (mm)	EZZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3,0011	2,9983	42,0056	0,00560	0,00561
218	15	3	42	15,0029	2,9983	42,0056	0,00561	0,00561
219	60	3	42	60,0095	2,9985	42,0054	0,00558	0,00561
220	120	3	42	120,018	2,9988	42,0049	0,00562	0,00561
221	180	3	42	180,0262	2,9994	42,004	0,00562	0,00561
222	240	3	42	240,034	3,0003	42,0027	0,00558	0,00561
223	285	3	42	285,0397	3,0011	42,0015	0,00556	0,00561
224	297	3	42	297,0412	3,0013	42,0012	0,00561	0,00561
245	3	3	88	3,0027	2,9961	88,0115	0,01150	0,01150
246	15	3	88	15,0045	2,9961	88,0115	0,01151	0,01150
247	60	3	88	60,0111	2,9962	88,0113	0,01148	0,01150
248	120	3	88	120,0196	2,9966	88,0108	0,01152	0,01150
249	180	3	88	180,0278	2,9972	88,0099	0,01152	0,01150
250	240	3	88	240,0357	2,998	88,0086	0,01148	0,01150
251	285	3	88	285,0414	2,9988	88,0074	0,01146	0,01150
252	297	3	88	297,0428	2,9991	88,0071	0,01151	0,01150
273	3	3	134	3,0051	2,9937	134,0171	0,01710	0,01714
274	15	3	134	15,0069	2,9937	134,0171	0,01711	0,01714
275	60	3	134	60,0135	2,9938	134,017	0,01718	0,01714
276	120	3	134	120,022	2,9941	134,0164	0,01712	0,01714
277	180	3	134	180,0302	2,9947	134,0155	0,01712	0,01714
278	240	3	134	240,0381	2,9956	134,0143	0,01718	0,01714
279	285	3	134	285,0437	2,9964	134,0131	0,01716	0,01714
280	297	3	134	297,0452	2,9966	134,0127	0,01711	0,01714

*Tabla 45. EAX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EAX	EAX teórico
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
301	5	5	45	5,0013	4,9983	45,006	0,000000	-0,000006
302	15	5	45	15,0028	4,9983	45,006	0,000000	-0,000017
303	60	5	45	60,0094	4,9984	45,0058	0,000000	-0,000067
304	120	5	45	120,0179	4,9988	45,0053	0,000000	-0,000135
305	180	5	45	180,0261	4,9994	45,0044	0,000000	-0,000205
306	240	5	45	240,034	5,0002	45,0031	0,000000	-0,000277
307	285	5	45	285,0397	5,001	45,0019	0,000000	-0,000331
308	295	5	45	295,0409	5,0012	45,0016	0,000000	-0,000344
357	5	5	137	5,0055	4,9936	137,0175		
358	15	5	137	15,0069	4,9936	137,0175		
359	60	5	137	60,0135	4,9937	137,0173		
360	120	5	137	120,0221	4,9941	137,0168		
361	180	5	137	180,0302	4,9947	137,0159		
362	240	5	137	240,0381	4,9955	137,0146		
363	285	5	137	285,0438	4,9963	137,0134		
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131		

*Tabla 46. EBX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX	EBX teórico
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
385	0	10	175	0,0069776	9,9917	175,0219	0,00000	0,00000
387	20	10	175	20,01	9,9917	175,0219	0,09428	0,00004
389	40	10	175	40,0129	9,9918	175,0219	0,09426	0,00008
391	80	10	175	80,0187	9,9919	175,0216	0,09428	0,00016
393	100	10	175	100,0215	9,9921	175,0214	-0,20035	0,00020
395	140	10	175	140,0271	9,9924	175,021	0,09426	0,00028
397	160	10	175	160,0298	9,9926	175,0207	-0,20037	0,00032
399	200	10	175	200,0352	9,9931	175,0199	0,09428	0,00039
401	220	10	175	220,0378	9,9934	175,0195	0,09428	0,00043
403	260	10	175	260,0429	9,994	175,0186	-0,20037	0,00050
405	280	10	175	280,0454	9,9944	175,018	-0,20035	0,00053
407	300	10	175	300,0479	9,9947	175,0174	-0,20035	0,00057
386	0	10	105	0,0026096	9,9956	105,0136		
388	20	10	105	20,0056	9,9957	105,0136		
390	40	10	105	40,0085	9,9957	105,0135		
392	80	10	105	80,0143	9,9959	105,0133		
394	100	10	105	100,0172	9,996	105,0131		
396	140	10	105	140,0227	9,9963	105,0126		
398	160	10	105	160,0255	9,9965	105,0123		
400	200	10	105	200,0308	9,997	105,0116		
402	220	10	105	220,0334	9,9973	105,0112		
404	260	10	105	260,0386	9,9979	105,0102		
406	280	10	105	280,0411	9,9983	105,0097		
408	300	10	105	300,0436	9,9987	105,0091		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 47. ECX con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX	ECX teórico
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
385	0	10	175	0,0069776	9,9917	175,0219	0,00000	0,00000
387	20	10	175	20,01	9,9917	175,0219	-0,03449	-0,00003
389	40	10	175	40,0129	9,9918	175,0219	-0,03449	-0,00007
391	80	10	175	80,0187	9,9919	175,0216	-0,03449	-0,00014
393	100	10	175	100,0215	9,9921	175,0214	0,04801	-0,00017
395	140	10	175	140,0271	9,9924	175,021	-0,03449	-0,00024
397	160	10	175	160,0298	9,9926	175,0207	0,04802	-0,00027
399	200	10	175	200,0352	9,9931	175,0199	-0,03449	-0,00033
401	220	10	175	220,0378	9,9934	175,0195	-0,03449	-0,00037
403	260	10	175	260,0429	9,994	175,0186	0,04802	-0,00043
405	280	10	175	280,0454	9,9944	175,018	0,04801	-0,00047
407	300	10	175	300,0479	9,9947	175,0174	0,04802	-0,00050
455	0	260	175	-0,0055806	260,0045	175,0139		
453	20	260	175	19,9974	260,0045	175,0139		
451	40	260	175	40,0003	260,0046	175,0138		
449	80	260	175	80,0061	260,0047	175,0136		
447	100	260	175	100,009	260,0048	175,0134		
445	140	260	175	140,0145	260,0052	175,0129		
443	160	260	175	160,0173	260,0054	175,0126		
441	200	260	175	200,0226	260,0058	175,0119		
439	220	260	175	220,0252	260,0061	175,0115		
437	260	260	175	260,0304	260,0068	175,0105		
435	280	260	175	280,0329	260,0071	175,01		
433	300	260	175	300,0354	260,0075	175,0094		

*Tabla 48. EAY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EAY (arcsec)	EAY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
479	10	0	175	10,0091	-0,0088657	175,0219	0,00000	0,00000
477	10	20	175	10,0078	19,9923	175,0219	0,03594	0,00009
475	10	40	175	10,0066	39,9935	175,0218	0,03596	0,00018
473	10	72,5	175	10,0047	72,4953	175,0213	-0,25868	0,00033
471	10	92,5	175	10,0036	92,4964	175,0209	-0,25868	0,00042
469	10	125	175	10,0019	124,9982	175,0201	0,03594	0,00057
467	10	145	175	10,0009	144,9992	175,0194	0,03594	0,00066
465	10	177,5	175	9,9994	177,5008	175,0182	0,03594	0,00081
463	10	197,5	175	9,9985	197,5017	175,0173	0,03594	0,00090
461	10	230	175	9,9971	230,0032	175,0157	0,03596	0,00104
459	10	250	175	9,9963	250,0041	175,0145	0,03594	0,00113
457	10	270	175	9,9955	270,0049	175,0133	0,03596	0,00122
480	10	0	105	10,0047	-0,0049535	105,0136		
478	10	20	105	10,0035	19,9962	105,0136		
476	10	40	105	10,0023	39,9974	105,0134		
474	10	72,5	105	10,0004	72,4993	105,013		
472	10	92,5	105	9,9993	92,5004	105,0126		
470	10	125	105	9,9975	125,0021	105,0118		
468	10	145	105	9,9965	145,0031	105,0111		
466	10	177,5	105	9,995	177,5047	105,0099		
464	10	197,5	105	9,9941	197,5056	105,009		
462	10	230	105	9,9927	230,0071	105,0073		
460	10	250	105	9,9919	250,008	105,0062		
458	10	270	105	9,9912	270,0088	105,0049		

Tabla 49. EBY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBY (arcsec)	EBY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
308	295	5	45	295,0409	5,0012	45,0016	0,00000	-0,00002
309	295	15	45	295,0403	15,0018	45,0016	0,00000	-0,00005
310	295	56,25	45	295,0378	56,2542	45,0013	0,00000	-0,00018
311	295	108,75	45	295,0349	108,7571	45,0002	0,00000	-0,00034
312	295	161,25	45	295,0322	161,2598	44,9986	0,22417	-0,00050
313	295	213,75	45	295,0299	213,7623	44,9962	0,00000	-0,00066
314	295	255	45	295,0282	255,0141	44,9939	0,22417	-0,00078
315	295	265	45	295,0279	265,0145	44,9933	0,00000	-0,00081
364	295	5	137	295,045	4,9965	137,0131		
365	295	15	137	295,0444	14,9971	137,0131		
366	295	56,25	137	295,0419	56,2495	137,0128		
367	295	108,75	137	295,039	108,7524	137,0117		
368	295	161,25	137	295,0364	161,2551	137,0101		
369	295	213,75	137	295,034	213,7576	137,0077		
370	295	255	137	295,0324	255,0094	137,0054		
371	295	265	137	295,032	265,0098	137,0048		

Tabla 50. ECY con la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del primer método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECY (arcsec)	ECY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
409	290	0	175	290,0473	-0,0060513	175,0177	0,00000	0,00000
411	290	20	175	290,0461	19,9951	175,0177	-0,01061	0,00005
413	290	40	175	290,0448	39,9963	175,0176	-0,01061	0,00010
415	290	72,5	175	290,043	72,4982	175,0171	0,06305	0,00019
417	290	92,5	175	290,0418	92,4993	175,0167	0,06305	0,00024
419	290	125	175	290,0401	125,001	175,0159	-0,01061	0,00033
421	290	145	175	290,0391	145,002	175,0152	-0,01061	0,00039
423	290	177,5	175	290,0376	177,5036	175,014	-0,01061	0,00048
425	290	197,5	175	290,0367	197,5045	175,0131	-0,01061	0,00053
427	290	230	175	290,0353	230,006	175,0115	-0,01061	0,00062
429	290	250	175	290,0345	250,0069	175,0103	-0,01061	0,00068
431	290	270	175	290,0338	270,0077	175,0091	-0,01061	0,00074
479	10	0	175	10,0091	-0,0088657	175,0219		
477	10	20	175	10,0078	19,9923	175,0219		
475	10	40	175	10,0066	39,9935	175,0218		
473	10	72,5	175	10,0047	72,4953	175,0213		
471	10	92,5	175	10,0036	92,4964	175,0209		
469	10	125	175	10,0019	124,9982	175,0201		
467	10	145	175	10,0009	144,9992	175,0194		
465	10	177,5	175	9,9994	177,5008	175,0182		
463	10	197,5	175	9,9985	197,5017	175,0173		
461	10	230	175	9,9971	230,0032	175,0157		
459	10	250	175	9,9963	250,0041	175,0145		
457	10	270	175	9,9955	270,0049	175,0133		

En primer lugar se han calculado los errores de movimiento lineal. Se puede observar que los resultados de todos esos errores resultan muy próximos a los esperados, sin embargo se puede comprobar que en el ensayo anterior los resultados eran más precisos por una pequeña diferencia. Tras comprobar que este método resulta adecuado para calcular los errores de movimiento lineal de los ejes lineales se ha pasado a calcular los de movimiento angular. Los errores correspondientes a Z no se han podido calcular debido a que no se han podido obtener las ecuaciones del análisis inicial del artículo. Para los de los ejes X e Y se ha comprobado que los resultados obtenidos no eran válidos al existir una diferencia significante respecto a los del error teórico que serían los esperados. Se ha concluido que este método no es adecuado para calcular la totalidad de los errores geométricos de una máquina herramienta de tres ejes.

