



Universidad
Zaragoza



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Ensayo, calibración de palpador autocentrante
y verificación geométrica de máquina
herramienta

AUTOR: David Cortés Ibáñez

DIRECTOR: Jesús Velázquez Sancho

ESPECIALIDAD: Ingeniería Técnica Mecánica

ZARAGOZA, SEPTIEMBRE 2012

MEMORIA

RESUMEN

El tema principal de este proyecto es el desarrollo matemático para la obtención de fórmulas que permitan evaluar los errores geométricos individualmente de una máquina herramienta, y el uso de las mismas para obtenerlos de una fresadora de control numérico.

Para ello se expone las diferentes fuentes de error que influyen en la máquina herramienta y los procedimientos actuales con los que se pueden medir y compensar dichos errores.

Para calibrar la máquina herramienta se usa el procedimiento de barra de esferas y palpador autocentrante. Previamente se ha tenido que calibrar dicho palpador mediante la medición de un cubo patrón y analizar dichos datos para modificar el programa informática del palpador, que obtiene el centro de una esfera palpada convirtiendo la medida de tres sensores.

Las fórmulas obtenidas son en función de la máquina en las que van a ser empleadas. Para ello se define un sistema de ensayo que consiste en medir 16 la barra de bolas en 12 posiciones diferentes. Con estas mediciones podemos obtener los diferentes errores que afectan a nuestra máquina. Antes de medir en máquina se crea un simulador informático de la misma para comprobar que el método es fiable y válido.

Comprobada la eficacia del método pasamos a calibrar la fresadora realizando todas las mediciones sobre ella con el palpador autocentrante. Después de analizar los datos los comparamos con los obtenidos mediante otro método más fiable, como es el interferómetro laser, para observar diferencias en cuanto al tiempo se refiere, comprobando la eficiencia del método y del palpador autocentrante.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Objetivo del proyecto.....	5
1.2. Estructura del proyecto.....	5
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Tipos de errores de máquina herramienta	7
2.1.1. Los 21 errores geométricos en máquina herramienta.....	8
2.1.2. Errores geométricos debidos a los movimientos de los carros	10
2.1.3. Errores geométricos debidos a la rigidez estática.....	11
2.1.4. Errores geométricos debidos a la rigidez dinámica	12
2.1.5. Comportamiento térmico de la estructura de la máquina	13
2.1.6. Sistema de control.....	13
2.1.7. Comportamiento cinemático y dinámico de los accionamientos de avance.....	14
2.2. Sistemas de medida para la verificación geométrica de máquina herramienta.....	18
2.2.1. Interferómetro laser.....	18
2.2.2. Laser Tracer	20
2.2.3. Laser Tracker	21
2.2.4. Palpador MT-Check	23
2.2.5. Ballbar telescópico (DBB)	25
2.2.6. Cross Grid Encoder (KGM).....	27
2.2.7. HMS (Head Measuring System).....	29
3. PALPADOR LINEAL.....	31
3.1. Descripción.....	31
3.2. Ensayo y calibración del palpador lineal	33
3.2.1. Cubo de calibración y plataforma	33
3.2.2. Medición del cubo de calibración	36
3.2.3. Dispositivo de ensayo.....	37
3.2.4. Montaje del palpador y desarrollo del ensayo	39
3.2.5. Desarrollo de la matriz de cambio de base	44
3.3. Resultados del palpador.....	47
4. COMPENSACION ERRORES GEOMÉTRICOS EN MÁQUINA HERRAMIENTA	50
4.1. Introducción	50

MEMORIA

4.2.	Tipos de máquinas herramientas	52
4.3.	Modelo matemático	54
4.4.	Obtención de errores geométricos	58
4.5.	Verificación del método	74
5.	EXPLICACIÓN DEL ENSAYO	79
5.1.	Iniciación del ensayo	80
5.2.	Secuencia de mediciones	84
5.2.1.	Posiciones en Z y sus diagonales	84
5.2.2.	Posiciones en Y	87
5.2.3.	Posiciones en X y sus diagonales	89
5.3.	Análisis de los resultados	91
5.3.1.	Error de posición xTx	92
5.3.2.	Error de rectitud xTy	93
5.3.3.	Error de rectitud xTz	94
5.3.4.	Error de Cabeceo xRy	95
5.3.5.	Error de rumbo xRz	96
5.3.6.	Comparación de tiempos de verificación	97
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	99
7.	BIBLIOGRAFÍA	100

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del proyecto

El proyecto surge a raíz de la búsqueda de métodos para calibrar una máquina herramienta. Para ello en este proyecto se incluyen el desarrollo de fórmulas que nos permitan hallar los errores geométricos que afectan dicha máquina. Las fórmulas son obtenidas en función del diseño de la cadena cinemática de la máquina en la cual van a ser utilizadas.

Otro de los objetivos del proyecto es la calibración de un palpador autocentrante, usado posteriormente junto a una barra de bolas patrón, para la medición en la máquina herramienta como medio para obtener sus errores. Dicha calibración es debida a que la precisión de estos aparatos con el tiempo se deteriora, ya que su precisión ronda en las micras, siendo una medida fácil de dar lugar a error.

La medición mediante el método desarrollado a raíz de las fórmulas es otro aspecto que implica la creación de este proyecto, ya que gracias a él podemos reducir tiempo para la obtención de los errores que afectan a la máquina mediante el uso del palpador autocentrante y la barra de bolas calibrada.

1.2. Estructura del proyecto

A continuación se muestra un resumen de lo que viene a ser el proyecto:

- **Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte.** En este apartado se muestra cuales son los errores que afectan a una máquina herramienta y el porqué de dichos errores. También cuales son los sistemas actuales que existen en el mercado para la medición y corrección de dichos errores.
- **Capítulo 3. Palpador lineal.** Se define el palpador lineal y el método con el que calibrarlo. Se realiza la explicación paso por paso del proceso de calibración y se realiza un análisis de los resultados.

- **Capítulo 4. Compensación de errores geométricos en máquina herramienta.** En este apartado se desarrollan todas las fórmulas matemáticas que permiten la obtención de los errores en la máquina herramienta. También se define un procedimiento de ensayo de la máquina herramienta que consiste en la medición de la barra de bolas en diferentes posiciones. Tras su obtención se realiza un proceso de verificación mediante el uso de un programa informático, comprobando que dichas fórmulas son correctas.
- **Capítulo 5. Explicación del ensayo.** En este último capítulo se explica el desarrollo del ensayo con el método de la barra de bolas y palpador autocentrante. Se explica todas las posiciones en las que se tuvo que colocar la barra de bolas para obtener los errores de la máquina. En este mismo apartado se muestra la comparación de la obtención de dichos errores con el método de la barra de bolas y con el método del interferómetro laser.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Tipos de errores de máquina herramienta

En una máquina-herramienta se transforma la materia prima en un producto final, a través de un proceso de arranque de viruta. El buen estado de los elementos constitutivos de la máquina asegura que las tolerancias preestablecidas en el diseño del producto se cumplan, sin embargo, la realidad es que una máquina herramienta aglutina distintas fuentes de error que originan defectos de calidad.

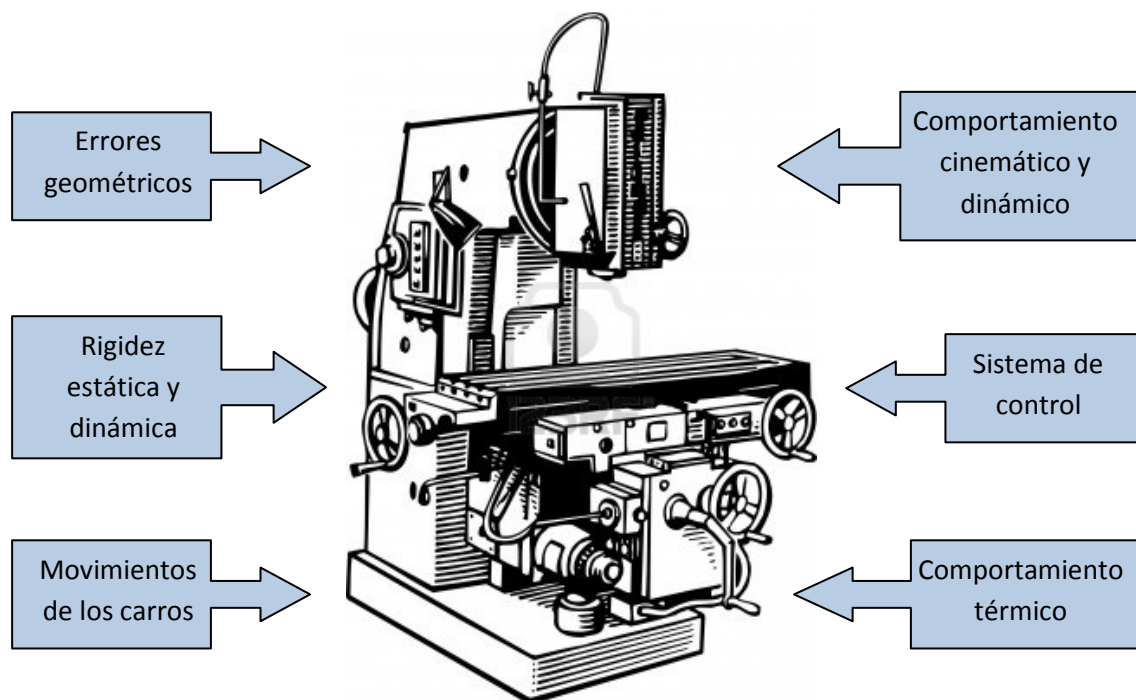


Figura 2.1 Principales fuentes de error en una máquina herramienta

Las fuentes de los errores geométricos, junto con la rigidez y el comportamiento térmico son más del 70% del error resultante de una máquina herramienta. Otras fuentes de error son la resolución y precisión de los sistemas de medida lineal de la posición de los carros, las deformaciones elásticas de los componentes de guiado, las fuerzas de inercia generadas en movimientos de aceleración o deceleración, el movimiento de fricción en los mecanismos de avance, el sistema de servo control (CNC), el efecto dinámico de las vibraciones y las fuerzas generadas en el proceso de corte.

2.1.1. Los 21 errores geométricos en máquina herramienta

Un sólido rígido posee seis grados de libertad de movimiento que determinan su localización (posición y orientación) en el espacio. De esta manera, considerando a los carros en su movimiento sobre las guías como sólidos rígidos, los errores de un eje lineal pueden ser descritos como seis parámetros que dependen de la posición de cada eje. Debido a la existencia de imperfecciones en la superficie y forma de la guía, el carro experimentará a lo largo de ésta, tres errores de traslación (error de posición, error de rectitud horizontal y vertical) y tres errores de rotación (cabeceo, rumbo y vuelco) alrededor de los tres ejes, tal y como puede verse en la figura siguiente.