## **Anexo 6. Obtención de la formulación e identificación de las series de puntos utilizadas en el segundo método de Verificación geométrica.**

En el segundo método de verificación geométrica presentado en el capítulo 6 del trabajo se calculan los errores geométricos mediante la formulación que se obtiene a partir del modelo matemático simplificado de la máquina herramienta y analizando la tesis de Acosta [3]. En la memoria del trabajo se han descrito la obtención de la fórmula general del desplazamiento final así como las matrices y vectores que contienen los errores, siendo  $\bar{A}$  la matriz que contiene los errores de rotación,  $\bar{A}p$  la matriz de los ejes de rotación que están afectados por un offset y  $\bar{P}$  el vector que contiene los errores de posición y rectitud. Como se ha descrito en la memoria del trabajo para obtener la fórmula de cada error resulta necesario analizar cada tipo de error y su posición en la matriz o el vector y obtener la ecuación del desplazamiento de cada uno al caracterizar la fórmula general del desplazamiento final. Esta ecuación se aplicará a distintas series de puntos y con operaciones matemáticas se obtendrá la fórmula del error. A continuación se describe como se obtiene la ecuación del desplazamiento final de cada tipo de error y la fórmula para calcularlo.

- **Errores de guiñada y cabeceo:** Este error se obtiene de caracterizar la fórmula general del desplazamiento final, relacionarla a dos series de puntos y de la combinación de estas despejar el error. Para caracterizarla en primer lugar se deberá buscar la posición del error en una de las matrices de rotación por ser un movimiento angular. El error primero se buscará en  $\bar{A}$  y de no estar ahí se buscará en  $\bar{A}p$ . Este error se aislará del resto de errores ya que al combinar las ecuaciones del desplazamiento de las series de los errores de movimiento lineal se anularán por permanecer constantes y el resto de errores que interfieren se anularán por estar multiplicados por el mismo valor de la coordenada en la ecuación del desplazamiento de ambas series. En algunos casos se han utilizando tres pares de series, realizando entre dos de ellas un promedio. Por ejemplo para calcular un error de cabeceo y de guiñada en el eje X las ecuaciones del desplazamiento en una serie según el análisis de [3] serán respectivamente:

$$XFinali(X) = -Xnom(X) + ECX * Xnomi(Y)$$
$$XFinali(X) = -Xnomi(X) - EBX * Xnomi(Z)$$

Finalmente este error se calculará como el cociente de la diferencia de las coordenadas reales de posición de las series entre las coordenadas nominales de la distancia que las separan.

- **Errores de posición:** Este error se obtiene de caracterizar la fórmula general del desplazamiento final para una serie de puntos. El error se localiza en el vector  $\bar{P}$  y en este cálculo van a influir los errores de guiñada y cabeceo anteriores. Para saber exactamente que errores influyen el error a calcular se busca en el vector  $\bar{P}$  y la fila en la que se encuentre indicará la fila de errores de la matriz  $\bar{A}$  y  $\bar{A}p$  que se ha de usar para la formulación. Si es necesario el uso de  $\bar{A}p$  no se usará la fila entera, únicamente la casilla de esa fila que se corresponde con la dirección del offset. Como ejemplo la ecuación del desplazamiento en el eje X según el análisis de [3] quedará:

$$XFinali(X) = -Xnomi(X) - EXX + ECX * Xnomi(Y) - EBX * Xnomi(Z)$$

Como resultado al despejar el error se calcula como la diferencia entre la posición real y la nominal junto con el efecto de los errores de guiñada y cabeceo.

- **Errores de balanceo:** En el cálculo de estos errores afectan desviaciones y errores calculados anteriormente por lo que va a ser necesario corregirlos. En primer lugar será necesario obtener la ecuación del desplazamiento para este error y aplicarla a una serie. Los errores que van a influir en el cálculo son los errores de rotación que se encuentren en la misma fila de la matriz  $\bar{A}$  o  $\bar{A}p$  que el error a calcular. Estos se incluirán en la ecuación de desplazamiento final y de ella se aislará el error de balanceo con la coordenada nominal que lo multiplica y el resto de factores formarán parte de la coordenada corregida.

A continuación se muestra como ejemplo la ecuación de desplazamiento de X analizando [3] como ejemplo de este proceso:

$$XFinali(Y) = Xnomi(Y) + ECX * Xnomi(X) + EAX * Xnomi(Z) - EXY * Xnomi(Z)$$

El eje en el que estas se compensan viene determinado por el eje que indique la columna en la que se encuentra el error a calcular. La ecuación se aplicará a dos pares de series (tres si dos de ellas se promedian) que mediante su comparación se podrá despejar la ecuación para el cálculo de este error el cuál se calcula como el cociente de la diferencia de rectitudes corregidas entre las diferencia de las coordenadas nominales de la distancia que separa las series.

- **Errores de rectitud:** Se obtienen de la caracterización de la fórmula general del desplazamiento final para una serie de puntos. En este cálculo van a influir los errores de cabeceo, balanceo y guiñada. Los errores a eliminar se encuentran en la fila de la matriz  $\bar{A}$  o  $\bar{A}p$  correspondiente a la fila en la que se encuentre el error en el vector  $\bar{P}$ . Si se utiliza  $\bar{A}p$  solo se usará la casilla de esa fila que su columna coincida con la coordenada del offset. Como ejemplo la ecuación del desplazamiento para el error de EYX analizando [3]es:

$$XFinali(Y) = Xnomi(Y) - EYX + ECX * Xnomi(X) + EXX * Xnomi(Z) - EAY * Xnomi(Z)$$

Finalmente el error se calcula como la diferencia de posición de las coordenadas en la dirección que se produce el error eliminando los efectos de los errores de cabeceo, balanceo y guiñada, esto se obtiene despejándolo de la fórmula de desplazamiento final.

- **Errores de perpendicularidad:** Estos errores se consideran incluidos dentro de ciertos errores de rectitud por lo cual no se realiza un cálculo individual de ellos.

Para realizar el cálculo de errores según este método va a ser necesario utilizar series paralelas de mediciones de puntos, esto es debido a que se toma como base el método de la barra de bolas. A continuación se relacionan el número de series que se necesitan y las características que deben tener las series utilizadas en cada error.

- **ECX:** Dos series paralelas en dirección X separadas una distancia Y.
- **EBX:** Dos series paralelas en dirección X separadas una distancia Z.

- EAY: Tres series en dirección Y. Dos estarán separadas una distancia X y se hará el promedio de ellas para utilizarlas en los cálculos con una que quedará paralela al promedio y separada en Z.
- ECY: Dos series paralelas en dirección Y separadas por un offset Xp.
- EBZ: Dos series paralelas en dirección Z separadas por un offset Xp.
- EAZ: Tres series en dirección Z. Dos estarán separadas una distancia X y se hará el promedio de ellas para utilizarlas en los cálculos con una que quedará paralela al promedio y separada por un offset Yp.
- EXX: Una serie en dirección X.
- EYY: Una serie en dirección Y a la que se le ha aplicado un offset Xp.
- EZZ: Una serie en dirección Z a la que se le ha aplicado un offset Xp.
- EAX: Dos series en dirección X separadas una distancia Z.
- EBY: Tres series en dirección Y. Dos estarán separadas una distancia X y se hará el promedio de ellas para utilizarlas en los cálculos con una que quedará paralela al promedio y separada en Z.
- ECZ: Dos series en dirección Z separadas una distancia X.
- EZX: Una serie en dirección X.
- EYX: Una serie en dirección X.
- EZY: Una serie en dirección Y sin offset.
- EXY: Una serie en dirección Y sin offset.
- EXZ: Una serie en dirección Z a la que se le ha aplicado un offset Yp.
- EYZ: Una serie en dirección Z a la que se le ha aplicado un offset Xp.

Con este análisis se determina que son necesarias tres series de puntos situadas estratégicamente para poder calcular con ellas los errores de los ejes X, Y y Z. Teniendo esto en cuenta para cada eje se van a realizar tres series de medidas, de esta forma se podrán medir con ellas todos los errores para una máquina de tres ejes.

En las tablas a continuación se indican los puntos que se utilizarán en cada serie con sus coordenadas nominales o si se les ha aplicado un offset con las coordenadas resultantes tras el offset.

- Serie X1:

Tabla 51. Coordenadas nominales de la serie X1 en el segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
217	3	3	42
218	15	3	42
219	60	3	42
220	120	3	42
221	180	3	42
222	240	3	42
223	285	3	42
224	297	3	42

- Serie X2:

Tabla 52. Coordenadas nominales de la serie X2 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
238	3	267	42
237	15	267	42
236	60	267	42
235	120	267	42
234	180	267	42
233	240	267	42
232	285	267	42
231	297	267	42

- Serie X3:

Tabla 53. Coordenadas nominales de la serie X3 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
273	3	3	134
274	15	3	134
275	60	3	134
276	120	3	134
277	180	3	134
278	240	3	134
279	285	3	134
280	297	3	134

- Serie Y1:

Tabla 54. Coordenadas con offset de la serie Y1 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas con offset			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
193	60	90	133,01
200	60	180	133,01
481	60	0	133,01

- Serie Y2:

Tabla 55. Coordenadas con offset de la serie Y2 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas con offset			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
193	240	90	133,01
200	240	180	133,01
481	240	0	133,01

- Serie Y3:

Tabla 56. Coordenadas nominales de la serie Y3 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales			
Punto	X (mm)	X (mm)	X (mm)
193	150	90	163,01
200	150	180	163,01
481	150	0	163,01

- Serie Z1:

Tabla 57. Coordenadas con offset de la serie Z1 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas con offset			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
304	180	5	45
332	180	5	91
360	180	5	137
4	180	5	178,01
482	180	5	0

- Serie Z2:

Tabla 58. Coordenadas con offset de la serie Z2 en el segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas con offset			
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
304	60	5	45
332	60	5	91
360	60	5	137
4	60	5	178,01
482	120	5	0

- Serie Z3:

Tabla 59. Coordenadas con offset de la serie Z3 en el segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
304	120	265	45
332	120	265	91
360	120	265	137
4	120	265	178,01
482	120	265	0

Estas series se pueden ver representadas en las siguientes figuras.

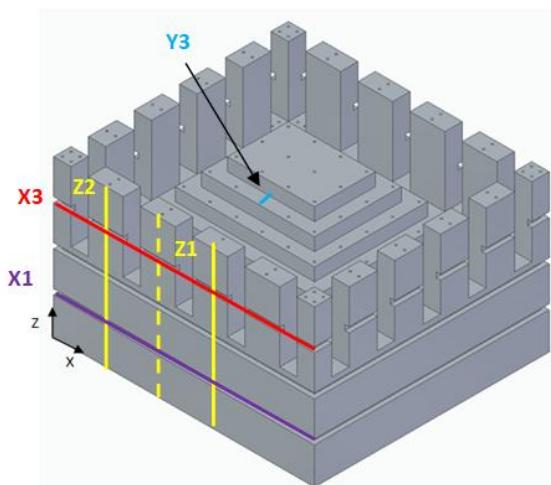


Figura 160. Representación de las series en vista isométrica.

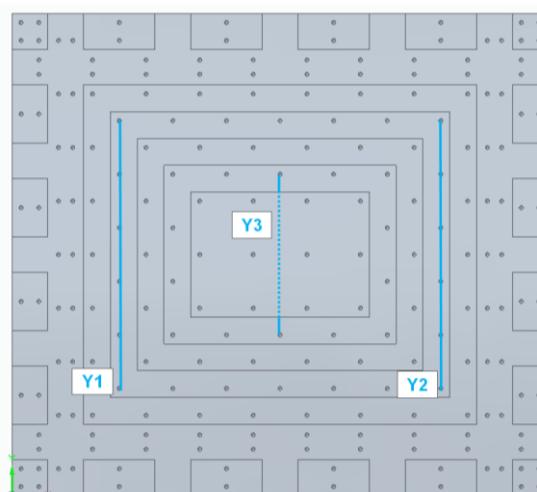


Figura 161. Representación de las series en vista en planta.

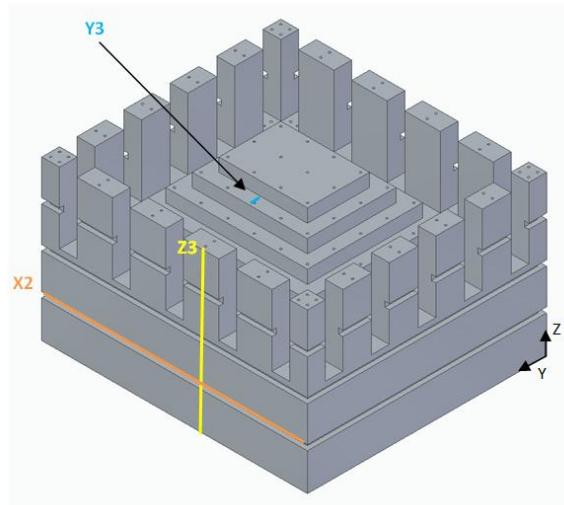


Figura 162. Representación de las series en vista isométrica posterior.

Finalmente, con todo el análisis realizado y el planteamiento de las series de puntos se llega a las siguientes fórmulas basadas en la tesis de Acosta [3] representadas en la siguiente tabla. En la siguiente tabla también se representan las funciones teóricas que servirán para comprobar los resultados.

Tabla 60. Fórmulas para el cálculo de los errores geométricos en el segundo método de verificación geométrica.

Error	Fórmulas	Funciones primer grado	Funciones segundo/tercer grado
ECX	$\frac{X1final i (X) - X2final i (X)}{X1nom i (Y) - X2nom i (Y)}$	8,8e-3*x	-4E-06x <sup>2</sup> + 0,0112x
EBX	$\frac{X1final i (X) - X3final i (X)}{X3nom i (Z) - X1nom i (Z)}$	7,2e-3*x	1E-05x <sup>2</sup> + 0,0005x
EAY	$\frac{Y3final i (Y) - \left( \frac{Y1final i (Y) + Y2final i (Y)}{2} \right)}{\frac{Y1nom i (Z) + Y2nom i (Z)}{2} - Y3nom i (Z)}$	-0,0275*y	4E-06y <sup>2</sup> - 0,0295y
ECY	$\frac{Y2final i (Y) - Y1final i (Y)}{Y2(Xp) - Y1(Xp)}$	0,0014*y	9E-06y <sup>2</sup> - 0,0024y
EBZ	$\frac{Z1final i (Z) - Z2final i (Z)}{Z2(Xp) - Z1(Xp)}$	-0,0068*z	-1E-06z <sup>3</sup> + 0,0003z <sup>2</sup> - 0,0313z
EAZ	$\frac{Z3final i (Z) - [(Z1final i (Z) + Z2final i (Z))/2]}{Z3(Yp)}$	-0,006*z	-5E-05z <sup>2</sup> + 0,0067z
EXX	$-Xfinal i (X) - Xnom i (X) + ECX * Xnom i (Y) - EBX * Xnom i (Z)$	-3e-5*x	3E-08x <sup>2</sup> - 4E-05x
EYY	$Y1final i (Y) - Y1nom i (Y) - ECX * Y1nom i (X) + EAY * Y1nom i (Z) + ECX * Y1nom i (Xp) - ECY * Y1(Xp)$	4e-5*y	-9E-08y <sup>2</sup> + 8E-05y
EZZ	$Z1final i (Z) - Z1nom i (Z) - EBX * Z1(Xp) + EBZ * Z1(Xp)$	3e-5*z	-4E-07*(z <sup>2</sup> ) + 0,0001*z
EAX	$\frac{X1corregida i (Y) - X3corregida i (Y)}{X1nom i (Z) - X3nom i (Z)}$	-0,0019*x	-5E-08x <sup>3</sup> + 5E-05x <sup>2</sup> - 0,0165x
EBY	$\frac{\left( \frac{Y1corregida i (X) + Y2corregida i (X)}{2} \right) - Y3corregida i (X)}{\left( \frac{Y1nom i (Z) + Y2nom i (Z)}{2} \right) - Y3nom i (Z)}$	-0,0069*y	-8E-06y <sup>2</sup> - 0,0038y
ECZ	$\frac{Z1corregida i (Y) - Z2corregida i (Y)}{Z1nom i (X) - Z2nom i (X)}$	-	-
EZX	$Xnom i (Z) - Xfinal i (Z) - EBX * Xnom i (X) - EAX * Xnom i (Y)$	5e-5*x	2E-10x <sup>3</sup> - 1E-07x <sup>2</sup> + 3E-05x
EYX	$Xnom i (Y) - Xfinal i (Y) + ECX * Xnom i (X) + EAX * Xnom i (Z) - EAY * Xnom i (Z)$	5e-5*x	-7E-08x <sup>2</sup> + 3E-05x
EZY	$Y3final i (Z) - Y3nom i (Z) + EBX * Y3nom i (X) + EAX * Y3nom i (Y)$	4e-5*y	-4E-10y <sup>3</sup> + 3E-07y <sup>2</sup> - 6E-05y
EXY	$Y3final i (X) - Y3nom i (X) - ECX * Y3nom i (Y) + EBX * Y3nom i (Z) - EBY * Y3nom i (Z)$	-6e-5*y	-1E-10y <sup>3</sup> + 1E-07y <sup>2</sup> - 2E-05y
EXZ	$Z3final i (X) - Z3nom i (X) - ECX * Z3nom i (Y) + EBX * Z3nom i (Z) - EBY * Z3nom i (Z) - ECX * Z3(Yp) + ECY * Z3(Yp) + ECZ * Z3(Yp)$	4e-5	5E-09z <sup>3</sup> - 1E-06z <sup>2</sup> + 0,0001z

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

EYZ	$\begin{aligned} Z1final i(Y) - Z1nom i(Y) - ECX \cdot Z1nom i(X) - EAX \\ \cdot Z1nom i(Z) + EAY \cdot Z1nom i(Z) + ECX \\ \cdot Z1(Xp) - ECY \cdot Z1(Xp) - ECZ \cdot Z1(Xp) \end{aligned}$	-2e-5*z	1E-07x2 - 3E-05x
-----	---	---------	------------------

## **Anexo 7. Tablas resultantes del segundo método de Verificación geométrica.**

Este segundo método de verificación geométrica descrito anteriormente en el capítulo 6 de este trabajo se basa en el análisis de la tesis de Acosta [3]. Para la obtención de las fórmulas de los errores se parte de la fórmula general de desplazamiento final y se caracteriza en función del error que se quiere medir. El procedimiento para obtener la fórmula para el cálculo de cada error se describe en el anexo 6, así como las series de puntos necesarias para la formulación. En las siguientes tablas en primer lugar se pueden encontrar la numeración de los puntos utilizados en cada caso. La numeración va acompañada de un código de colores que se indica en la tabla para saber con qué serie de puntos se corresponden. Si los puntos son originarios de una serie a la que posteriormente se le ha aplicado un offset se indicará junto al punto a que serie resultante pertenecerán los valores de las coordenadas. Junto a la numeración se encuentran los valores de las coordenadas nominales de los puntos en los tres ejes lineales de la máquina herramienta. Si para la obtención de las series se ha aplicado un offset los valores nominales quedan sustituidos por los valores nominales más el del offset, de esta manera en los cálculos solo influirá el valor del error. A continuación se encuentran los valores reales de las coordenadas del punto en los tres ejes que se han obtenido en la simulación con Matlab. En el cálculo de algunos errores influyen otro tipo de errores, en las siguientes columnas de la tabla se incluirán si es necesario el valor de los errores que afectan. El valor de los errores que afectan se obtiene de aplicar la función obtenida de los cálculos que anteriores al error que se está calculando junto con la coordenada nominal del eje correspondiente. También se puede encontrar el valor de una coordenada corregida, obtenida como se ha explicado en el anexo 6. Por último se encuentra el valor del error resultante de aplicar la formulación descrita en este trabajo y el valor del error teórico, resultante de aplicar la función teórica del error junto con la coordenada nominal del eje en el que se está estudiando el error. En el anexo 6 se han recopilado, tras el desarrollo de la obtención, las fórmulas que se utilizarán en este método.

### **A7.1. Resultados de los cálculos individuales de los errores geométricos.**

En este caso los valores de las coordenadas reales son los obtenidos de introducir en la simulación únicamente las funciones teóricas de primer grado del error que se está calculando. Los valores de las coordenadas reales de cada serie en los distintos errores tienen unos valores diferentes por este motivo. Para el cálculo de cada error puede resultar necesario realizar más de una simulación en el caso de que alguna de las series lleve un offset.

Tabla 61. ECX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	ECX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3	3	42	0	0,02640
218	15	3	42	15	3	42	0,15626	0,13200
219	60	3	42	60	2,9998	42	0,54691	0,52800
220	120	3	42	120	2,9994	42	1,09383	1,05600
221	180	3	42	180	2,9986	42	1,64074	1,58400
222	240	3	42	240	2,9975	42	2,10953	2,11200
223	285	3	42	285	2,9965	42	2,50018	2,50800
224	297	3	42	297	2,9962	42	2,65644	2,61360
238	3	267	42	3	267	42		
237	15	267	42	15,0002	267	42		
236	60	267	42	60,0007	266,9998	42		
235	120	267	42	120,0014	266,9994	42	X1	
234	180	267	42	180,0021	266,9986	42		
233	240	267	42	240,0027	266,9975	42	X2	
232	285	267	42	285,0032	266,9965	42		
231	297	267	42	297,0034	266,9962	42		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 62. EBX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EBX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3	3	42	0	0,02160
218	15	3	42	15	3	42	0,22420	0,10800
219	60	3	42	59,9999	3	42,0001	0,44840	0,43200
220	120	3	42	119,9998	3	42,0005	0,89680	0,86400
221	180	3	42	179,9997	3	42,0011	1,12100	1,29600
222	240	3	42	239,9996	3	42,002	1,56941	1,72800
223	285	3	42	284,9996	3	42,0028	2,01781	2,05200
224	297	3	42	296,9996	3	42,0031	2,24201	2,13840
273	3	3	134	3	3	134	X1	X3
274	15	3	134	14,9999	3	134		
275	60	3	134	59,9997	3	134,0001		
276	120	3	134	119,9994	3	134,0005		
277	180	3	134	179,9992	3	134,0011		
278	240	3	134	239,9989	3	134,002	X1	X3
279	285	3	134	284,9987	3	134,0028		
280	297	3	134	296,9986	3	134,0031		

Tabla 63. EAY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAY (arcsec)	EAY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1 193	60	90	133,01	60	90,0016	133,01	-2,75020	-2,475
Y1 200	60	180	133,01	60	180,0032	133,01	-4,81285	-4,95
Y1 481	60	0	133,01	60	0	133,01	0	0
Y2 193	240	90	133,01	240	90,0016	133,01	X1	X3
Y2 200	240	180	133,01	240	180,0032	133,01		
Y2 481	240	0	133,01	240	0	133,01		
Y3 193	150	90	163,01	150	90,002	163,01	X1	X3
Y3 200	150	180	163,01	150	180,0039	163,01		
Y3 481	150	0	163,01	150	0	163,01		