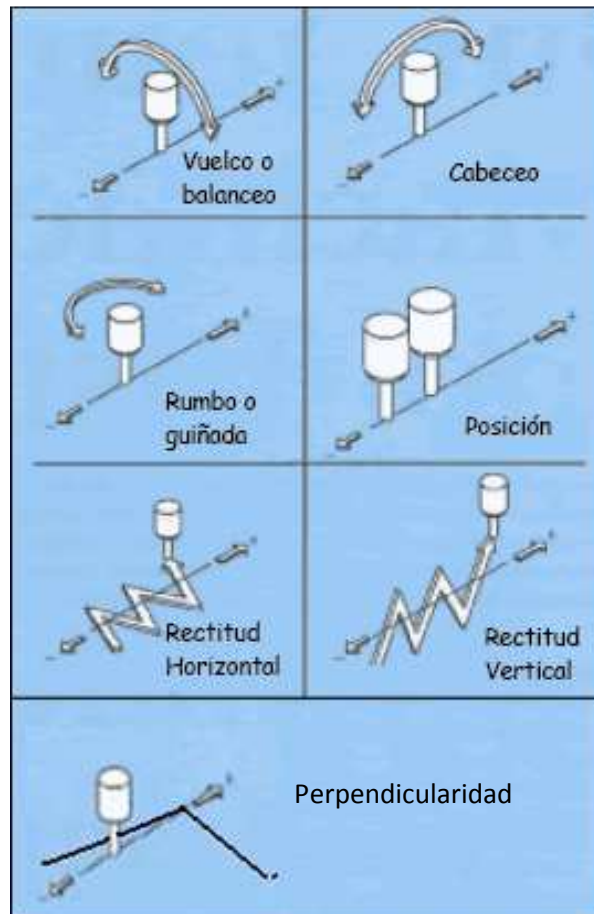


Figura 2.1.1 Los 21 errores geométricos

- Error de posición o error de posicionamiento lineal: Se trata de un error de traslación, paralelo al eje de desplazamiento, que representa la diferencia entre la posición alcanzada por un punto de la parte móvil y la

posición que debería haber ocupado tras el movimiento (posición programada). En las máquinas de control numérico la precisión de posicionado resulta fundamental y depende de varios factores, tales como la resolución y la precisión del sistema de medida lineal, la deformación elástica de los componentes de movimiento, las fuerzas de inercia y rozamiento en las guías o en los carros, etc. La precisión de posicionado se ve también afectada por el funcionamiento del sistema de control. Tradicionalmente este error se determina mediante un interferómetro láser.

- Errores de rectitud: Se trata de errores de traslación que representan una desviación en los ejes perpendiculares al eje de movimiento. Las mediciones de rectitud resaltan cualquier componente de flexión, mala alineación o defecto de fabricación de las guías de la máquina. Los métodos de determinación de los errores de rectitud en un eje lineal más comunes son la medición con regla de rectitud y comparador, y mediante interferómetro láser o incluso mediante métodos basados en la medición de ángulos.
- Error de cabeceo, rumbo o guiñada y vuelco o balanceo: Se trata de giros según los tres ejes. Se determinan mediante la medición con regla de rectitud y comparadores, con interferómetro láser o con nivel de precisión.

Si un eje lineal tiene 6 grados de libertad, entonces en una MH convencional de tres ejes, se deben determinar 18 grados de libertad. Debido al movimiento relativo entre ejes, existe además otro tipo de error:

- Errores de ortogonalidad o perpendicularidad: El error de perpendicularidad es la desviación con respecto a 90° entre dos ejes nominalmente ortogonales. Su origen podría encontrarse en el desgaste de la guía de la máquina, en algún accidente que puede haber dañado las guías o un defecto de montaje. Los errores de perpendicularidad son los únicos errores que son constantes a lo largo de un eje lineal, ya que no varían con la posición. Se determinan mediante la medición con

escuadra de perpendicularidad y comparadores, con láser de alineamiento o mediante interferometría láser.

2.1.2. Errores geométricos debidos a los movimientos de los carros

Una fuente muy importante de error geométrico en la MH es la debida a las imperfecciones de los diferentes elementos de la máquina, como pueden ser las mesas, los carros o los husillos de avance. Dichas imperfecciones son debidas a la fabricación inexacta de las guías o a su deformación a lo largo del tiempo. Estas imperfecciones causan alteraciones indeseables en el comportamiento de la máquina, provocando errores de posición y trayectoria en los ejes de la máquina.

Diferentes factores como la orientación del carro respecto de la guía, el tipo de accionamiento del carro móvil, los materiales constituyentes de las guías y el tipo de sustentación (mecánica, neumática, hidrostática, etc.) son influyentes en el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza. Además, numerosos factores pueden causar errores de forma y superficie de las guías, provocando desviaciones dimensionales en la pieza: errores de rectitud originados en la fabricación y montaje de las guías, desgastes mecánicos por fricción entre carro y guía, deformaciones estáticas causadas por el peso de los componentes de la MH y/o fuerzas de corte, deformaciones térmicas causadas por diferencias de temperatura.

Los husillos de bolas son, tradicionalmente, el principal mecanismo de accionamiento de los ejes utilizados en las MH. Transforman el movimiento giratorio del motor en un movimiento lineal que se necesita para accionar los ejes de la máquina. El husillo de bolas está fijado en dirección axial precargado con uno o dos rodamientos de bolas de contacto angular que absorben las fuerzas axiales de la corredera. Errores de fabricación del husillo, poseer holguras en los rodamientos o inestabilidad a gradientes elevados de temperatura pueden originar errores geométricos adicionales.

La influencia de estos factores se analiza con la máquina en vacío mediante diferentes ensayos geométricos.

2.1.3. Errores geométricos debidos a la rigidez estática

El comportamiento estático tiene que ver con las cargas que se presentan en forma de pesos de pieza y máquina, así como en fuerzas del proceso y sujeción. Estos esfuerzos mecánicos estáticos afectan al comportamiento geométrico de la MH en la medida en que causan deformaciones elásticas de la estructura de la máquina que modifican la posición correcta entre la herramienta y la pieza a mecanizar. Dichas cargas no causan deformaciones permanentes, es decir, que los materiales de la máquina trabajan dentro de su comportamiento elástico. El resultado es que las guías cambian su forma y su posición y orientación relativa. Para averiguar sus influencias sobre el comportamiento geométrico y cinemático de la máquina, se deben realizar las mediciones de la precisión de trabajo bajo esfuerzos definidos. Como se ha apuntado, cuando se realiza el mecanizado de una pieza, fundamentalmente son tres los tipos de cargas que están presentes:

- Fuerzas introducidas por el proceso de corte: estas fuerzas actúan directamente entre la herramienta y la pieza, introduciendo errores en las dimensiones de ésta. No obstante, realizando el mecanizado en las dos fases habituales (desbaste y acabado) este factor normalmente se puede considerar despreciable frente a otros de mayor importancia, ya que las dimensiones finales de la pieza se consiguen en el acabado, en el cual las fuerzas de corte son relativamente pequeñas.
- Errores debidos al peso de componentes de la propia máquina: estas fuerzas están causadas por movimientos de grandes partes móviles de la MH. Como resultado de estas fuerzas, los errores geométricos de una guía son dependientes de la posición de una o más de las otras guías. No obstante, el peso de los elementos de la máquina tiene una influencia mayor en máquinas grandes o máquinas con baja rigidez. Por lo tanto, este efecto puede ser ignorado en máquinas de tamaño medio o pequeño, pudiendo tratar los errores de cada eje independientemente de los de los demás.

- Errores debidos al peso de la pieza: el efecto de este peso es la deformación de ciertas partes de la máquina, con la consiguiente influencia en los errores geométricos. La influencia de la masa de la pieza puede ser ignorada cuando la fuerza del peso de ésta sea mínima con respecto a la fuerza del proceso (prensas), al carro móvil de máquina (fresadoras pequeñas) o respecto al sistema de alojamiento del husillo (tornos pequeños). Por el contrario, en el caso de máquinas medianas y grandes, esta carga puede resultar muy influyente en el comportamiento de las mismas.

El procedimiento de medición de la influencia de estas cargas se basa en el uso de transductores de fuerza y desplazamiento en la zona de trabajo.

2.1.4. Errores geométricos debidos a la rigidez dinámica

El comportamiento dinámico de la estructura de la MH depende principalmente de la existencia de fuerzas dinámicas o variables en el tiempo, tales como fuerzas de inercia debidas a la aceleración y deceleración de las guías, fuerzas de fricción de los elementos de guiado, vibraciones externas o autoexcitadas de la estructura y las fuerzas que aparecen durante el proceso de corte. Por ello, es importante a la hora de diseñar las características estructurales de una máquina, alejar lo más posible la frecuencia natural de las frecuencias de trabajo para que la vibración de la MH no afecte al acabado superficial de la pieza y a la precisión de la máquina.

En un proceso continuo de mecanizado aparecen dos tipos de vibraciones debidas al movimiento relativo entre pieza y herramienta: vibraciones de excitación externa o forzosa y vibraciones autoexcitadas. Las vibraciones de excitación externa ocurren como resultado de fuerzas interferentes dentro de la máquina, que se originan debido al desequilibrio en masas rotatorias, fallos de rodadura en los rodamientos o golpes de dientes en el mecanismo de engranajes. En el caso de vibraciones autoexcitadas, la estructura de la máquina oscila básicamente en una o varias frecuencias naturales, debido normalmente a fuerzas de mecanizado en el proceso de fabricación.

El efecto de las vibraciones empobrece los acabados superficiales, incrementa el desgaste de la máquina y de la herramienta así como provoca defectos en la pieza fabricada, en la herramienta y en la propia máquina.

2.1.5. Comportamiento térmico de la estructura de la máquina

Al igual que el comportamiento estático de la máquina, el comportamiento termoelástico de las MH tiene una influencia decisiva sobre la precisión de trabajo. Las deformaciones estructurales de la máquina, dependen a menudo de las frecuentes alteraciones de su estado térmico. El comportamiento térmico de la máquina describe la distribución de temperaturas que en su estructura se producen y la deformación resultante. Dicho comportamiento viene determinado por el emplazamiento y la intensidad de las fuentes de calor, las propiedades térmicas de los materiales, la transmisión de calor del entorno por convección y radiación y la propia estructura de la máquina

Varias son las posibles fuentes internas de calor, como los motores de accionamiento, fricciones en rodamientos, guías, engranajes o el propio proceso de mecanizado. Las fuentes externas de influencia térmicas en la máquina dependen, entre otras cosas, del lugar en el que se encuentra colocada.

La influencia de las fuentes de calor externas suele ser secundaria frente a la de las internas, ya que la temperatura en el ambiente de trabajo normalmente varía más lentamente que las variaciones térmicas provocadas por las fuentes internas de la propia máquina.

2.1.6. Sistema de control

En su función principal de transformar códigos de programación en movimientos controlados de los ejes de la máquina, un sistema de control presente en una MH de control numérico posee limitaciones que contribuyen a perjudicar el comportamiento geométrico de la máquina.

El control numérico ajusta los parámetros de velocidad, la dirección y la distancia de los movimientos necesarios para seguir la trayectoria programada y calcula una serie de posiciones para cada eje que serán alcanzadas a lo

largo de la trayectoria programada a la velocidad deseada. La información en forma de señales eléctricas es enviada a los servomotores para mover los ejes de la máquina, de forma que la trayectoria sea seguida. Para comprobar que la posición alcanzada es la deseada, el CN verifica continuamente la posición actual de sus sistemas de avance, a través de lecturas del sistema interno de medidas (reglas lineales, encoders rotatorios) y la compara con la que está programada realizando un ajuste en tiempo real intentando así reducir en todo lo posible dicha diferencia (denominada error de seguimiento).

Por lo tanto, ese tiempo de procesamiento influye directamente en el comportamiento geométrico de la máquina. Cuanto más rápido sea el procesamiento el CN podrá comparar los valores programados con los realizados y más rápido tomará las acciones correctivas necesarias. De esta manera los errores originados por el CN influyen en el comportamiento geométrico, pero también en el comportamiento dinámico de la máquina.

Los sistemas de control continúan incorporando avances en la electrónica y en la informática, siendo ésta una de las principales vías de mejora de la precisión en las Máquinas-Herramienta de hoy en día.