Tabla 64. ECY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECY (arcsec)	ECY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1 193	60	90	133,01	60	89,9999	133,01	0,22918	0,126
Y1 200	60	180	133,01	60	179,9999	133,01	0,22918	0,252
Y1 481	60	0	133,01	60	0	133,01	0	0
Y2 193	240	90	133,01	240	90,0001	133,01		
Y2 200	240	180	133,01	240	180,0001	133,01		
Y2 481	240	0	133,01	240	0	133,01		

Tabla 65. EBZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBZ (arcsec)	EBZ teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Z1 304	180	5	45	180	5	45,0001	-0,34377	-0,30600
Z1 332	180	5	91	180	5	91,0002	-0,68755	-0,61880
Z1 360	180	5	137	180	5	137,0003	-1,03132	-0,93160
Z1 4	180	5	178,01	180	5	178,0104	-1,37510	-1,21047
Z1 482	180	5	0	180	5	0	0	0
Z2 304	60	5	45	60	5	44,9999		
Z2 332	60	5	91	60	5	90,9998		
Z2 360	60	5	137	60	5	136,9997		
Z2 4	60	5	178,01	60	5	178,0096		
Z2 482	60	5	0	60	5	0		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 66. EAZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAZ (arcsec)	EAZ teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Z1 304	180	5	45	180	5	45	-0,23800	-0,27000
Z1 332	180	5	91	180	5	91	-0,55533	-0,36400
Z1 360	180	5	137	180	5	137	-0,79333	-0,54800
Z1 4	180	5	178,01	180	5	178,01	-1,03132	-0,71204
Z1 482	180	5	0	180	5	0	0	0
Z2 304	60	5	45	60	5	45		
Z2 332	60	5	91	60	5	91		
Z2 360	60	5	137	60	5	137		
Z2 4	60	5	178,01	60	5	178,01		
Z2 482	120	5	0	60	5	0		
Z3 304	120	265	45	120	265	44,9997		
Z3 332	120	265	91	120	265	90,9993		
Z3 360	120	265	137	120	265	136,999		
Z3 4	120	265	178,01	120	265	178,0087		
Z3 482	120	265	0	120	265	0		

Tabla 67. EXX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EXX (mm)	EXX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3,0001	3	42	1,294E-07	1,018E-07	-0,00010	-0,00009
218	15	3	42	15,0005	3	42	6,472E-07	5,091E-07	-0,00052	-0,00045
219	60	3	42	60,0018	3	42	2,589E-06	2,036E-06	-0,00188	-0,0018
220	120	3	42	120,0036	3	42	5,178E-06	4,072E-06	-0,00376	-0,0036
221	180	3	42	180,0054	3	42	7,767E-06	6,109E-06	-0,00563	-0,0054
222	240	3	42	240,0072	3	42	1,036E-05	8,145E-06	-0,00751	-0,0072
223	285	3	42	285,0086	3	42	1,230E-05	9,672E-06	-0,00897	-0,00855
224	297	3	42	297,0089	3	42	1,282E-05	1,008E-05	-0,00928	-0,00891

X1

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 68. EYY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	EYY (mm)	EYY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	60	90	133,01	60	90,0036	133,01	2,589E-06	-1,200E-05	6,545E-07	0,00167	0,0036
200	60	180	133,01	60	180,0072	133,01	2,589E-06	-2,400E-05	1,309E-06	0,00374	0,0072
481	60	0	133,01	60	0	133,01	2,589E-06	0	0	-0,00039	0

Y1

Tabla 69. EZZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EBZ (arcsec)	EZ (mm)	EZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
304	180	5	45	180	5	45,0014	6,109E-06	-1,658E-06	0,00093	0,00135
332	180	5	91	180	5	91,0027	6,109E-06	-3,353E-06	0,00213	0,00273
360	180	5	137	180	5	137,0041	6,109E-06	-5,048E-06	0,00343	0,00411
4	180	5	178,01	180	5	178,0153	6,109E-06	-6,559E-06	0,00454	0,00534
482	180	5	0	180,0033	4,9933	-0,00503	6,109E-06	0	-0,00540	0

Z1

Tabla 70. EAX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	Xcorregida (mm)	EAX (arcsec)	EAX teórica (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
217	3	3	42	3	3	42	1,294E-07	-3,9997E-07	-1,7187E-05	-0,08250	-0,0057
218	15	3	42	15	3	42	6,472E-07	-3,9997E-07	-2,6507E-05	-0,08250	-0,0285
219	60	3	42	60	3	42	2,589E-06	-3,9997E-07	-0,00017	-0,30670	-0,114
220	120	3	42	120	3	42	5,178E-06	-3,9997E-07	-0,00064	-0,30670	-0,228
221	180	3	42	180	2,9999	42	7,767E-06	-3,9997E-07	-0,00151	-0,30670	-0,342
222	240	3	42	240	2,9999	42	1,036E-05	-3,9997E-07	-0,00260	-0,53090	-0,456
223	285	3	42	285	2,9999	42	1,230E-05	-3,9997E-07	-0,00362	-0,75510	-0,5415
224	297	3	42	297	2,9999	42	1,282E-05	-3,9997E-07	-0,00392	-0,75510	-0,5643
273	3	3	134	3	3	134	1,294E-07	-3,9997E-07	-0,00005		
274	15	3	134	15	3	134	6,472E-07	-3,9997E-07	-0,00006		
275	60	3	134	60	2,9999	134	2,589E-06	-3,9997E-07	-0,00031		
276	120	3	134	120	2,9999	134	5,178E-06	-3,9997E-07	-0,00077		
277	180	3	134	180	2,9998	134	7,767E-06	-3,9997E-07	-0,00165		
278	240	3	134	240	2,9997	134	1,036E-05	-3,9997E-07	-0,00284		
279	285	3	134	285	2,9996	134	1,230E-05	-3,9997E-07	-0,00396		
280	297	3	134	297	2,9996	134	1,282E-05	-3,9997E-07	-0,00426		

X1

X3

Tabla 71. EBY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	Y corregida (mm)	EBY (arcsec)	EBY teórico (arcsec)	
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)						
Y1	193	60	90	133,01	59,9996	90	133,0097	2,589E-06	3,054E-06	-0,00023	-0,05755	-0,621
Y1	200	60	180	133,01	59,9992	180	133,0095	2,589E-06	6,109E-06	-0,00045	-0,11510	-1,242
Y1	481	60	0	133,01	60	0	133,01	2,589E-06	0	0	0	0
Y2	193	240	90	133,01	239,9996	90	133,0103	1,036E-05	3,054E-06	-0,00093		
Y2	200	240	180	133,01	239,9992	180	133,0105	1,036E-05	6,109E-06	-0,00185		
Y2	481	240	0	133,01	240	0	133,01	1,036E-05	0	0		
Y3	193	150	90	163,01	149,9995	90	163,01	6,472E-06	3,054E-06	-0,00058		
Y3	200	150	180	163,01	149,999	180	163,01	6,472E-06	6,109E-06	-0,00117		
Y3	481	150	0	163,01	150	0	163,01	6,472E-06	0	0		

Tabla 72. EZX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EAX (arcsec)	EZX (mm)	EZX teórica (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3	3	41,9999	1,018E-07	-3,491E-08	9,9799E-05	0,00015
218	15	3	42	15	3	41,9993	5,091E-07	-1,745E-07	0,00069	0,00075
219	60	3	42	60	3	41,997	2,036E-06	-6,981E-07	0,00288	0,003
220	120	3	42	120	3	41,994	4,072E-06	-1,396E-06	0,00552	0,006
221	180	3	42	180	3	41,991	6,109E-06	-2,094E-06	0,00791	0,009
222	240	3	42	240	3	41,988	8,145E-06	-2,793E-06	0,01005	0,012
223	285	3	42	285	3	41,9858	9,672E-06	-3,316E-06	0,01145	0,01425
224	297	3	42	297	3	41,9851	1,008E-05	-3,456E-06	0,01192	0,01485

Tabla 73. EYX sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	EYX (mm)	EYX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
273	3	3	134	3	2,9998	134	1,294E-07	-3,491E-08	-4,000E-07	0,00025	0,00015
274	15	3	134	15	2,9993	134	6,472E-07	-1,745E-07	-4,000E-07	0,00074	0,00075
275	60	3	134	60	2,997	134	2,589E-06	-6,981E-07	-4,000E-07	0,00312	0,003
276	120	3	134	120	2,994	134	5,178E-06	-1,396E-06	-4,000E-07	0,00649	0,006
277	180	3	134	180	2,991	134	7,767E-06	-2,094E-06	-4,000E-07	0,01017	0,009
278	240	3	134	240	2,988	134	1,036E-05	-2,793E-06	-4,000E-07	0,01416	0,012
279	285	3	134	285	2,9857	134	1,230E-05	-3,316E-06	-4,000E-07	0,01741	0,01425
280	297	3	134	297	2,9852	134	1,282E-05	-3,456E-06	-4,000E-07	0,01820	0,01485

X3

Tabla 74. EZY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EAX (arcsec)	EZY (mm)	EZY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
193	150	90	163,01	150	90	163,0136	5,091E-06	-1,745E-06	0,00421	0,0036
200	150	180	163,01	150	180	163,0172	5,091E-06	-1,745E-06	0,00765	0,0072
481	150	0	163,01	150	0	163,01	5,091E-06	-1,745E-06	0,00076	0

Y3

Tabla 75. EXY sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	EXY (mm)	EXY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	150	90	163,01	149,9946	90	163,01	6,472E-06	5,091E-06	-3,011E-06	-0,00466	-0,0054
200	150	180	163,01	149,9892	180	163,01	6,472E-06	5,091E-06	-6,021E-06	-0,01015	-0,0108
481	150	0	163,01	150	0	163,01	6,472E-06	5,091E-06	0	0,00083	0

Y3

Tabla 76. EXZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EXZ (mm)	EXZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)							
304	120	265	45	120,0018	265	45	5,178E-06	4,072E-06	8,865E-06	1,927E-06	0	0,00016	0,0018
332	120	265	91	120,0036	265	91	5,178E-06	4,072E-06	8,865E-06	1,927E-06	0	0,00256	0,00364
360	120	265	137	120,0055	265	137	5,178E-06	4,072E-06	8,865E-06	1,927E-06	0	0,00506	0,00548
4	120	265	178,01	120,0071	265	178,01	5,178E-06	4,072E-06	8,865E-06	1,927E-06	0	0,00719	0,00712
482	120	265	0	120	265	0	5,178E-06	4,072E-06	8,865E-06	1,927E-06	0	-0,00222	0

Z3

Tabla 77. EYZ sin la influencia del resto de errores geométricos con la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EYZ (mm)	EYZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)							
304	180	5	45	180	4,9991	45	7,767E-06	2,094E-06	6,666E-07	3,636E-08	0	0,00177	-0,0009
332	180	5	91	180	4,9982	91	7,767E-06	2,094E-06	6,666E-07	3,636E-08	0	0,00260	0,00182
360	180	5	137	180	4,9973	137	7,767E-06	2,094E-06	6,666E-07	3,636E-08	0	0,00344	0,00274
4	180	5	178,01	180	4,9964	178,01	7,767E-06	2,094E-06	6,666E-07	3,636E-08	0	0,00428	0,00356
482	180	5	0	180	5	0	7,767E-06	2,094E-06	6,666E-07	3,636E-08	0	0,00093	0

Z1

Tras analizar los resultados obtenidos se puede determinar que el método es válido. Para todos los errores el valor obtenido por formulación tiene una proximidad aceptable al del error teórico, excepto para EBY en el cual se aprecia una gran diferencia. En los errores EAZ, EYY, EAX se puede encontrar una diferencia más elevada pero aún así se considera aceptable.

## A7.2. Resultados de los cálculos de los errores geométricos con la influencia de todos los errores geométricos.

En este caso para el cálculo de las coordenadas reales en la simulación se han introducido las funciones correspondientes a todos los errores de los ejes lineales de movimiento lineal y de movimiento angular de la máquina herramienta, de esta forma en los valores de las coordenadas reales se reflejará la influencia de todos los errores. Las funciones introducidas en la simulación son de primer grado. Para cada offset distinto que sea necesario introducir por las distintas series se realizará una simulación que se usará para todos los errores. El valor que aparece del error corresponde a la aplicación de la formulación desarrollada en este trabajo junto a la eliminación de la influencia de todos los errores. En algunas tablas se pueden observar unas filas de puntos subrayadas en color naranja, concretamente las de los puntos 481 y 482. Estas filas no forman parte de la serie original de puntos y son los puntos teóricos utilizados para eliminar la influencia del resto de errores en el cálculo.

Tabla 78. ECX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	
217	3	3	42	3,0016	2,9991	42,0012	0
218	15	3	42	15,0019	2,9985	42,0006	0,1563
219	60	3	42	60,0032	2,9961	41,9985	0,5469
220	120	3	42	120,0049	2,9926	41,9959	1,0938
221	180	3	42	180,0067	2,9888	41,9935	1,5626
222	240	3	42	240,0084	2,9847	41,9914	2,1095
223	285	3	42	285,0097	2,9815	41,99	2,5002
224	297	3	42	297,01	2,9806	41,9896	2,5783
238	3	267	42	2,9854	267,0112	42,0118	X1
237	15	267	42	14,9859	267,0106	42,0112	
236	60	267	42	59,9877	267,0082	42,0092	
235	120	267	42	119,9901	267,0047	42,0067	
234	180	267	42	179,9925	267,0009	42,0045	X2
233	240	267	42	239,9949	266,9968	42,0025	
232	285	267	42	284,9967	266,9935	42,0012	
231	297	267	42	296,9971	266,9926	42,0009	

X1

X2

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 79. EBX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EBX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3,0016	2,9991	42,0012	0	0,0216
218	15	3	42	15,0019	2,9985	42,0006	-9,9476E-13	0,108
219	60	3	42	60,0032	2,9961	41,9985	0,2242	0,432
220	120	3	42	120,0049	2,9926	41,9959	0,6726	0,864
221	180	3	42	180,0067	2,9888	41,9935	1,3452	1,296
222	240	3	42	240,0084	2,9847	41,9914	1,5694	1,728
223	285	3	42	285,0097	2,9815	41,99	2,0178	2,052
224	297	3	42	297,01	2,9806	41,9896	2,0178	2,1384
273	3	3	134	3,0052	2,9973	134,004	X1	X3
274	15	3	134	15,0055	2,9967	134,0034		
275	60	3	134	60,0067	2,9943	134,0013		
276	120	3	134	120,0082	2,9907	133,9986		
277	180	3	134	180,0097	2,9869	133,9963		
278	240	3	134	240,0113	2,9827	133,9942		
279	285	3	134	285,0124	2,9794	133,9927		
280	297	3	134	297,0127	2,9785	133,9924		

Tabla 80. EAY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAY (arcsec)	EAY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1 193	60	90	133,01	60,0053	89,9937	133,0107	-2,3995	-2,475
Y1 200	60	180	133,01	60	179,9988	133,0141	-5,1497	-4,95
Y1 481	60	0	133,01	60,0105	-0,01147	133,0072	-0,6944	0
Y2 193	240	90	133,01	240,0053	89,9926	133,0131		
Y2 200	240	180	133,01	240	179,9979	133,0171		
Y2 481	240	0	133,01	240,0105	-0,012622	133,0091		
Y3 193	150	90	163,01	150,0049	89,9936	163,0119		
Y3 200	150	180	163,01	149,9995	179,9992	163,0156		
Y3 481	150	0	163,01	150,0102	-0,011945	163,0082		

Tabla 81. ECY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECY (arcsec)	ECY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1	193	60	90	133,01	60,0053	89,9937	133,0107	0,0596
Y1	200	60	180	133,01	60	179,9988	133,0141	0,2888
Y1	481	60	0	133,01	60,0105	-0,01147	133,0072	-1,3201
Y2	193	240	90	133,01	240,0053	89,9926	133,0131	
Y2	200	240	180	133,01	240	179,9979	133,0171	
Y2	481	240	0	133,01	240,0105	-0,012622	133,0091	

Tabla 82. EBZ con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBZ (arcsec)	EBZ teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Z1	304	180	5	45	180,0049	4,9924	44,9964	-0,30458
Z1	332	180	5	91	180,0066	4,9914	90,9979	-0,64836
Z1	360	180	5	137	180,0082	4,9905	136,9994	-0,99213
Z1	4	180	5	178,01	180,0097	4,9896	178,0107	-1,33591
Z1	482	180	5	0	180,0033	4,9933	-0,0050304	-0,89863
Z2	304	60	5	45	60,0049	4,993	44,9957	
Z2	332	60	5	91	60,0066	4,992	90,997	
Z2	360	60	5	137	60,0082	4,9911	136,9983	
Z2	4	60	5	178,01	60,0097	4,9903	178,0094	
Z2	482	120	5	0	60,0033	4,9939	-0,0055532	

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 83. EAZ con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAZ (arcsec)	EAZ teórico (arcsec)	
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)			
Z1	304	180	5	45	180,0049	4,9924	44,9964	-0,28885	-0,27
Z1	332	180	5	91	180,0066	4,9914	90,9979	-0,52685	-0,364
Z1	360	180	5	137	180,0082	4,9905	136,9994	-0,84418	-0,548
Z1	4	180	5	178,01	180,0097	4,9896	178,0107	-1,08218	-0,71204
Z1	482	180	5	0	180,0033	4,9933	-0,0050304	0,09052	0
Z2	304	60	5	45	60,0049	4,993	44,9957		
Z2	332	60	5	91	60,0066	4,992	90,997		
Z2	360	60	5	137	60,0082	4,9911	136,9983		
Z2	4	60	5	178,01	60,0097	4,9903	178,0094		
Z2	482	120	5	0	60,0033	4,9939	-0,0055532		
Z3	304	120	265	45	120,0063	264,9927	44,9958		
Z3	332	120	265	91	120,0079	264,9917	90,9969		
Z3	360	120	265	137	120,0095	264,9908	136,9979		
Z3	4	120	265	178,01	120,011	264,9899	178,0088		
Z3	482	120	265	0	120,0046	264,9936	-0,0051777		

Tabla 84. EXX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EXX (mm)	EXX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3,0016	2,9991	42,0012	1,280E-07	9,890E-08	0	-0,00009
218	15	3	42	15,0019	2,9985	42,0006	6,400E-07	4,945E-07	-0,00032	-0,00045
219	60	3	42	60,0032	2,9961	41,9985	2,560E-06	1,978E-06	-0,00167	-0,0018
220	120	3	42	120,0049	2,9926	41,9959	5,120E-06	3,956E-06	-0,00345	-0,0036
221	180	3	42	180,0067	2,9888	41,9935	7,679E-06	5,934E-06	-0,00532	-0,0054
222	240	3	42	240,0084	2,9847	41,9914	1,024E-05	7,912E-06	-0,00710	-0,0072
223	285	3	42	285,0097	2,9815	41,99	1,216E-05	9,396E-06	-0,00845	-0,00855
224	297	3	42	297,01	2,9806	41,9896	1,267E-05	9,791E-06	-0,00877	-0,00891

X1

Tabla 85. EYY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	EYY (mm)	EYY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	60	90	133,01	60,0053	89,9937	133,0107	2,560E-06	-1,230E-05	6,109E-07	0,00359	0,0036
200	60	180	133,01	60	179,9988	133,0141	2,560E-06	-2,461E-05	1,222E-06	0,00711	0,0072
481	60	0	133,01	60,0105	-0,01147	133,0072	2,560E-06	0	0	-0,01185	0

Y1

Tabla 86. EZZ con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EBZ (arcsec)	EZ (mm)	EZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
304	180	5	45	180,0049	4,9924	44,9964	5,934E-06	-1,593E-06	0,00135	0,00135
332	180	5	91	180,0066	4,9914	90,9979	6,196E-06	-3,221E-06	0,00274	0,00273
360	180	5	137	180,0082	4,9905	136,9994	6,196E-06	-4,849E-06	0,00414	0,00411
4	180	5	178,01	180,0097	4,9896	178,0107	6,196E-06	-6,300E-06	0,00535	0,0053403
482	180	5	0	180,0033	4,9933	-0,0050304	6,196E-06	0	-0,00540	0

Z1

Tabla 87. EAX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	Xcorregida (mm)	EAX (arcsec)	EAX teórica (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
217	3	3	42	3,0016	2,9991	42,0012	1,280E-07	-4,102E-07	-0,00092	0	-0,0057
218	15	3	42	15,0019	2,9985	42,0006	6,400E-07	-4,102E-07	-0,00153	0	-0,0285
219	60	3	42	60,0032	2,9961	41,9985	2,560E-06	-4,102E-07	-0,00407	-9,9654E-13	-0,114
220	120	3	42	120,0049	2,9926	41,9959	5,120E-06	-4,102E-07	-0,00803	-0,2242	-0,228
221	180	3	42	180,0067	2,9888	41,9935	7,679E-06	-4,102E-07	-0,01260	-0,2242	-0,342
222	240	3	42	240,0084	2,9847	41,9914	1,024E-05	-4,102E-07	-0,01777	-0,4484	-0,456
223	285	3	42	285,0097	2,9815	41,99	1,216E-05	-4,102E-07	-0,02198	-0,6726	-0,5415
224	297	3	42	297,01	2,9806	41,9896	1,267E-05	-4,102E-07	-0,02318	-0,6726	-0,5643
273	3	3	134	3,0052	2,9973	134,004	1,280E-07	-4,102E-07	-0,00276	X1	X3
274	15	3	134	15,0055	2,9967	134,0034	6,400E-07	-4,102E-07	-0,00336		
275	60	3	134	60,0067	2,9943	134,0013	2,560E-06	-4,102E-07	-0,00591		
276	120	3	134	120,0082	2,9907	133,9986	5,120E-06	-4,102E-07	-0,00997		
277	180	3	134	180,0097	2,9869	133,9963	7,679E-06	-4,102E-07	-0,01454	X1	X3
278	240	3	134	240,0113	2,9827	133,9942	1,024E-05	-4,102E-07	-0,01981		
279	285	3	134	285,0124	2,9794	133,9927	1,216E-05	-4,102E-07	-0,02412		
280	297	3	134	297,0127	2,9785	133,9924	1,267E-05	-4,102E-07	-0,02532		