2.1.7. Comportamiento cinemático y dinámico de los accionamientos de avance

La precisión cinemática de la máquina herramienta se ve afectada factores que influyen en el comportamiento cinemático y dinámico de los accionamientos de avance. De esta manera, posibles fuentes de errores en la creación de una trayectoria mediante el movimiento conjunto de varios ejes son: el interpolador, los circuitos reguladores de posición y los componentes mecánicos de los accionamientos de avance. La precisión interna de cálculo y la velocidad del algoritmo de interpolación del CN son fundamentales para realizar una interpolación adecuada. Existen errores de contorneado asociados a la dinámica de los accionamientos, y errores debidos a la falta de linealidad en los elementos mecánicos de la transmisión. Juegos, elasticidades, junto con las fuerzas de fricción en el bloque de accionamiento, son efectos perceptibles a bajas velocidades y en la inversión en la dirección de los ejes.

La importancia de la velocidad de procesamiento del CN se observa si se compara la trayectoria realizada por la máquina con la programada. En trayectorias curvas y con cantos vivos es necesaria una mayor velocidad de proceso, ya que es precisamente en ellas donde se observan los mayores.

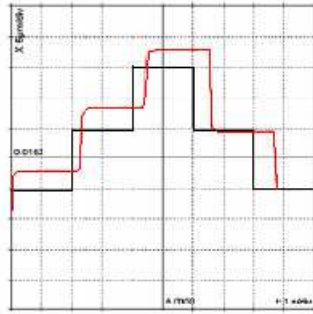


Figura 2.1.7-1 Ensayo dinámico de trayectoria con un sistema grid encoder

En cuanto al circuito regulador de la posición, para la medición de ésta en el avance axial de Máquinas-Herramienta de CN es posible usar reglas lineales o bien husillos de bolas conjuntamente con encoders rotativos. Un bucle de control de la posición a través de encoder rotativo y husillo de bolas incluye sólo el servomotor. Esto implica una falta de control en la posición del carro porque sólo está siendo controlada la posición del rotor del servomotor. Para poder extrapolar la posición del carro, el sistema mecánico entre éste y el servomotor debe ser bien conocido y sobre todo, se debe tener un comportamiento reproducible en la transmisión mecánica. Esta es la configuración tradicional de las MH con sistemas de control en bucle semicerrado.

Por otro lado, un bucle de control cerrado de la posición con una regla lineal incluye al sistema mecánico del accionamiento de avance enteramente. La regla lineal sobre la corredera detecta los errores de transmisión mecánica, los cuales son compensados por la unidad de control de la máquina.

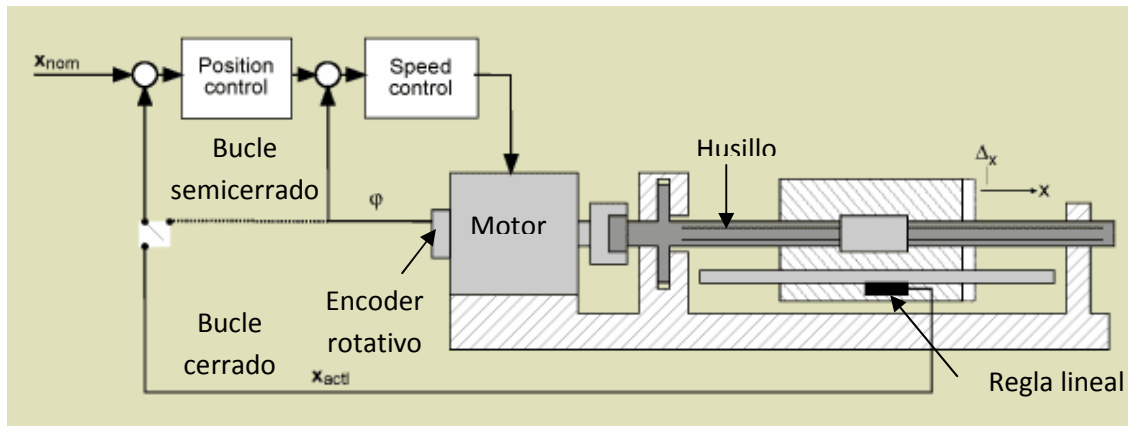


Figura 2.1.7-2 Bucle de control del mecanismo de avance con la regla lineal incluida

Así, aun cuando los errores geométricos de las MH pueden ser corregidos actualmente, se debe tener también en consideración el comportamiento dinámico durante la operación de la máquina. Los errores dinámicos de trayectorias pueden ser determinados, por ejemplo, mediante el ensayo de circularidad, que influye de forma decisiva sobre la precisión de trabajo de las MH. Este ensayo permite evaluar debidamente la precisión geométrica y la técnica de accionamiento para máquinas con ejes lineales. El ensayo consiste en que palpador de medición continua de dos ejes es controlado por la máquina a velocidad de contorneado constante a lo largo de un patrón circular. El diámetro de la trayectoria circular se programa algo menor o bien mayor que el diámetro del patrón circular, de forma que el palpador de medición esté desviado alrededor de una cantidad constante incluso con una trayectoria perfecta, evaluándose y midiéndose la desviación.

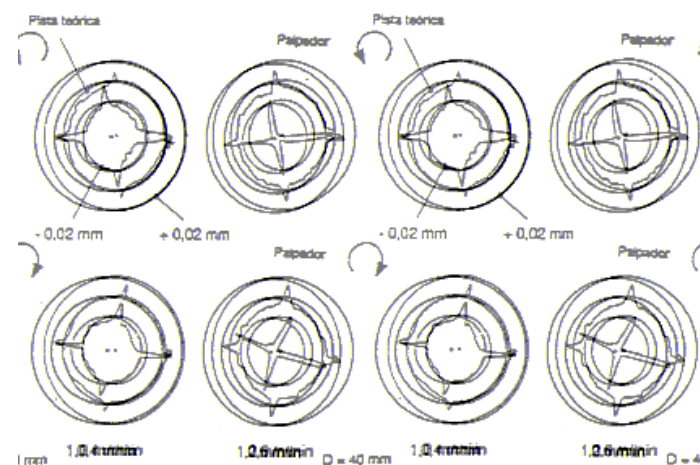


Figura 2.1.7-3 Variaciones de contorneado dependientes de la aceleración.

La figura representa un resultado típico de un ensayo de circularidad, tomado con un palpador de medición. Se representan las diferencias de la medición en un patrón circular de 40mm de diámetro. Las mediciones demuestran claras puntas de variación en los puntos de inversión del sentido de desplazamiento en los distintos ejes de movimiento, que son generados por histéresis (elasticidad o juego) en la mecánica de los ejes. Además, se puede observar como la variación radial va aumentando con la velocidad.

Realizando el ensayo de circularidad se confirma que los errores en los sistemas de medida también provocan errores cinemáticos y dinámicos. Por ejemplo, en los casos en que el control de la posición se realiza a través de husillo/encoder rotativo, los círculos recorridos a altas velocidades se desvían significativamente del camino ideal. Sin embargo, un mismo centro de mecanizado muestra una significativa mejor precisión en el contorno cuando está equipado con reglas lineales.

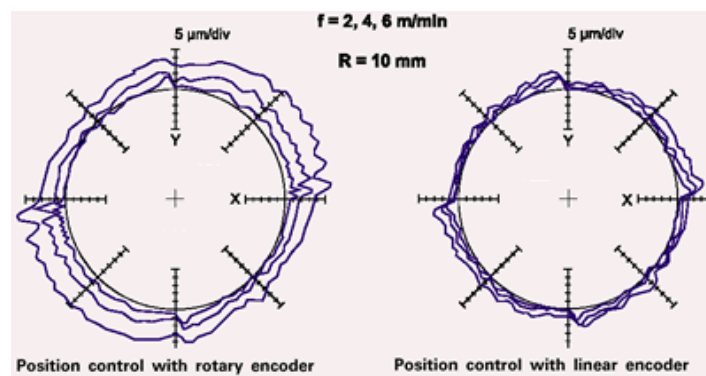


Figura 2.1.7-4 Ensayo de circularidad en una MH con control husillo/encoder rotativo (izqda.) y regla lineal (dcha.)

Adicionalmente a este comportamiento se observa que las máquinas que utilizan reglas lineales como sistema de medición de posicionamiento presentan la ventaja de proporcionar directamente la medida de la posición de la mesa, sin verse influenciadas por la dilatación de la estructura por cambios de temperatura. Así, aunque la utilización de encoders rotativos supone un menor coste, el empleo de reglas permite la no propagación del efecto de los errores térmicos, los cuales resultan especialmente críticos en el husillo de bolas.

2.2. Sistemas de medida para la verificación geométrica de máquina herramienta

El rendimiento de la máquina herramienta viene esencialmente determinada por la dinámica y la precisión estática del movimiento de la máquina. Para un mecanizado con precisión es especialmente importante medir y compensar las desviaciones en el movimiento. Hasta ahora la inspección y verificación convencional de la máquina herramienta ha estado limitada esencialmente a la medición estática de la geometría de la estructura de la máquina sin carga y en máquinas controladas, pero también es importante la medición de la precisión del posicionamiento, es decir, la medición de los errores geométricos que influyen en la máquina.

Los métodos que se utilizan para la verificación geométrica buscan ser rápidos y fáciles de utilizar, con precios bajos y bajas incertidumbres de medición. Pero actualmente pocos de ellos pueden contar con todas las características anteriores. A continuación, se muestran varios métodos para la medición directa de los errores asociados a los ejes lineales.

2.2.1. Interferómetro láser

El uso del laser como herramienta de medición viene usándose desde la década de 1880. Desde entonces este novedoso sistema ha ido desarrollándose en tecnología, aunque tras los años transcurridos desde entonces, el principio básico de la utilización de la precisión de la luz como unidad de medida se ha mantenido. Los interferómetros láser son los instrumentos de medición más precisos en la industria, por esta precisión son utilizados como sistemas de medición de referencia en máquinas herramientas.



Figura 2.2.1-1 Interferómetro láser

El funcionamiento del láser consiste en la emisión de un rayo láser monocromático y coherente (que conserva su frecuencia y longitud de onda en distancias de varios metros) sobre un interferómetro que lo divide en dos (un rayo de medición y otro de referencia). Ambos rayos son reflejados en sendos espejos, uno de los cuales permanece fijo (referencia) y el otro se mueve con la mesa de la máquina (medición). De esta manera, al variar la distancia entre el aparato emisor del haz y esta lente reflectora, también varía el desfase entre las ondas de la luz emitida (referencia) y la reflejada, permitiendo la medición de la distancia recorrida. Mediante el uso de las ópticas adecuadas se pueden medir los errores de ángulo, rectitud y perpendicularidad. Este sistema proporciona excelentes repetitividades y bajas incertidumbres de medida, con precisiones mejores que 0,5 partes por millón.

El problema del laser es que hay varios factores ambientales que influyen en la longitud de onda, y por lo tanto en la medida. Estos factores (la humedad, la presión del aire, la temperatura...) suelen ser compensados mediante una unidad de compensación ambiental, aunque para la toma de medidas hay que controlar dichos factores en la medida de lo posible, y tratar de reducir los fallos. En el gráfico siguiente puede verse la influencia de los factores meteorológicos.