Tabla 88. EBY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	Ycorregida (mm)	EBY (arcsec)	EBY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
Y1 193	60	90	133,01	60,0053	89,9937	133,0107	2,560E-06	2,967E-06	0,00546	-0,07555	-0,621
Y1 200	60	180	133,01	60	179,9988	133,0141	2,560E-06	5,934E-06	0,00033	-0,15110	-1,242
Y1 481	60	0	133,01	60,0105	-0,01147	133,0072	2,560E-06	0	0,01050	-2,06265	0
Y2 193	240	90	133,01	240,0053	89,9926	133,0131	1,024E-05	2,967E-06	0,00477		
Y2 200	240	180	133,01	240	179,9979	133,0171	1,024E-05	5,934E-06	-0,00105		
Y2 481	240	0	133,01	240,0105	-0,012622	133,0091	1,024E-05	0	0,01050		
Y3 193	150	90	163,01	150,0049	89,9936	163,0119	6,400E-06	2,967E-06	0,00481		
Y3 200	150	180	163,01	149,9995	179,9992	163,0156	6,400E-06	5,934E-06	-0,00068		
Y3 481	150	0	163,01	150,0102	-0,011945	163,0082	6,400E-06	0	0,01020		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 89. EZX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX	EAX	EZX (mm)	EZX teórica (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3,0016	2,9991	42,0012	9,890E-08	-2,909E-08	0,00000	0,00015
218	15	3	42	15,0019	2,9985	42,0006	4,945E-07	-1,454E-07	0,00059	0,00075
219	60	3	42	60,0032	2,9961	41,9985	1,978E-06	-5,818E-07	0,00258	0,003
220	120	3	42	120,0049	2,9926	41,9959	3,956E-06	-1,164E-06	0,00483	0,006
221	180	3	42	180,0067	2,9888	41,9935	5,934E-06	-1,745E-06	0,00664	0,009
222	240	3	42	240,0084	2,9847	41,9914	7,912E-06	-2,327E-06	0,00791	0,012
223	285	3	42	285,0097	2,9815	41,99	9,396E-06	-2,763E-06	0,00853	0,01425
224	297	3	42	297,01	2,9806	41,9896	9,791E-06	-2,880E-06	0,00870	0,01485

X1

Tabla 90. EYX con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	EYX (mm)	EYX teórica (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
273	3	3	134	3,0052	2,9973	134,004	1,280E-07	-2,909E-08	-4,102E-07	0,00000	0,00015
274	15	3	134	15,0055	2,9967	134,0034	6,400E-07	-1,018E-07	-4,102E-07	0,00060	0,00075
275	60	3	134	60,0067	2,9943	134,0013	2,560E-06	-4,072E-07	-4,102E-07	0,00310	0,003
276	120	3	134	120,0082	2,9907	133,9986	5,120E-06	-8,145E-07	-4,102E-07	0,00711	0,006
277	180	3	134	180,0097	2,9869	133,9963	7,679E-06	-1,222E-06	-4,102E-07	0,01162	0,009
278	240	3	134	240,0113	2,9827	133,9942	1,024E-05	-1,629E-06	-4,102E-07	0,01684	0,012
279	285	3	134	285,0124	2,9794	133,9927	1,216E-05	-1,934E-06	-4,102E-07	0,02111	0,01425
280	297	3	134	297,0127	2,9785	133,9924	1,267E-05	-2,016E-06	-4,102E-07	0,02230	0,01485

X3

Tabla 91. EZY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EAX (arcsec)	EZY (mm)	EZY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
193	150	90	163,01	150,0049	89,9936	163,0119	4,945E-06	-1,454E-06	0,0036	0,0036
200	150	180	163,01	149,9995	179,9992	163,0156	4,945E-06	-1,454E-06	0,0071	0,0072
481	150	0	163,01	150,0102	-0,011945	163,0082	4,945E-06	-1,454E-06	-0,0011	0

Y3

Tabla 92. EXY con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	EXY (mm)	EXY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	150	90	163,01	150,0049	89,9936	163,0119	6,400E-06	4,945E-06	-3,011E-06	-0,0054	-0,0054
200	150	180	163,01	149,9995	179,9992	163,0156	6,400E-06	4,945E-06	-6,021E-06	-0,0109	-0,0108
481	150	0	163,01	150,0102	-0,011945	163,0082	6,400E-06	4,945E-06	0	0,0110	0

Y3

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 93. EYZ con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales									
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EYZ (mm)	EYZ teórico (mm)
304	180	5	45	180,005	4,9924	44,996	7,679E-06	1,745E-06	6,836E-07	3,394E-08	0	0,00085	-0,0009
332	180	5	91	180,007	4,9914	90,998	7,679E-06	1,745E-06	6,836E-07	3,394E-08	0	0,00180	0,00182
360	180	5	137	180,008	4,9905	136,999	7,679E-06	1,745E-06	6,836E-07	3,394E-08	0	0,00265	0,00274
4	180	5	178,01	180,01	4,9896	178,011	7,679E-06	1,745E-06	6,836E-07	3,394E-08	0	0,00351	0,00356
482	180	5	0	180,003	4,9933	-0,005	7,679E-06	1,745E-06	6,836E-07	3,394E-08	0	0,00762	0

Z1

Tabla 94. EXZ con funciones de primer grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales									
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EXZ (mm)	EXZ teórico (mm)
304	120	265	45	120,006	264,993	44,996	5,120E-06	3,956E-06	8,865E-06	1,799E-06	0	0,0023	0,0018
332	120	265	91	120,008	264,992	90,997	5,120E-06	3,956E-06	8,865E-06	1,799E-06	0	0,0045	0,0036
360	120	265	137	120,009	264,991	136,998	5,120E-06	3,956E-06	8,865E-06	1,799E-06	0	0,0067	0,0055
4	120	265	178,01	120,011	264,99	178,009	5,120E-06	3,956E-06	8,865E-06	1,799E-06	0	0,0087	0,0071
482	120	265	0	120,0045	264,994	-0,0052	5,120E-06	3,956E-06	8,865E-06	1,799E-06	0	0,0024	0

Z3

En el análisis de estos resultados se puede determinar que el método es válido en este caso. Al igual que en caso anterior la proximidad de los errores obtenidos con la formulación resulta cercana al valor teórico que deberían tener, excepto en el error EBY. En los errores EAZ, EZX y EYX se aprecia una mayor diferencia en los valores altos de la coordenada del eje en el que se mide el error aunque se considera que utilizar el método para calcularlos es aceptable.

### A7.3. Resultados del cálculo de los errores geométricos con la influencia de todos los errores geométricos y utilizando funciones de error teóricas de mayor grado.

El procedimiento y la elaboración de las tablas de este apartado coinciden con el apartado anterior. La única diferencia radica en que en la simulación las funciones tienen segundo o tercer grado.

*Tabla 95. ECX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.*

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	ECX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3,0029	2,9991	42,0032	0	0,03356
218	15	3	42	15,0033	2,9987	42,0029	0,23439	0,16710
219	60	3	42	60,005	2,9973	42,0019	0,70318	0,65760
220	120	3	42	120,0071	2,9956	42,0009	1,32822	1,28640
221	180	3	42	180,0089	2,9941	42,0004	1,95327	1,88640
222	240	3	42	240,0105	2,9928	41,9999	2,50018	2,45760
223	285	3	42	285,0116	2,992	41,9996	2,81270	2,86710
224	297	3	42	297,0118	2,9918	41,9995	2,96896	2,97356
238	3	267	42	3,0025	267,0153	42,0012	X1	X2
237	15	267	42	15,0032	267,0149	42,0011		
236	60	267	42	60,0055	267,0135	42,0008		
235	120	267	42	120,0084	267,0118	42,0006		
234	180	267	42	180,011	267,0103	42,0004		
233	240	267	42	240,0133	267,009	42,0001		
232	285	267	42	285,0148	267,0082	41,9998		
231	297	267	42	297,0152	267,008	41,9997		

Tabla 96. EBX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EBX teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
217	3	3	42	3,0029	2,9991	42,0032	0	0,00159
218	15	3	42	15,0033	2,9987	42,0029	-0,22420	0,00975
219	60	3	42	60,005	2,9973	42,0019	-0,22420	0,066
220	120	3	42	120,0071	2,9956	42,0009	0,00000	0,204
221	180	3	42	180,0089	2,9941	42,0004	0,22420	0,414
222	240	3	42	240,0105	2,9928	41,9999	0,44840	0,696
223	285	3	42	285,0116	2,992	41,9996	0,89680	0,95475
224	297	3	42	297,0118	2,9918	41,9995	0,89680	1,03059
273	3	3	134	3,0075	2,998	134,006	X1	X3
274	15	3	134	15,008	2,9975	134,0056		
275	60	3	134	60,0097	2,9958	134,0046		
276	120	3	134	120,0117	2,9939	134,0037		
277	180	3	134	180,0134	2,9922	134,0031		
278	240	3	134	240,0149	2,9909	134,0027		
279	285	3	134	285,0158	2,9901	134,0023		
280	297	3	134	297,016	2,9899	134,0022		

Tabla 97. EAY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAY (arcsec)	EAY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1 193	60	90	133,01	60,0161	90,0016	133,0094	-2,31395	-2,6226
Y1 200	60	180	133,01	60,0166	180,0083	133,0097	-5,40792	-5,1804
Y1 481	60	0	133,01	60,0167	-0,0066345	133,0122	1,28262	0
Y2 193	240	90	133,01	240,0161	90,0001	133,0113		
Y2 200	240	180	133,01	240,0166	180,0067	133,0121		
Y2 481	240	0	133,01	240,0167	-0,008022	133,0137		
Y3 193	150	90	163,01	150,0158	90,001	163,0104		
Y3 200	150	180	163,01	150,0162	180,0081	163,0109		
Y3 481	150	0	163,01	150,0165	-0,0075148	163,013		

Tabla 98. ECY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECY (arcsec)	ECY teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Y1	193	60	90	133,01	60,0161	90,0016	133,0094	-0,12892
Y1	200	60	180	133,01	60,0166	180,0083	133,0097	-0,24351
Y1	481	60	0	133,01	60,0167	-0,0066345	133,0122	-1,58996
Y2	193	240	90	133,01	240,0161	90,0001	133,0113	
Y2	200	240	180	133,01	240,0166	180,0067	133,0121	
Y2	481	240	0	133,01	240,0167	-0,008022	133,0137	

Tabla 99. EBZ con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBZ (arcsec)	EBZ teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Z1	304	180	5	45	180,0072	4,9953	45,0014	-0,97993
Z1	332	180	5	91	180,0088	4,9942	91,0035	-0,97993
Z1	360	180	5	137	180,0119	4,9937	137,004	-1,32370
Z1	4	180	5	178,01	180,0184	4,9935	178,013	-1,66748
Z1	482	180	5	0	180,0043	4,9967	-0,0025819	-0,22328
Z2	304	60	5	45	60,0072	4,996	45,0007	
Z2	332	60	5	91	60,0088	4,995	91,0028	
Z2	360	60	5	137	60,0119	4,9944	137,0031	
Z2	4	60	5	178,01	60,0184	4,9942	178,0119	
Z2	482	120	5	0	60,0043	4,9974	-0,0027118	

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 100. EAZ con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EAZ (arcsec)	EAZ teórico (arcsec)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
Z1 304	180	5	45	180,0072	4,9953	45,0014	0,18933	0,20025
Z1 332	180	5	91	180,0088	4,9942	91,0035	0,18933	0,19565
Z1 360	180	5	137	180,0119	4,9937	137,004	-0,04867	-0,02055
Z1 4	180	5	178,01	180,0184	4,9935	178,013	-0,36600	-0,39171
Z1 482	180	5	0	180,0043	4,9967	-0,0025819	1,19899	0
Z2 304	60	5	45	60,0072	4,996	45,0007		
Z2 332	60	5	91	60,0088	4,995	91,0028		
Z2 360	60	5	137	60,0119	4,9944	137,0031		
Z2 4	60	5	178,01	60,0184	4,9942	178,0119		
Z2 482	120	5	0	60,0043	4,9974	-0,0027118		
Z3 304	120	265	45	120,0088	264,9956	45,0028		
Z3 332	120	265	91	120,0104	264,9946	91,0049		
Z3 360	120	265	137	120,0136	264,994	137,005		
Z3 4	120	265	178,01	120,0201	264,9939	178,0135		
Z3 482	120	265	0	120,0059	264,9971	-0,0011355		

Tabla 101. EXX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EXX (mm)	EXX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3,0029	2,9991	42,0032	1,771E-07	-4,131E-08	0	-0,00012
218	15	3	42	15,0033	2,9987	42,0029	8,785E-07	-1,891E-07	-0,00039	-0,00059
219	60	3	42	60,005	2,9973	42,0019	3,409E-06	-4,945E-07	-0,00207	-0,00229
220	120	3	42	120,0071	2,9956	42,0009	6,539E-06	-2,909E-07	-0,00417	-0,00437
221	180	3	42	180,0089	2,9941	42,0004	9,390E-06	6,109E-07	-0,00600	-0,00623
222	240	3	42	240,0105	2,9928	41,9999	1,196E-05	2,211E-06	-0,00766	-0,00787
223	285	3	42	285,0116	2,992	41,9996	1,371E-05	3,869E-06	-0,00882	-0,00896
224	297	3	42	297,0118	2,9918	41,9995	1,415E-05	4,377E-06	-0,00904	-0,00923

X1

Tabla 102. EYY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	EYY (mm)	EYY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	60	90	133,01	60,0161	90,0016	133,0094	3,409E-06	-1,274E-05	-6,109E-07	0,00648	0,00647
200	60	180	133,01	60,0166	180,0083	133,0097	3,409E-06	-2,548E-05	-1,222E-06	0,01144	0,01148
481	60	0	133,01	60,0167	-0,0066	133,0122	3,409E-06	0	0	-0,0071	0

Y1

Tabla 103. EZZ con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			EBY (arcsec)	EBZ (arcsec)	EZZ (mm)	EZZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
304	180	5	45	180,0072	4,9953	45,0014	6,109E-07	-4,282E-06	0,00373	0,00369
332	180	5	91	180,0088	4,9942	91,0035	6,109E-07	-5,330E-06	0,00576	0,00579
360	180	5	137	180,0119	4,9937	137,004	6,109E-07	-5,824E-06	0,00623	0,00619
4	180	5	178,01	180,0184	4,9935	178,013	6,109E-07	-8,099E-06	0,00510	0,00513
482	180	5	0	180,0043	4,9967	-0,0025819	6,109E-07	0	-0,00262	0

Z1

Tabla 104. EAX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas nominales				Coordenadas reales			EAX teórico (arcsec)				
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ECX (arcsec)	EAY (arcsec)	Xcorregida (mm)	EAX (arcsec)	EAX teórico (arcsec)
217	3	3	42	3,0029	2,9991	42,0032	1,771E-07	-4,247E-07	-0,00092	0	-0,04905
218	15	3	42	15,0033	2,9987	42,0029	8,785E-07	-4,247E-07	-0,00133	-0,22420	-0,23642
219	60	3	42	60,005	2,9973	42,0019	3,409E-06	-4,247E-07	-0,00292	-0,89680	-0,82080
220	120	3	42	120,0071	2,9956	42,0009	6,539E-06	-4,247E-07	-0,00520	-1,34521	-1,34640
221	180	3	42	180,0089	2,9941	42,0004	9,390E-06	-4,247E-07	-0,00761	-1,79361	-1,64160
222	240	3	42	240,0105	2,9928	41,9999	1,196E-05	-4,247E-07	-0,01009	-1,79361	-1,77120
223	285	3	42	285,0116	2,992	41,9996	1,371E-05	-4,247E-07	-0,01192	-1,79361	-1,79871
224	297	3	42	297,0118	2,9918	41,9995	1,415E-05	-4,247E-07	-0,01242	-1,79361	-1,79995
273	3	3	134	3,0075	2,998	134,006	1,771E-07	-4,247E-07	-0,00206		
274	15	3	134	15,008	2,9975	134,0056	8,785E-07	-4,247E-07	-0,00257		
275	60	3	134	60,0097	2,9958	134,0046	3,409E-06	-4,247E-07	-0,00446		X1
276	120	3	134	120,0117	2,9939	134,0037	6,539E-06	-4,247E-07	-0,00694		
277	180	3	134	180,0134	2,9922	134,0031	9,390E-06	-4,247E-07	-0,00955		X3
278	240	3	134	240,0149	2,9909	134,0027	1,196E-05	-4,247E-07	-0,01203		
279	285	3	134	285,0158	2,9901	134,0023	1,371E-05	-4,247E-07	-0,01386		
280	297	3	134	297,016	2,9899	134,0022	1,415E-05	-4,247E-07	-0,01436		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 105. EBY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Coordenadas con offset				Coordenadas reales								
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	Ycorregida (mm)	EBY (arcsec)	EBY teórico (arcsec)	
Y1	193	60	90	133,01	60,0161	90,0016	133,0094	3,409E-06	-4,945E-07	0,01573	-0,88195	-0,4068
Y1	200	60	180	133,01	60,0166	180,0083	133,0097	3,409E-06	-4,945E-07	0,01592	-1,76390	-0,9432
Y1	481	60	0	133,01	60,0167	-0,00663	133,0122	3,409E-06	-4,945E-07	0,01663	-2,07835	0
Y2	193	240	90	133,01	240,0161	90,0001	133,0113	1,196E-05	2,211E-06	0,01532		
Y2	200	240	180	133,01	240,0166	180,0067	133,0121	1,196E-05	2,211E-06	0,01474		
Y2	481	240	0	133,01	240,0167	-0,00802	133,0137	1,196E-05	2,211E-06	0,01699		
Y3	193	150	90	163,01	150,0158	90,001	163,0104	7,999E-06	7,272E-08	0,01509		
Y3	200	150	180	163,01	150,0162	180,0081	163,0109	7,999E-06	7,272E-08	0,01477		
Y3	481	150	0	163,01	150,0165	-0,00751	163,013	7,999E-06	7,272E-08	0,01651		

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 106. EZX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EAX (arcsec)	EZX (mm)	EZX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
217	3	3	42	3,0029	2,9991	42,0032	-4,131E-08	-2,436E-07	0	8,91054E-05
218	15	3	42	15,0033	2,9987	42,0029	-1,891E-07	-1,175E-06	0,00031	0,00043
219	60	3	42	60,005	2,9973	42,0019	-4,945E-07	-4,075E-06	0,00134	0,00148
220	120	3	42	120,0071	2,9956	42,0009	-2,909E-07	-6,593E-06	0,00235	0,00251
221	180	3	42	180,0089	2,9941	42,0004	6,109E-07	-7,742E-06	0,00271	0,00333
222	240	3	42	240,0105	2,9928	41,9999	2,211E-06	-7,712E-06	0,00279	0,00420
223	285	3	42	285,0116	2,992	41,9996	3,869E-06	-7,028E-06	0,00252	0,00506
224	297	3	42	297,0118	2,9918	41,9995	4,377E-06	-6,762E-06	0,00242	0,00533

X1

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 107. EYX con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	EYX (mm)	EYX teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
273	3	3	134	3,0075	2,998	134,006	1,771E-07	-2,436E-07	-4,247E-07	0	0,00009
274	15	3	134	15,008	2,9975	134,0056	8,785E-07	-1,175E-06	-4,247E-07	0,00039	0,00043
275	60	3	134	60,0097	2,9958	134,0046	3,409E-06	-4,075E-06	-4,247E-07	0,00189	0,00155
276	120	3	134	120,0117	2,9939	134,0037	6,539E-06	-6,593E-06	-4,247E-07	0,00403	0,00259
277	180	3	134	180,0134	2,9922	134,0031	9,390E-06	-7,742E-06	-4,247E-07	0,00648	0,00313
278	240	3	134	240,0149	2,9909	134,0027	1,196E-05	-7,712E-06	-4,247E-07	0,00897	0,00317
279	285	3	134	285,0158	2,9901	134,0023	1,371E-05	-7,028E-06	-4,247E-07	0,01090	0,00286
280	297	3	134	297,016	2,9899	134,0022	1,415E-05	-6,762E-06	-4,247E-07	0,01143	0,00274

X3

Tabla 108. EZY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			EBX (arcsec)	EAX (arcsec)	EZY (mm)	EZY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
193	150	90	163,01	150,0158	90,001	163,0104	7,272E-08	-7,327E-06	-0,00326	-0,00326
200	150	180	163,01	150,0162	180,0081	163,0109	7,272E-08	-7,327E-06	-0,00342	-0,00341
481	150	0	163,01	150,0165	-0,00751	163,013	7,272E-08	-7,327E-06	0,00301	0

Y3

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 109. EXY con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas nominales			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	EXY (mm)	EXY teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
193	150	90	163,01	150,0158	90,001	163,0104	7,999E-06	7,272E-08	-1,972E-06	-0,00110	-0,00106
200	150	180	163,01	150,0162	180,0081	163,0109	7,999E-06	7,272E-08	-4,573E-06	-0,00099	-0,00094
481	150	0	163,01	150,0165	-0,00751	163,013	7,999E-06	7,272E-08	0	0,01651	0

Y3

Tabla 110. EXZ con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales			ECX (arcsec)	EBX (arcsec)	EBY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EXZ (mm)	EXZ teórico (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)							
304	120	265	45	120,0088	264,996	45,0028	6,539E-06	-	-	-	0	0,00323	0,00293
332	120	265	91	120,0104	264,995	91,0049	6,539E-06	-	-	-	0	0,00517	0,00459
360	120	265	137	120,0136	264,994	137,005	6,539E-06	-	-	-	0	0,00870	0,00779
4	120	265	178,01	120,0201	264,994	178,0135	6,539E-06	-	-	-	0	0,01550	0,01432
482	120	265	0	120,0059	264,99	-0,0011	6,539E-06	-	-	-	0	0,00200	0

Z3

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

Tabla 111. EYZ con funciones de mayor grado con la influencia del resto de errores geométricos y la aplicación del segundo método de verificación geométrica.

Punto	Coordenadas con offset			Coordenadas reales									
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ECX (arcsec)	EAX (arcsec)	EAY (arcsec)	ECY (arcsec)	ECZ (arcsec)	EYZ (mm)	EYZ teórico (mm)
304	180	5	45	180,0072	4,9953	45,0014	9,390E-06	7,742E-06	7,078E-07	3,394E-08	0	0,00108	0,00115
332	180	5	91	180,0088	4,9942	91,0035	9,390E-06	7,742E-06	7,078E-07	3,394E-08	0	0,00186	0,00190
360	180	5	137	180,0119	4,9937	137,004	9,390E-06	7,742E-06	7,078E-07	3,394E-08	0	0,00204	0,00223
4	180	5	178,01	180,0184	4,9935	178,013	9,390E-06	7,742E-06	7,078E-07	3,394E-08	0	0,00195	0,00217
482	180	5	0	180,0043	4,9967	-0,0026	9,390E-06	7,742E-06	7,078E-07	3,394E-08	0	0,00442	0

Z1

Con este último ensayo se puede determinar que el segundo método de verificación geométrica es válido para el cálculo de todos los errores tras ser probado en ensayos de distintas características. En este último ensayo los resultados de los errores calculados mediante formulación son próximos al teórico, excepto para EBY. En los errores que podemos encontrar más diferencia es en los cálculos de EBX, EZX Y EYX en los que se aprecia diferencia en los valores mayores de X, aún así se considera una diferencia aceptable.

#### **A7.4. Tabla comparativa de los resultados de los cálculos de los errores geométricos utilizando funciones de error teóricas de primer grado dependiendo del modelo utilizado en la simulación.**

El objetivo de este apartado como se presenta en el capítulo 6 de este trabajo es realizar los cálculos de los errores utilizando las coordenadas reales de la simulación cuando esta se realiza utilizando dos modelos distintos. En este caso las funciones teóricas utilizadas en la simulación son de primer grado. En la siguiente tabla se incluyen los distintos valores obtenidos de cada error en los distintos puntos de los que se muestra su coordenada representativa, del eje de la dirección de movimiento, utilizando para la obtención de las coordenadas reales en la simulación el modelo básico o el modelo simplificado de la cadena cinemática de la máquina herramienta. Para realizar la comparación se ha introducido una columna denominada diferencia. En ella se realiza la diferencia del modelo básico y del simplificado, si el resultado es 0 se concluye que el modelo simplificado es válido para el cálculo de ese error, excepto para EBY puesto que los resultados obtenidos anteriormente que se reflejan en la columna básico no eran aceptables.