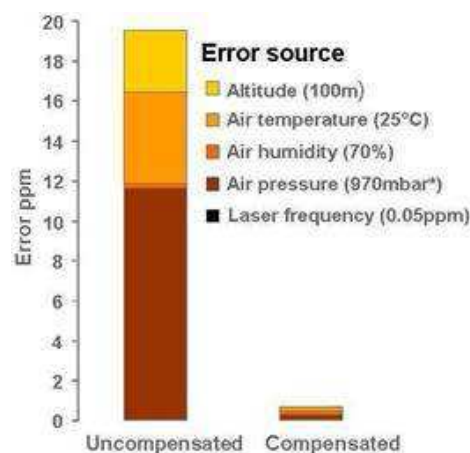


Figura 2.2.1-2 Influencia de las condiciones meteorológicas en el interferómetro laser

Vemos pues que este aparato puede darnos la medida de los 21 errores geométricos, también hay que decir que para ello, el tiempo a dedicar seria elevado, ya que para diversos errores la colocación de las lentes para medir

puede ser bastante costoso. Una verificación completa de la máquina de tres ejes, puede durar incluso varios días y esto conlleva el inconveniente de no producir mientras tanto.

No es el único de los inconvenientes que presenta, el interferómetro no es apto en aplicaciones donde la máquina debe ser considerada en su papel dinámico, particularmente en máquinas CNC donde dos o más ejes deben moverse simultáneamente en desplazamientos obtenidos por interpolación.

Por último, el coste de adquisición de dicho equipo con las ópticas necesarias es muy elevado.

2.2.2. Laser Tracer

El Laser tracer es un instrumento de seguimiento por interferometría láser. Inicialmente se monta un retrorreflector en la máquina herramienta, y luego el haz láser determina la posición del retrorreflector cuando la máquina se mueve en una trayectoria predeterminada. En el centro del Laser tracer se encuentra una esfera de referencia, que es a su vez el centro de rotación. Dicha esfera sirve como reflector del interferómetro y gracias a su diseño, la esfera permanece aislada mecánicamente y térmicamente, haciendo así más estables las mediciones cuando la máquina se encuentra en movimiento.

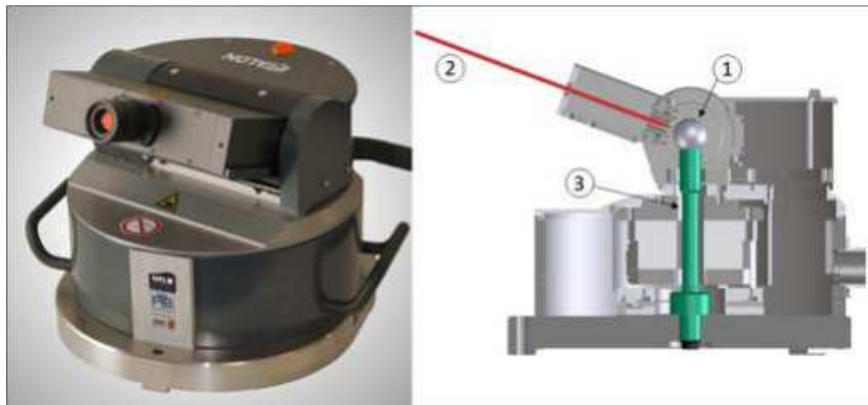


Figura 2.2.2-1 Un laser tracer por dentro y por fuera

Suele encontrarse con un software interno en el sistema que genera automáticamente un ciclo de medición adecuado para el ensayo de la máquina herramienta, y luego, guía al usuario en simples pasos a través del proceso de

prueba. Es significativamente más rápido que los actuales métodos tradicionales, ya que puede encontrar los errores de todos los ejes en torno a las 2 o 4 horas, sin necesidad de que sea alguien especializado el que realice las mediciones. El laser tracer puede determina los errores de posición, rectitud, perpendicularidad, cabeceo, guiñada y balanceo de todos los ejes de la máquina con una precisión inferior a la micra.

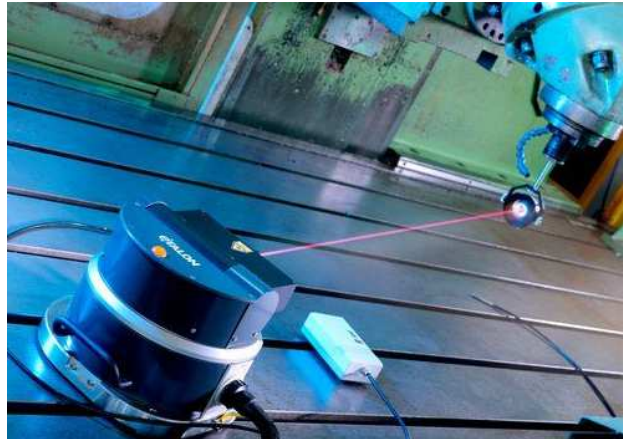


Figura 2.2.2-2 Un laser tracer usado en una máquina herramienta

2.2.3. Laser Tracker

El sistema de seguimiento láser (laser tracker) nace de la necesidad de medir piezas de gran tamaño. Antes sectores como el aeronáutico, podían tardar varios días para verificar cada una de sus piezas, con este sistema son capaces de recopilar cientos de puntos en horas. Por ello, este sistema se ha convertido en su principal método de control de calidad. Un láser tracker puede montarse en cualquier sitio, en un estudio de diseño o una fábrica, y su enorme rango operativo permite capturar medidas de distancias de hasta 80 metros, con precisiones de hasta 10 μm en dicha distancia con los modernos sistemas.

El funcionamiento del instrumento es sencillo. El sistema se monta en un trípode y emite un láser que se refleja en un objetivo ubicado en el punto que va a medirse. El laser tracker usa como palpadores unas esferas con un retrorreflector incluido llamadas SMR (Spherically Mounted Retroreflector). A medida que el operario desplaza el objetivo de un punto a otro, el sistema envía un haz de láser al reflector esférico, y a través de ondas luminosas se calcula la distancia entre el tracker y el espejo reflector, este cálculo de cada

punto, puede alcanzar una precisión de hasta los 0,003 mm. Así el tracker indica en tiempo real la posición del reflector.

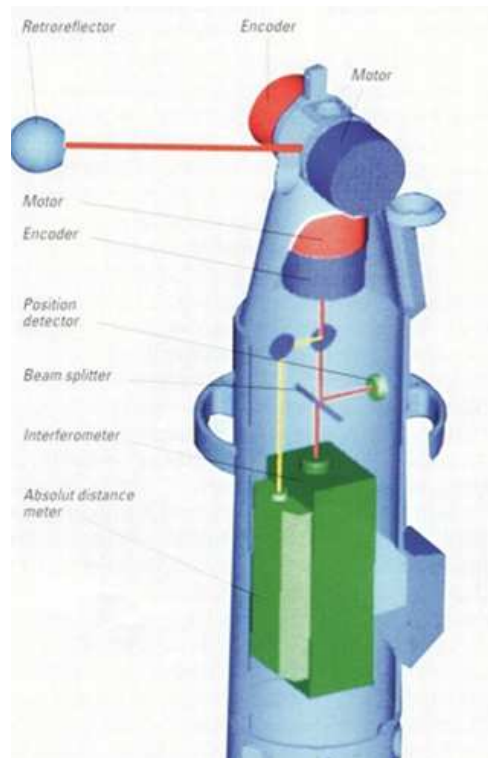


Figura 2.2.3-1 Partes de un láser tracker

El seguimiento se consigue mediante un elemento, que se compone de un fotosensor PSD (Positioning Sensing Device) de dos ejes situado detrás del interferómetro y que recibe una parte del rayo reflejado. Este fotosensor calcula el error del rayo reflejado por comparación entre la posición actual del rayo en el sensor y su posición teórica, el centro del mismo. De esta manera, se manda a los motores la señal del movimiento que deben realizar para colocar el punto reflejado en el centro del PSD y por tanto para seguir el movimiento del reflector. Este proceso se repite mil veces por segundo, de forma que el haz de láser no pierda el SMR, incluso cuando éste está en movimiento. Por lo tanto el rayo láser se desplaza hacia el usuario y no al contrario.



Figura 2.2.3-2 A la derecha funcionamiento del seguidor, a la izquierda reflectores del laser tracker

El sensor dispone de rotación telescópica, puede medir una cúpula horizontal completa de 360° y una vertical de 290° . La utilización de un diseño completamente sellado significa que este sensor puede instalarse en los entornos más implacables, incluso bajo la lluvia. Dispone de sensores que compensan automáticamente los cambios medioambientales, como son la temperatura ambiente, la presión y la humedad.

Además lo que hace interesante este sistema láser es que pueda medir en una máquina herramienta, basta con colocar el retroreflector en el cabezal de la misma. Una vez instalado, el láser tracker se emplea para medir todos los detalles y puntos de referencia, para luego compararlo con los medidos por la máquina.

2.2.4. Palpador MT-Check

El sistema MT-Check ofrece un principio de medición simple pero a su vez muy fiable. Las desviaciones geométricas son determinadas mediante la medición de una barra de bolas calibrada, usando una sonda de auto-centrado que mide en las posiciones en X, Y y Z simultáneamente, en una sola medida. Para la toma de medidas basta sólo un par de minutos y muestra directamente los errores de posicionamiento y los de rectitud. Este palpador es una evolución del palpador lineal desarrollado en la Universidad de Zaragoza y utilizado en este proyecto.

La barra calibrada de referencia contiene bolas de precisión de 22 mm de diámetro. Únicamente hay que colocarla paralela a los ejes de la mesa de la pieza de trabajo sin realizar ningún otro tipo de ajuste, y el palpador mide la

posición relativa del centro de la esfera en ejes X, Y y Z. El material de la barra es el carburo de silicio y dependiendo la máquina en la que la usemos, elegiremos un número y un espaciado distinto entre las bolas de precisión.



Figura 2.2.4-1 Palpador MT-Check

El palpador contiene tres elementos planos que se ponen en contacto con las bolas calibradas. Estas bolas al entrar en contacto con el palpador, hacen que tres sistemas de medición de alta precisión controlen los desplazamientos de los tres elementos planos durante el movimiento. De esta manera, se conocen las coordenadas X, Y y Z del centro de las esferas y se puede determinar con precisión sub-micra. El grado de precisión se consigue mediante la combinación de un sofisticado diseño de la sonda, ya que se desarrollo de tal manera que tuviera estabilidad térmica, con una configuración de calibración avanzada para minimizar los errores del palpador de medición.

Para analizar los datos, el palpador se conecta a través de un cable a cualquier ordenador portátil con conexión USB. El palpador trae consigo un software diseñado específicamente para el análisis del rendimiento de la máquina herramienta. Este software es fácil de usar y permite un rápido análisis gráfico de las mediciones y ofrece muchas características. Estas son lecturas del palpador en línea, la ejecución manual y automática de las mediciones, la generación de código de control numérico, análisis y evaluación de los datos de medición.



Figura 2.2.4-2 Palpador MT-Check midiendo una barra de bolas calibrada

2.2.5. Ballbar telescópico (DBB)

El ballbar adquiere importancia a partir de los trabajos de James B. Bryan en el Laboratorio nacional Lawrence Livermore en los EE.UU., tras patentar la 'Sonda magnética telescópica para ensayos de Ball Bar' en 1984. Los ballbar son utilizados por muchos miles de operarios de Máquinas-Herramienta de todo el mundo, y son considerados equipos imprescindibles por los principales fabricantes, distribuidores y proveedores independientes de servicios de calibrado.

El ballbar telescópico realiza una comprobación rápida y sencilla del rendimiento de posicionamiento de una máquina de control numérico según los estándares internacionales más reconocidos y permite comparar y analizar el rendimiento de las máquinas para diagnosticar rápidamente los problemas que necesitan mantenimiento.