*Tabla 112. Comparación de los resultados de los errores geométricos con la influencia de todos los errores utilizando el modelo básico y el modelo simplificado con funciones teóricas de primer grado.*

ERROR	COORDENADA REPRESENTATIVA (mm)	BÁSICO	SIMPLIFICADO	DIFERENCIA
ECX (arcsec)	3	0	0	0
	15	0,15626	0,15626	0
	60	0,54691	0,54691	0
	120	1,09383	1,09383	0
	180	1,56261	1,56261	0
	240	2,10953	2,10953	0
	285	2,50018	2,50018	0
	297	2,57831	2,57831	0
EBX (arcsec)	3	0	0	0
	15	-9,948E-13	-9,948E-13	0
	60	0,22420	0,22420	0

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

	120	0,67260	0,67260	0
	180	1,34521	1,34521	0
	240	1,56941	1,56941	0
	285	2,01781	2,01781	0
	297	2,01781	2,01781	0
EAY (arcsec)	90	-2,39955	-2,39955	0
	180	-5,14974	-5,14974	0
ECY (arcsec)	90	0,05959	0,05959	0
	180	0,28877	0,28877	0
EBZ (arcsec)	45	-0,30458	-0,30458	0
	91	-0,64836	-0,64836	0
	137	-0,99213	-0,99213	0
	178,01	-1,33591	-1,33591	0
EAZ (arcsec)	45	-0,28885	-0,28885	0
	91	-0,52685	-0,52685	0
	137	-0,84418	-0,84418	0
	178,01	-1,08218	-1,08218	0
EXX (mm)	3	0	0	0
	15	-0,00032	-0,00032	0
	60	-0,00167	-0,00167	0
	120	-0,00345	-0,00345	0
	180	-0,00532	-0,00532	0
	240	-0,00710	-0,00710	0
	285	-0,00845	-0,00845	0
	297	-0,00877	-0,00877	0
EYY (mm)	90	0,00359	0,00359	0

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

	180	0,00711	0,00711	0
EZZ (mm)	45	0,00135	0,00135	0
	91	0,00274	0,00274	0
	137	0,00414	0,00414	0
	178,01	0,00535	0,00535	0
EAX (arcsec)	3	0	0	0
	15	0	0	0
	60	-9,965E-13	-9,965E-13	0
	120	-0,22420	-0,22420	0
	180	-0,22420	-0,22420	0
	240	-0,44840	-0,44840	0
	285	-0,67260	-0,67260	0
	297	-0,67260	-0,67260	0
EBY (arcsec)	90	-0,07555	-0,07555	0
	180	-0,15110	-0,15110	0
EZX (mm)	3	0	0	0
	15	0,00059	0,00059	0
	60	0,00258	0,00258	0
	120	0,00483	0,00483	0
	180	0,00664	0,00664	0
	240	0,00791	0,00791	0
	285	0,00853	0,00853	0
	297	0,00870	0,00870	0
EYX (mm)	3	0	0	0
	15	0,00060	0,00118	-0,00058
	60	0,00310	-0,10892	0,11202

	120	0,00711	-0,54868	0,55579
	180	0,01162	-1,32354	1,33516
	240	0,01684	-2,43329	2,45013
	285	0,02111	-3,48548	3,50659
	297	0,02230	-3,79789	3,82019
EZY (mm)	90	0,00357	0,00357	0
	180	0,00714	0,00714	0
EXY (mm)	90	-0,00539	-0,00539	0
	180	-0,01087	-0,01087	0
EXZ (mm)	45	0,00228	0,00228	0
	91	0,00447	0,00447	0
	137	0,00666	0,00666	0
	178,01	0,00868	0,00868	0
EYZ (mm)	45	-0,00085	-0,00085	0
	91	-0,00180	-0,00180	0
	137	-0,00265	-0,00265	0
	178,01	-0,00351	-0,00351	0

Con esta comparación se puede observar que el error EYX no se puede obtener mediante el modelo matemático simplificado debido a la alta diferencia que se observa respecto al modelo básico. EBY tampoco se puede calcular con el uso del modelo simplificado debido a que se obtienen los mismos resultados que con el modelo básico y estos no eran aceptables. Para el cálculo de todos los demás errores el método resulta adecuado.

### **A7.5. Tabla comparativa de los resultados de los cálculos de los errores geométricos utilizando funciones de error teóricas de mayor grado dependiendo del modelo utilizado en la simulación.**

El procedimiento y la realización de las tablas coincide con el apartado anterior, la diferencia respecto a este es que las funciones teóricas son de segundo o tercer grado. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

*Tabla 113. Comparación de los resultados de los errores geométricos con la influencia de todos los errores con funciones de mayor grado utilizando el modelo original y el modelo simplificado.*

ERROR	COORDENADA REPRESENTATIVA (mm)	BÁSICO	SIMPLIFICADO	DIFERENCIA
ECX (arcsec)	3	0	0	0
	15	0,23439	0,23439	0
	60	0,70318	0,70318	0
	120	1,32822	1,32822	0
	180	1,95327	1,95327	0
	240	2,50018	2,50018	0
	285	2,81270	2,81270	0
	297	2,96896	2,96896	0
EBX (arcsec)	3	0	0	0
	15	-0,22420	-0,22420	0
	60	-0,22420	-0,22420	0
	120	-2,390E-11	-2,390E-11	0
	180	0,22420	0,22420	0
	240	0,44840	0,44840	0
	285	0,89680	0,89680	0
	297	0,89680	0,89680	0
EAY (arcsec)	90	-2,31395	-2,31395	0

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

	180	-5,40792	-5,40792	0
ECY (arcsec)	90	-0,12892	-0,12892	0
	180	-0,24351	-0,24351	0
EBZ (arcsec)	45	-0,97993	-0,97993	0
	91	-0,97993	-0,97993	0
	137	-1,32370	-1,32370	0
	178,01	-1,66748	-1,66748	0
EAZ (arcsec)	45	0,18933	0,18933	0
	91	0,18933	0,18933	0
	137	-0,04867	-0,04867	0
	178,01	-0,36600	-0,36600	0
EXX (mm)	3	0	0	0
	15	-0,00039	-0,00039	0
	60	-0,00207	-0,00207	0
	120	-0,00417	-0,00417	0
	180	-0,00600	-0,00600	0
	240	-0,00766	-0,00766	0
	285	-0,00882	-0,00882	0
	297	-0,00904	-0,00904	0
EYY (mm)	90	0,00648	0,00648	0
	180	0,01144	0,01144	0
EZZ (mm)	45	0,00373	0,00362	0,00011
	91	0,00576	0,00555	0,00021
	137	0,00623	0,00625	-0,00002
	178,01	0,00510	0,00589	-0,00079
EAX (arcsec)	3	0	0	0

Diseño de una pieza patrón para validación y verificación de máquina herramienta

	15	-0,22420	-0,22420	0
	60	-0,89680	-0,89680	0
	120	-1,34521	-1,34521	0
	180	-1,79361	-1,79361	0
	240	-1,79361	-1,79361	0
	285	-1,79361	-1,79361	0
	297	-1,79361	-1,79361	0
EBY (arcsec)	90	-0,88195	-0,88195	0
	180	-1,76390	-1,76390	0
EZX (mm)	3	0	0	0
	15	0,00031	0,00031	0
	60	0,00134	0,00134	0
	120	0,00235	0,00235	0
	180	0,00271	0,00271	0
	240	0,00279	0,00279	0
	285	0,00252	0,00252	0
	297	0,00242	0,00242	0
EYX (mm)	3	0	0	0
	15	0,00039	0,00039	0
	60	0,00189	0,00189	0
	120	0,00403	0,00403	0
	180	0,00648	0,00648	0
	240	0,00897	0,00897	0
	285	0,01090	0,01090	0
	297	0,01143	0,01143	0
EZY (mm)	90	-0,00326	-0,00326	0

	180	-0,00342	-0,00342	0
EXY (mm)	90	-0,00110	-0,00110	0
	180	-0,00099	-0,00099	0
EXZ (mm)	45	0,00323	0,00323	0
	91	0,00517	0,00517	0
	137	0,00870	0,00870	0
	178,01	0,01550	0,01550	0
EYZ (mm)	45	-0,00108	-0,00108	0
	91	-0,00186	-0,00186	0
	137	-0,00204	-0,00204	0
	178,01	-0,00195	-0,00195	0

Aunque en el EZZ se observa cierta diferencia esta resulta mínima por lo que se concluye que el modelo simplificado resulta válido para el cálculo de todos estos errores cuando las funciones que se utilizan en la simulación son de segundo o tercer grado, excepto para EBY que se siguen obteniendo los mismos valores que en el modelo básico y que no eran aceptables.

## **Anexo 8. Características de las herramientas utilizadas en la fabricación de la pieza patrón.**

En el capítulo 8 de este trabajo se ha descrito el proceso de mecanizado necesario para fabricar la pieza patrón. La pieza va a ser fabricada a partir de un bloque de aluminio como preforma mediante una fresadora vertical. En la hoja de procesos realizada en la memoria se incluyen las distintas operaciones así como el orden en el que estas se deben realizar. Para cada operación se ha elegido una herramienta capaz de realizar la operación. En la siguiente tabla se incluyen las herramientas que se han seleccionado junto a sus características principales [20].

*Tabla 114. Herramientas utilizadas en la fabricación de la pieza patrón.*

Herramienta	Características
CoroMill R245-063A32-12L	<ul style="list-style-type: none"><li>-Diámetro máximo de corte: 75,5 mm.</li><li>-Profundidad de corte máxima: 6 mm.</li><li>-Longitud funcional: 120 mm.</li><li>-Velocidad de giro máxima: 14400 1/min.</li></ul>
CoroMill R245-12 T3 E-AL H10	<ul style="list-style-type: none"><li>-Nº de filos: 4.</li><li>-Longitud efectiva del filo: 10 mm.</li><li>-Ángulo de filo principal: 45°.</li></ul>
CoroMill 1P360-2500-XA 1620	<ul style="list-style-type: none"><li>-Diámetro de corte: 25 mm.</li><li>-Profundidad de corte máxima: 90 mm.</li><li>-Longitud funcional: 153 mm.</li><li>-Longitud utilizable: 90 mm.</li><li>-Velocidad de giro máxima: 39895 1/min.</li></ul>
CoroMill R331.35C-050A20CM060	<ul style="list-style-type: none"><li>-Anchura de corte: 6mm.</li><li>-Diámetro de corte: 50 mm.</li><li>-Profundidad máxima de corte: 14 mm.</li><li>-Longitud funcional: 130 mm.</li><li>-Velocidad de giro máxima: 25000 1/min.</li></ul>
CoroMill N331.1A-04 35 05H-NL1130	<ul style="list-style-type: none"><li>-Nº de filos: 4.</li><li>-Longitud efectiva del filo: 4,6 mm.</li><li>-Ángulo de filo principal: 90°.</li></ul>
CoroMill 2P120-1600-NC H10F	<ul style="list-style-type: none"><li>-Diámetro de corte: 16 mm.</li><li>-Profundidad de corte máxima: 20 mm.</li><li>-Longitud funcional: 115 mm.</li><li>-Longitud utilizable: 63 mm.</li><li>-Velocidad de giro máxima: 80000 1/min.</li></ul>
CoroMill 2P170-2000-NA H10F	<ul style="list-style-type: none"><li>-Diámetro de corte: 20 mm.</li><li>-Profundidad de corte máxima: 80 mm.</li><li>-Longitud funcional: 150 mm.</li><li>-Longitud utilizable: 80 mm.</li><li>-Velocidad de giro máxima: 10300 1/min.</li></ul>
Broca 10 mm ATORN	<ul style="list-style-type: none"><li>-Diámetro de corte: 10 mm.</li></ul>