Los ensayos de ballbar periódicos en la máquina permiten garantizar piezas precisas desde el primer momento, reducir el tiempo de inactividad de la máquina, los costes de inspección y las piezas desechadas y demostrar el

rendimiento y cumplimiento de los estándares de control de calidad de la máquina.

El sistema de ballbar se compone de un sensor lineal telescópico de alta precisión con bolas de precisión en sus extremos, colocado en el interior de la barra telescópica, y montajes magnéticos de precisión, uno (ajustable) sujeto a la mesa de la máquina y el otro al husillo de o al cabezal de husillo de la máquina. Durante el funcionamiento, las bolas del sensor se colocan cinemáticamente en las copas magnéticas. Mediante esta disposición, el ballbar puede medir las variaciones de radio mientras la máquina recorre una trayectoria circular programada alrededor de un montaje en la mesa de la máquina. De esta manera, se miden y diagnostican algunos errores geométricos tales como rectitud y perpendicularidad además del comportamiento dinámico de la máquina, pudiendo analizar también el comportamiento de sus accionamientos de la máquina y de su sistema de control.



Figura 2.2.5 Ballbar telescópico, con ambos cabezales

La principal limitación de este sistema es la dificultad de separación de las diversas fuentes de error, en cuanto a los errores geométricos. Este sistema presenta otras desventajas a la hora de usarlo:

- El radio del círculo generado está limitado por la longitud de la barra (mínimo 50 mm).
- La fricción de las esferas en los apoyos limita la velocidad de avance de la barra, lo que conlleva menos precisión a la hora de analizar el comportamiento dinámico de la máquina.
- Solo permite trayectorias circulares.

Los datos se recogen y se envían a un PC, donde el software calcula las mediciones globales de precisión de posicionamiento (circularidad, desviación circular). Este informe se basa en un análisis aritmético exclusivo para diagnosticar muchos errores de máquina individuales a partir de una serie de lecturas lineales. En general, el uso del ballbar telescópico se recomienda usarlo de forma complementaria al interferómetro láser, de modo que cuando el ballbar nos de alguna medida anómala, se utilice el interferómetro.

Existe una variante denominada Laser Ball Bar (LBB) que utiliza un sistema de medición por interferometría láser dentro de la barra telescópica para aumentar la precisión de la medida. El principal inconveniente es que el coste de este sistema es mayor que el del DBB tradicional.

2.2.6. Cross Grid Encoder (KGM)

La técnica Cross Grid Encoder (Kreuz Gitter Messsystem: KGM) es un sistema dinámico de verificación de máquina herramienta que mejora los problemas de fricción mecánica de un sistema Ball-bar tradicional. Con el sistema de medida KGM es posible realizar una verificación dinámica de la precisión en máquinas herramienta con control numérico. Las ventajas del KGM es la ausencia de contacto para la medición, lo que elimina la influencia de rodamientos tal y como sucede con los DBB.

El KGM consiste en una placa graduada con una retícula en forma de rejilla. Esta placa está integrada en una base y acompañada por un cabezal captador. Durante la medición, el cabezal captador se desplaza sobre la placa graduada sin contacto mecánico. En la instalación, la base del KGM se monta sobre el elemento de soporte de pieza (la mesa de un centro de mecanizado) y se

alineado. El cabezal captador es montado en el elemento que sostiene y bloquea las herramientas (el husillo del centro de mecanizado) y es alineado aproximándolo a la placa graduada. Un folio espaciador es empleado para dejar un espacio de $0,5 \pm 0.05$ mm entre la placa y el cabezal captador. El ajuste fino se obtiene cuando se optimizan las señales de medición mediante los tornillos que incorpora el cabezal captador, estas señales se visualizan con la ayuda de un software de evaluación, que evalúa los valores medidos.

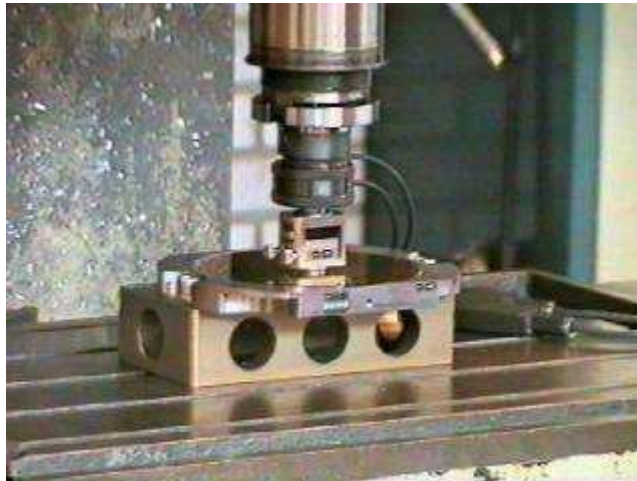


Figura 2.2.6 Cross Grid Encoder

Las principales ventajas del sistema son:

- Medición sin contacto, la cual elimina la influencia del rozamiento de las bolas que se produce en el DBB, permitiendo realizar la medición a mayor velocidad y con alta precisión (la interpolación electrónica permite alcanzar resoluciones de 10nm).
- Permite realizar círculos con pequeños radios (desde 115mm a $1\mu\text{m}$) para aislar el comportamiento dinámico de los errores geométricos de la máquina. Cuando el radio es pequeño ($<50\text{mm}$) la influencia de la geometría sobre los resultados de la medida es insignificante.
- Permite trazar diferentes trayectorias para determinar distintas fuentes de error de movimiento (círculos y arcos, ángulos rectos, cóncavos, conexión de dos arcos) e incluso permite programar las trayectorias necesarias en el mecanizado de una pieza.

Al igual que el sistema DBB, de cara a la determinación de errores geométricos, tiene la desventaja de que es difícil la separación de las diversas fuentes de error.

2.2.7. HMS (Head Measuring System)

En el 2005, la empresa Fidia presentó este nuevo dispositivo de medida y calibración para máquinas equipadas con cabezales bi-rotativos. El dispositivo ha sido desarrollado para solventar el problema de calibración en los cabezales de 5 ejes en general.

Este nuevo sistema pretende establecer un proceso simple y automático en la corrección de los cabezales bi-rotativos, pudiendo ser utilizado de forma fácil y simple por el operario de la máquina cuando se estime necesario. El ciclo de calibrado, configurable de acuerdo al tipo de cabezal y a los requisitos del usuario, emplea un máximo de 40 minutos para una calibración completa y cuestión de minutos para la medición de ejes específicos. Puede ser utilizado por personal inexperto gracias a un sencillo Interface y a la rápida ejecución de los ciclos de medición y calibración de modo automático.

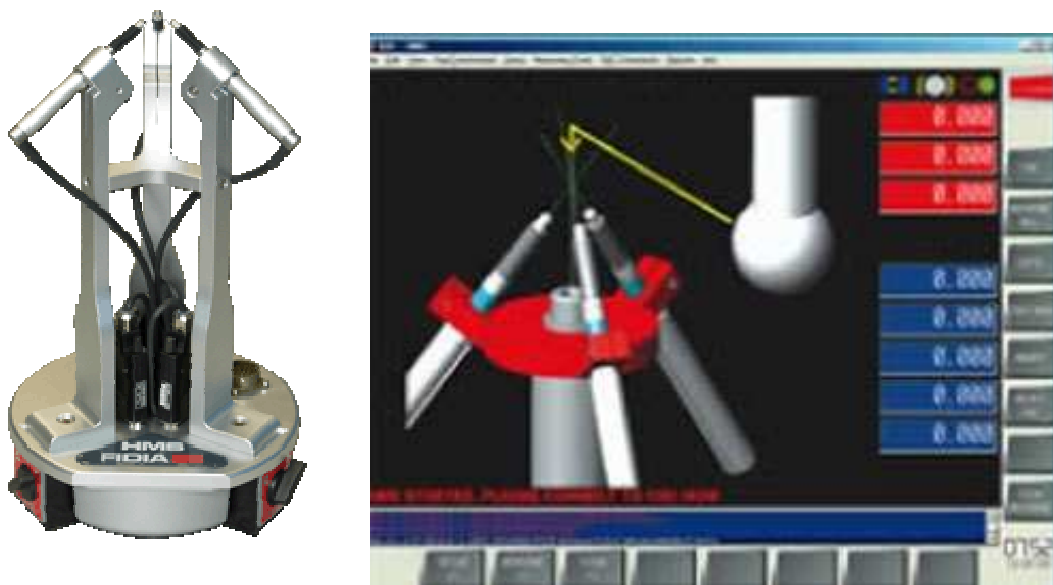


Figura 2.2.7-1 A la izquierda el dispositivo HMS, a la derecha el Interfaz que utiliza.

Para su funcionamiento, se debe fijar el dispositivo HMS sobre la mesa de trabajo de la máquina a través de unos cómodos magnetos, después se debe

MEMORIA

alojar una herramienta patrón en el cabezal de la máquina. A continuación debemos activar el interface y mover la máquina hasta que la herramienta patrón haga contacto con los tres sensores del dispositivo.

A partir de este momento, el ciclo de calibración para el auto-centrado se realiza mediante procedimientos automáticos del control numérico (el tiempo del ciclo es de 10 minutos). Durante este ciclo de auto-centrado el CNC reconoce la posición de la esfera de la herramienta patrón de acuerdo a la información recibida de los sensores. Una vez finalizado este ciclo, la máquina está lista para su medición y calibración.

Los ciclos automatizados incluidos en los algoritmos software permiten, mediante una serie de comprobaciones, determinar los errores geométricos y de posicionamiento. El CNC realiza, en este caso, las compensaciones necesarias y muestra los gráficos en tiempo real de lo que está sucediendo en el ciclo. Para cualquier análisis o documentación adicional requerida, el control numérico puede generar informes de las verificaciones y de las acciones correctivas realizadas. El rango de precisión de este sistema de medición es comparable al obtenido mediante los interferómetros láser.

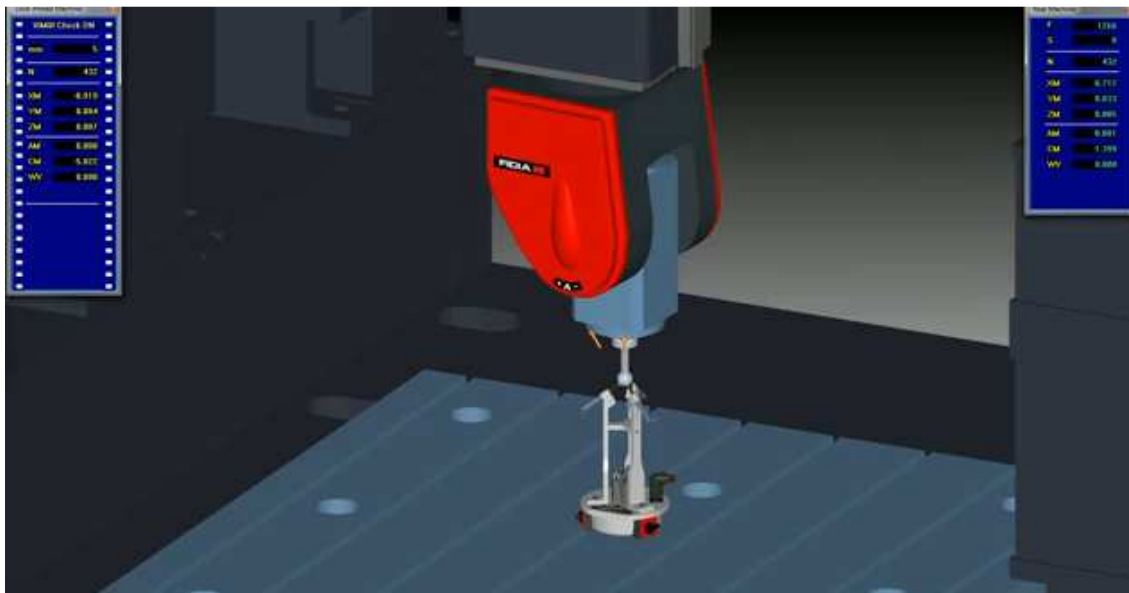


Figura 2.2.7-2 Utilización del sistema HMS

3. PALPADOR LINEAL

3.1. Descripción

El palpador es un diseño que fue realizado en el proyecto europeo MT-Check, en el que participó el área de ingeniería de los procesos de fabricación de la universidad de Zaragoza, en colaboración con otras entidades europeas.

El palpador lineal se trata de un sistema de medida directa que determina el centro de una esfera a través del contacto físico entre ésta y unos sensores de desplazamiento lineal que incorpora. El palpador se compone de unos sensores lineales, un soporte para los mismos, una pieza central para el amarre a máquina herramienta, una carcasa de protección y una tapa, como piezas más importantes.

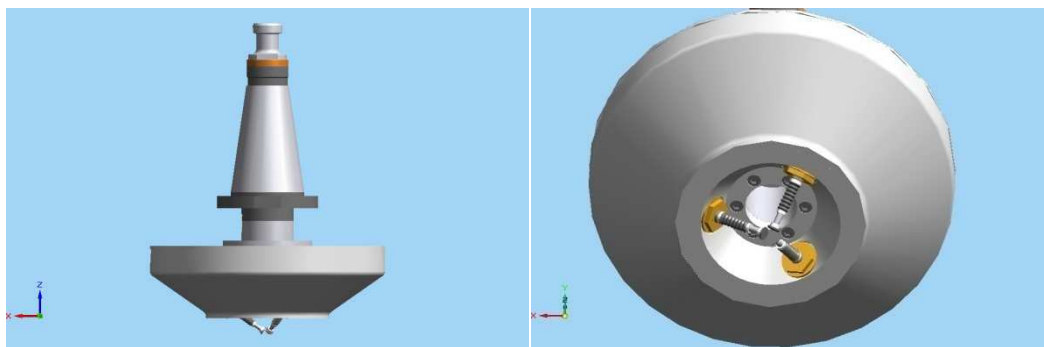


Figura 3.1-1 Palpador lineal completo y posición de los sensores

Los sensores son la parte esencial del palpador, este integra tres de ellos, ya que dado el radio de la esfera a palpar, es necesario conocer mínimo tres de sus puntos para determinar el centro. Estos están dispuestos según una configuración óptima que minimiza los errores en la obtención de los centros, estando colocados de tal manera que las proyecciones de sus ejes sobre el plano horizontal forman 120° entre sí y que dichos ejes se encuentren elevados un ángulo de 35° respecto a la horizontal.

Los sensores que contiene el palpador son encoders lineales. Se tratan de un sistema de palpado completo en los que se mide el desplazamiento de una punta móvil que está unida a una unidad de lectura a través del vástago, el cual se mueve guiado por un rodamiento lineal con respecto a la carcasa, solidaria a

la cual se encuentra una regla de vidrio graduada que interpreta la medida. El sistema posee un muelle de retorno a la posición inicial. El palpador monta además, en su parte final, parte de la electrónica necesaria para el tratamiento y acondicionamiento de la señal. Estos sensores tienen un buen comportamiento ante esfuerzos de flexión, son estables en cuanto a los cambios de presión atmosférica, humedad y temperatura y son poco sensibles a las vibraciones y los golpes, lo que los hace ideales para entornos de trabajo hostiles.

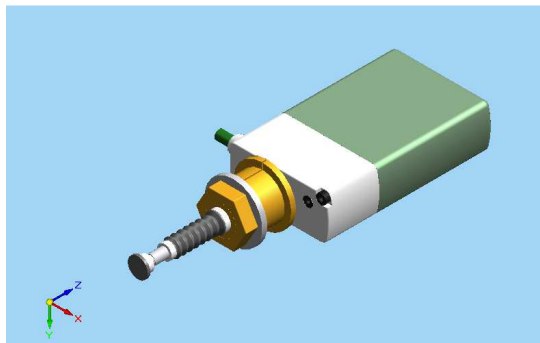


Figura 3.1-2 Encoder lineal

La pieza central se creó para un montaje lo más rápido posible del palpador en una fresadora, dado que los ensayos posteriores se llevarían a cabo en una de ellas. Para unir el palpador a la fresadora se utiliza un sistema de sujeción similar al que utiliza la máquina, para ello se utiliza un cono para mangos de herramienta estándar. Dicho cono es el que une a la máquina herramienta con el palpador, colocando una pieza intermedia entre ambos, esta pieza es también estándar y se trata de un adaptador en bruto con posibilidad de mecanización, aunque para dicho palpador no fue necesario. De esta manera se consigue tener también versatilidad para su fácil adaptación a cualquier sistema de fijación a máquina mediante sencillos utillajes.



Figura 3.1-3 Sistema de amarre cono para fresadora y adaptador en bruto

El palpador utiliza un modelo matemático para relacionar las lecturas de los sensores y obtener las coordenadas del centro de la esfera, este modelo es llamado modelo geométrico. Este modelo utiliza unos parámetros geométricos del palpador previamente obtenidos en un proceso de medición en la máquina de medir coordenadas. Este modelo se basa en intersecciones entre las rectas que marcan las direcciones de los sensores y los planos que definen las puntas de los mismos. Hallando los puntos de intersección y trasladándolos las distancias adecuadas en función de las lecturas de los sensores, se calcula finalmente el punto de intersección de tres planos que marca el centro de la esfera patrón buscada con respecto a un sistema de referencia global.

3.2. Ensayo y calibración del palpador lineal

La calibración del palpador lineal persigue conocer sus errores de medición en cada eje dentro de su rango de medida. Con ello se pretende comprobar su precisión y su repetibilidad. La calibración de este tipo de palpador está basada en la utilización de un sistema específicamente diseñado para ello, que consiste en patrón de calibración y un dispositivo de ensayo, detallado a continuación. También en las siguientes hojas se analizan los resultados y conclusiones extraídas de los procesos de ensayo.

3.2.1. Cubo de calibración y plataforma

El sistema completo consiste en un cubo calibrado y una plataforma sobre la cual se apoya. El cubo, contiene en cada una de sus seis caras, una esfera patrón de 22 mm de diámetro. Dichas esferas se encuentran descentradas respecto del punto medio de cada cara, desplazadas en los tres ejes dentro del campo de medida de los palpadores, que es $\pm 2\text{mm}$ en cada eje cartesiano. Además, el cubo posee en cada una de sus caras seis parejas de esferas de menor tamaño que se utilizan para posicionarlo sobre la plataforma base. La plataforma, a su vez, dispone de tres cilindros colocados sobre el plano de su superficie formando 120° entre sí, en estos cilindros es donde apoyan las parejas de esferas pequeñas del cubo. Al haber tres cilindros, sólo tres parejas apoyan al mismo tiempo, lo cual asegura un acoplamiento cinemático entre el

cubo y la plataforma, lo cual proporciona una excelente repetibilidad de posicionamiento.



Figura 3.2.1-1 Cubo de calibración y plataforma

Por lo tanto, se tienen 6 esferas que al girar las caras, cada una puede colocarse en 6 posiciones diferentes en función de cómo se apoyen las parejas de esferas. Con ello se obtienen un total de 36 posiciones de una esfera patrón de 22 mm de diámetro cubriendo puntos de todo el campo de medida del palpador (± 2 mm en cada eje). De este modo sólo es necesario calibrar inicialmente esas 36 posiciones en una MMC para obtener las coordenadas patrón, para después, compararlas con las obtenidas por los palpadores en el proceso de calibración.

La diferencia de posición se consigue de diferentes formas. Primero en X e Y se consigue desplazando (una distancia r) la posición de la esfera con respecto al centro geométrico de cada cara. De esta manera, en función de la posición en la que se orienta el cubo se tienen diferentes valores de X e Y. Para conseguir diferentes valores en Z se utilizan dos sistemas:

- Las esferas patrón se montan en el cubo con diferentes distancias en cada cara entre sus centros y la superficie de la misma.
- Para conseguir dos alturas diferentes en cada cara se utilizan las esferas de apoyo, de 5 mm de diámetro cada una. Estas están separadas entre sí 120° y apoyan 3 parejas en cada movimiento, formando un grupo. Para conseguir que la posición de la esfera patrón

varíe en Z en una misma cara la separación entre las esferas de apoyo es diferente en cada uno de los dos grupos, formando ángulos de 18° y 36° .

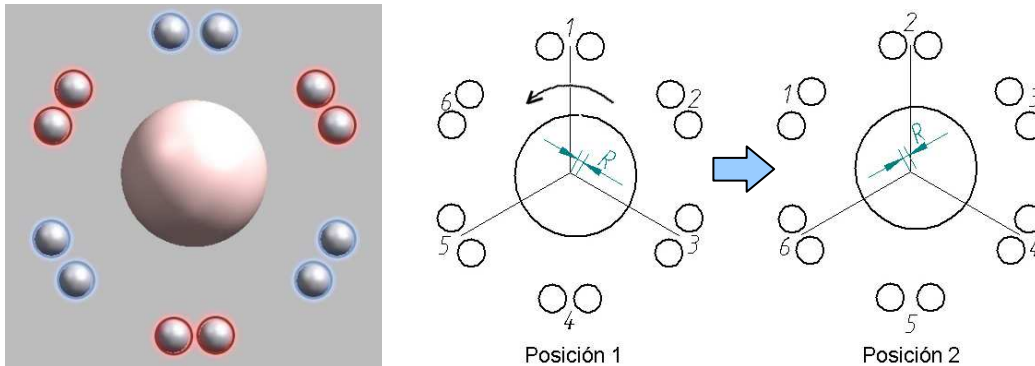


Figura 3.2.1-2 Disposición de las esferas patrón y de apoyo e identificación de las posiciones

A las posiciones de las esferas se le asigna un número del 1 al 6 y a cada pareja de esferas se le asigna una letra, de esta manera las posiciones de las esferas están perfectamente identificadas.

Con todo lo comentado, en la Tabla 3.1 pueden verse los diferentes rangos de medición cubiertos por cada cara del cubo tanto en el plano XY como en Z.

Cara del cubo	r (mm)	Valores de Z (mm)
1	0,3	+0,1 ~ +0,5
2	0,6	-0,3 ~ -0,7
3	0,9	+0,8 ~ +1,2
4	1,3	-1,0 ~ -1,4
5	1,7	+1,5 ~ +1,9
6	2,0	-1,6 ~ -2,0

Tabla 3.2.1 Rangos de diseño de las esferas del patrón autocentrante

Los cilindros de la plataforma poseen un diámetro de 5 mm, idéntico al que utilizan las esferas de referencia. Ambos son de carburo de tungsteno, evitando el desgaste por el uso. Ésta dispone además de tres imanes de Neodimio que quedan enfrentados a las tres parejas de esferas que no apoyan en los cilindros. La misión de los imanes es atraer el cubo asegurando que se realiza el contacto entre las esferas y los cilindros, lo cual es fundamental para obtener

repetibilidad en el posicionamiento. El centro de la plataforma contiene un agujero pasante que sirve para contener a la esfera de la cara opuesta a la que se está midiendo. Con este tipo de acoplamiento cinemático, conseguimos un sistema de posicionamiento con una repetibilidad sub-micrométrica.

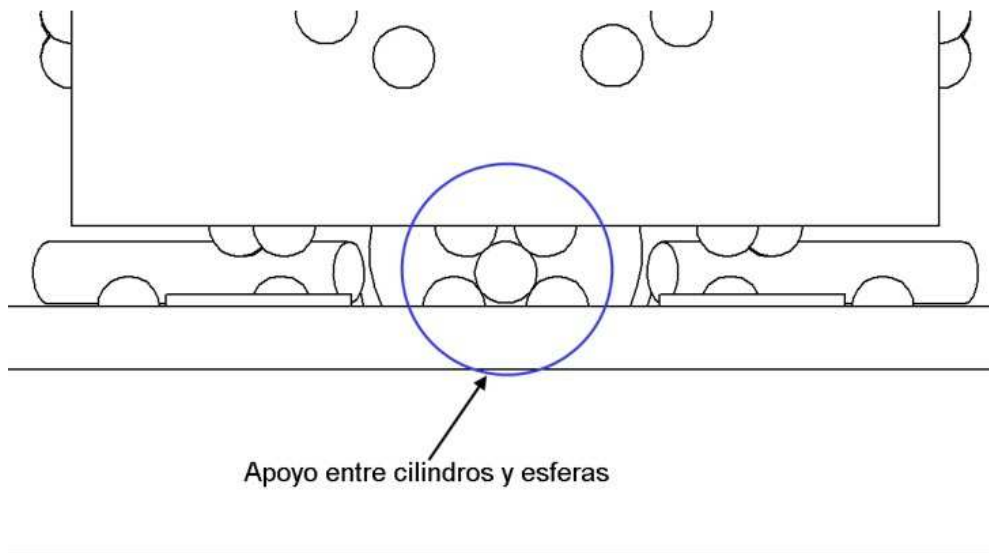


Figura 3.2.1-3 Contacto entre esferas y cilindro

3.2.2. Medición del cubo de calibración

Para realizar la medición de todas las posiciones del cubo se utiliza una máquina de medir por coordenadas, así obtenemos los valores reales de las coordenadas, con las cuales se podrá analizar el comportamiento del palpador lineal. En el presente proyecto, estas medidas no han sido realizadas sino que se han obtenidas de mediciones anteriores. Estas medidas se han elegido controlando el rango de temperatura que manejamos, con el que se midió anteriormente, ya que puede influir notablemente, este rango de temperatura es de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para la medición de la esfera patrón de 22 mm se utilizó una sonda VAST XT de Zeiss. Con la creación de un programa en Calypso, los tiempos de medición no superaban los 15 minutos, midiendo el cubo nueve veces por esfera. Además, se seleccionó una posición de referencia (la 1B) y cada vez que se cambiaba de cara el cubo se media dicha posición, de esta manera podían conocer las variaciones sufridas por la temperatura y corregirlas.

Aplicando todo esto se consiguió las coordenadas reales de las 36 posiciones de los patrones, lográndose errores máximos dentro del rango $\pm 1 \mu\text{m}$. A continuación pueden verse dichas medidas.

Posición	Coordenadas cubo respecto del sistema referencia plataforma (mm)		
	X	Y	Z
1A	0,004	0,196	73,863
1B	0,244	0,359	74,258
1C	0,258	-0,029	73,863
1D	0,280	-0,320	74,257
1E	-0,063	-0,136	73,863
1F	-0,327	-0,010	74,258
2A	0,118	0,442	74,536
2B	0,577	0,515	74,937
2C	0,414	-0,250	74,536
2D	0,248	-0,686	74,938
2E	-0,332	-0,161	74,536
2F	-0,628	0,200	74,938
3A	0,015	0,760	73,041
3B	0,700	0,588	73,390
3C	0,742	-0,322	73,041
3D	0,250	-0,830	73,391
3E	-0,559	-0,411	73,041
3F	-0,753	0,269	73,391
4A	0,097	1,174	75,193
4B	1,166	0,690	75,570
4C	1,059	-0,598	75,193
4D	0,105	-1,283	75,571
4E	-0,957	-0,546	75,193
4F	-1,073	0,622	75,570
5A	-1,504	-0,152	71,889
5B	-0,773	1,581	72,239
5C	0,712	1,448	71,888
5D	1,847	-0,053	72,239
5E	0,990	-1,271	71,890
5F	-0,878	-1,504	72,239
6A	-1,871	-0,173	75,917
6B	-0,945	1,685	76,291
6C	0,877	1,780	75,916
6D	2,023	0,047	76,292
6E	1,195	-1,577	75,917
6F	-0,882	-1,702	76,292

Tabla 3.2.2 Coordenadas de las esferas en las 36 posiciones del cubo.

3.2.3. Dispositivo de ensayo

El dispositivo de ensayo o “Test Set-Up” (TSU) se fabricó en un anterior proyecto. Este sistema surge por la necesidad de analizar con suficiente

fiabilidad la repetibilidad de los prototipos diseñados. En un principio se consideró la posibilidad de ensayar los dispositivos en MMC; sin embargo, se desechó esta idea porque las MMC permiten conocer donde se encuentra su punta palpadora en cada momento con gran precisión, pero no posee una buena repetibilidad de posicionamiento.

Podemos distinguir tres zonas fundamentales en el dispositivo:

- Zona inferior: En ella se aloja y se fija la plataforma de calibración a un disco inferior. Éste tiene la misión de servir de base a todo el sistema a través de unas columnas, las cuáles dan rigidez a todo el sistema y son los elementos que hacen de guía de la estrella en sus ascensos y descensos. Las columnas, además, soportan el disco intermedio y en su parte superior se monta una tapa que servirá de base para el motor.
- Zona intermedia: Contiene un disco que tiene la misión de servir de apoyo a la estrella, limitando de esta forma la distancia disponible entre el punto de apoyo del palpador y el cubo. Tiene pegados tres cilindros a 120° (acoplamientos cinemáticos) que se utilizan para garantizar un posicionamiento repetible de la estrella sobre él y, de esta forma, asegurar que el palpador mide siempre desde el mismo punto. La estrella es la pieza en la que se monta el palpador y a la que el sistema de elevación desplaza a lo largo de las columnas. Tres de sus brazos, en los que se introducen unos casquillos de teflón, son los que deslizan a lo largo de las columnas. En los otros tres en su parte inferior hay sendas parejas de esferas que se utilizan para posicionar la estrella, y por tanto el palpador, sobre los cilindros del disco intermedio
- Zona superior: sobre el disco superior colocado en el extremo de las columnas, se dispone de un sistema de elevación que permite la automatización del proceso de calibración proporcionando y controlando el movimiento ascendente y descendente de los palpadores. El sistema consta básicamente de un motor con un sistema reductor y de transmisión del movimiento, el cual por medio de una serie de piezas se

une a la estrella del sistema y hacen por tanto posible el movimiento guiado del palpador.

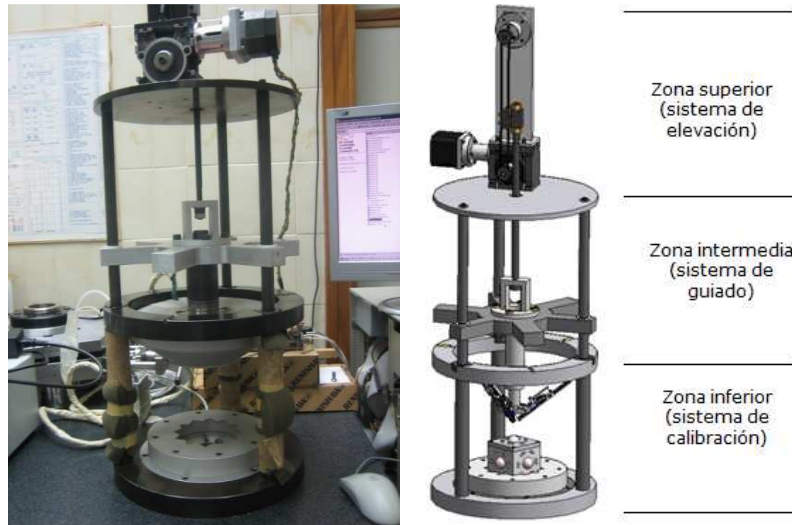


Figura 3.2.3 Dispositivo de ensayo o Test Set-up

3.2.4. Montaje del palpador y desarrollo del ensayo

El dimensionado del sistema de ensayo se llevo a cabo teniendo en cuenta el tamaño de palpadores anteriores y de la distancia entre su cara superior (que hace tope con la estrella una vez montados) y el centro teórico de una esfera en posición nominal. Esa distancia es de 107,5 mm en el palpador lineal y para corregir esa diferencia, se utiliza un adaptador de extensión Varilock de 60mm. De esta manera se consigue que el palpador tenga teóricamente la misma longitud que los otros palpadores y pueda medir todas las posiciones del cubo de calibración.

Para realizar los ajustes necesarios y conseguir que el palpador pueda medir todas las posiciones del cubo de calibración, se miden las posiciones de mayor y menor valor en el eje Z y se comprueban que los sensores de medición que incorporan estén dentro de su rango. Esto es crítico para nuestro palpador autocentrante ya que lleva integrados unos PSD que han sido caracterizados en $\pm 3,75$ mm, por lo tanto es necesario que los tres sensores estén siempre en ese rango de medición.

El dispositivo de ensayo se completa con un programa informático implementado en Visual Basic que permite automatizar el procedimiento de

ensayo y calibración reuniendo en una sola aplicación todo lo necesario para la realización de los mismos y la obtención de resultados.

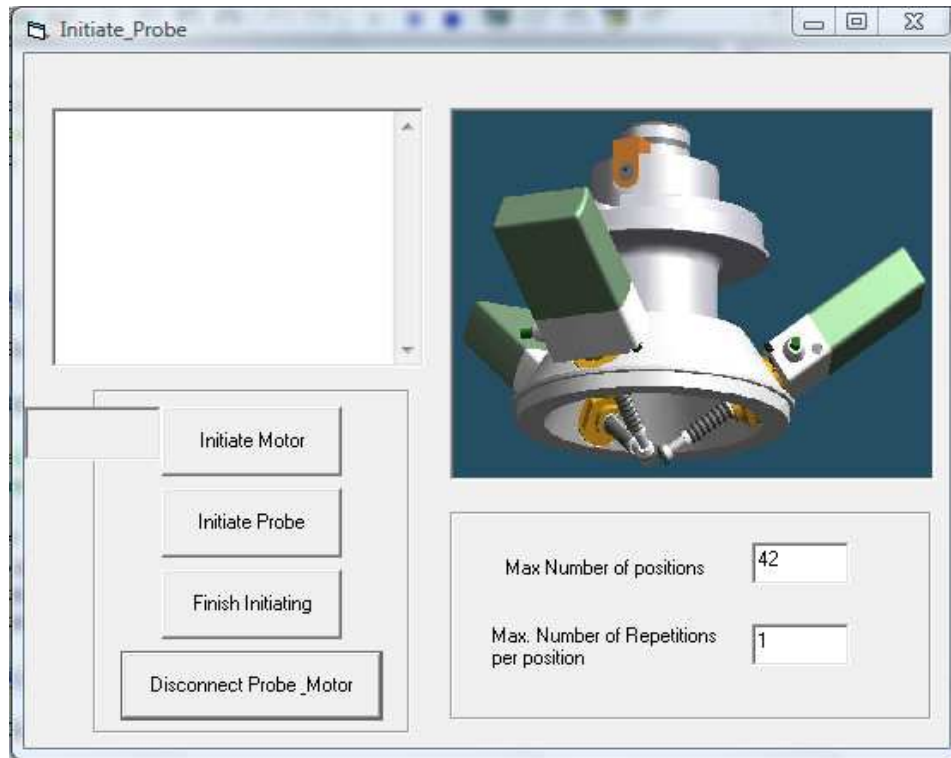


Figura 3.2.4-1 Formularios de inicialización del programa del ensayo

La figura 3.2.4-1 nos muestra la pantalla que aparece al ejecutarse la aplicación. En la parte inferior derecha aparecen dos cajas de texto: en la primera (Max Number of positions) el usuario determina el número de posiciones del cubo patrón a medir. En nuestro caso el número de posiciones es 42, las 36 posiciones del cubo, mas la posición 1B medida al principio y al finalizar la prueba, además de cada vez que cambiamos el cubo de posición. En la segunda caja (Max Number of Repetitions per position) se indica el número de mediciones a realizar de una posición antes de pasar a la siguiente, que serán 10 para asegurar la repetibilidad de la medición.

Posteriormente, mediante la pulsación de los botones del formulario se realizan las acciones que se describen a continuación:

- Initiate Motor (Botón de iniciación del motor). Este botón sirve para abrir el puerto de comunicación entre el motor y el PC, y poder realizar los movimientos de subida y bajada del palpador que se le indiquen.

- Initiate Probe (Botón de iniciación del prototipo). Abre la comunicación con la tarjeta para PC a la que se conectan los sensores (tarjeta Orbit Network). También sirve para indicar (mediante un mensaje en el cuadro de texto colocado sobre los botones) que se debe realizar la inicialización de los encoders. Es necesario comprimir el vástago de cada sensor en el orden indicado en dicho cuadro de texto para su identificación y su puesta a cero asumiendo la posición en la que se encuentran como posición de referencia.
- Finish Initiating (Botón de finalización de la inicialización). Lee los valores introducidos por el usuario en las cajas de texto del formulario y abre el libro de Excel para la toma de datos.
- Disconnect Probe_Motor (Botón de desconexión). Desconecta la tarjeta correspondiente y el motor. Este botón se integra por si el usuario desea salir de la aplicación sin realizar la calibración.

The screenshot shows the 'Cube_Positions' application window. It features a top toolbar with buttons: 'Probe UP', 'Probe DOWN', 'Get Data', 'Accept Measurement', 'Next Position', 'Repeat Measurement', 'Exit', and 'Start'. The main interface is divided into several sections:

- Position and Repetition:** 'POSITION' is set to '1' with a unit 'B'. 'REPETITION' is set to '4' out of '10'.
- Transformation:** A button labeled 'Transformation' is present.
- Coordinates and Differences:**

Axis	Value	Delta
X	-0,1756	0.0000
Y	-0,3470	0.0000
Z	0,0014	0.0000
- LE Values:** Three large text boxes display 'LE 1 8,1386', 'LE 2 6,7895', and 'LE 3 6,1715'.

Figura 3.2.4-2 Interfaz de usuario del programa de toma de datos

Al pulsar el botón de finalizar la inicialización da comienzo la toma de datos. En el siguiente interfaz aparecen diversos botones, aunque a nosotros solo nos interesan unas acciones:

- Probe UP: Este botón produce la elevación del palpador hasta una posición prefijada que permite el cambio de la orientación del cubo sobre la plataforma.
- Probe DOWN: Este botón hace descender el palpador hasta la posición en la que realiza el palpado. El descenso se produce a dos velocidades diferentes: una media al comienzo y otra lenta cuando las esferas se encuentran cerca de hacer contacto con los cilindros. Como resultado de la medición se obtienen las lecturas de los tres sensores del palpador (LE1, LE2 y LE3) en milímetros.
- Accept Measurement: Guarda en la hoja de cálculo las coordenadas obtenidas. También refresca el formulario para realizar la siguiente medición.
- Next Position: Presionándolo se consigue saltar desde la posición actual en la que se encuentre la calibración a la siguiente sin tener que terminar todas las repeticiones de la posición en curso.
- Repeat Measurement: Hace que el motor eleve el palpador para repetir una medición cuando se detecta que ha tenido lugar una desviación relativamente grande (de más de unos pocos μm), debido generalmente a un mal asentamiento del cubo de calibración sobre los cilindros.
- Exit: Desconecta la tarjeta y guardar el fichero Excel en el que se almacenan los datos obtenidos de la medición.

En el archivo de datos de salida se guardan el valor de las lecturas de los sensores, las coordenadas de los centros de las esferas medidas con el palpador en sistema de referencia palpador. Para poder ser comparadas con las mediciones del cubo tenemos que hacer un cambio de base. A continuación se muestran los datos obtenidos en sistema referencia palpador.

Posición del cubo	Sensores del palpador		
	L1	L2	L3
1A	7,856	6,541	6,187
1B	8,268	6,807	6,191
1C	8,078	6,288	6,221
1D	8,341	6,292	6,636
1E	7,823	6,321	6,443
1F	7,823	6,736	6,707
2A	8,316	7,073	6,355
2B	8,915	7,198	6,323
2C	8,606	6,459	6,684
2D	8,729	6,428	7,286
2E	7,989	6,787	6,971
2F	7,951	7,387	7,095
3A	7,358	6,480	5,330
3B	8,129	6,315	5,328
3C	8,025	5,427	5,723
3D	7,858	5,428	6,495
3E	6,968	5,819	6,386
3F	6,962	6,589	6,219
4A	8,622	8,000	6,247
4B	9,746	7,486	6,295
4C	9,532	6,356	6,996
4D	9,013	6,404	8,118
4E	7,880	7,100	7,897
4F	7,920	8,220	7,379
5A	5,519	5,676	5,991
5B	6,205	6,899	4,682
5C	7,223	6,079	3,880
5D	8,455	4,776	4,574
5E	7,639	3,976	5,587
5F	6,324	4,668	6,813
6A	7,519	8,116	8,485
6B	8,363	9,377	7,017
6C	9,634	8,592	5,891
6D	10,904	7,130	6,744
6E	10,123	6,006	8,010
6F	8,649	6,856	9,274

Tabla 3.2.4 Coordenadas del cubo en sistema referencia palpador en mm

Estos datos son las medias de todas las mediciones realizadas después de valorar su repetibilidad y ver que no había ninguna medida anómala. Tras su evolución y depuración de los errores cometidos, podíamos ver que las medidas no oscilaban de $\pm 1 \mu\text{m}$, por lo tanto dábamos por bueno la toma de medidas.

3.2.5. Desarrollo de la matriz de cambio de base

Una vez realizados los ensayos, por un lado se dispone de las coordenadas reales de los patrones en un sistema referencia asociado a la plataforma, y por otro lado las coordenadas calculadas por el palpador en sus propios sistemas. Para poder comparar ambas y calcular los errores de medición de los palpadores es necesario definir una transformación entre sistemas de referencia.

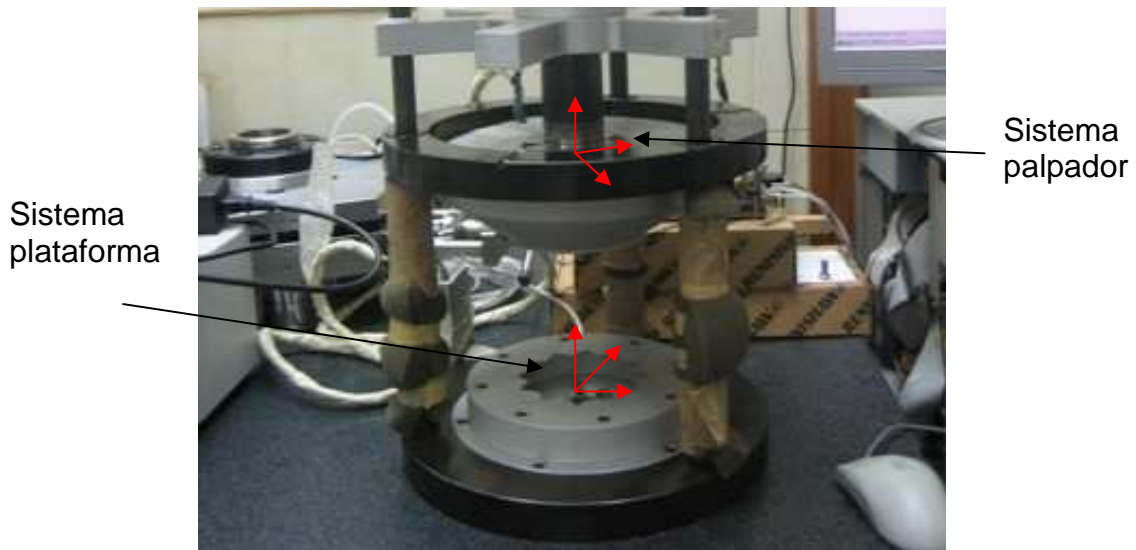


Figura 3.2.5 Representación de los sistemas de referencia de palpador y plataforma

La transformación del sistema de referencia palpador al sistema de referencia plataforma se realiza mediante el giro y la traslación del sistema de partida. Para ello se multiplica el vector de coordenadas de un punto en sistema de referencia palpador por una matriz homogénea que tiene componentes rotacionales y de traslación, como se puede ver en la ecuación (1). Las componentes rotacionales son las encargadas de producir el giro del sistema de referencia sin mover su origen y las componentes de traslación son las que ejecutan el desplazamiento del origen del sistema de referencia.

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{pi} \\ Y_{pi} \\ Z_{pi} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Así, en este caso, lo que se conoce es:

- (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) , que son las coordenadas del punto i en el sistema de referencia palpador.
- (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) , que son las coordenadas del punto i en el sistema de referencia destino.

Lo que se desconoce es:

- (R_{11}, R_{21}, R_{31}) , coordenadas del eje X unitario del sistema de referencia palpador expresadas respecto del sistema de referencia destino.
- (R_{12}, R_{22}, R_{32}) , coordenadas del eje Y unitario del sistema de referencia palpador expresadas respecto del sistema de referencia destino.
- (R_{13}, R_{23}, R_{33}) , coordenadas del eje Z unitario del sistema de referencia palpador expresadas respecto del sistema de referencia destino.
- (T_1, T_2, T_3) coordenadas del origen del sistema de referencia palpador expresadas respecto del sistema de referencia destino.

Se tienen por tanto que determinar 12 incógnitas (las 9 de rotación y las 3 de traslación), y por cada punto medido i se obtienen 3 ecuaciones de la forma (2), (3) y (4). En concreto, cada punto conocido en los dos sistemas de coordenadas da lugar a tres ecuaciones, por lo que con cuatro puntos sería posible calcular de manera determinada la matriz buscada.

$$X_{pi} * R_{11} + Y_{pi} * R_{12} + Z_{pi} * R_{13} + T_1 = X_{ci} \quad (2)$$

$$X_{pi} * R_{21} + Y_{pi} * R_{22} + Z_{pi} * R_{23} + T_2 = Y_{ci} \quad (3)$$

$$X_{pi} * R_{31} + Y_{pi} * R_{32} + Z_{pi} * R_{33} + T_3 = Z_{ci} \quad (4)$$

Sin embargo, para obtener una buena transformación para todo el campo de medida es recomendable ampliar el número de ecuaciones utilizando todas las que resultan de medir los centros de las N posiciones de los patrones. Se consiguen entonces $3 \cdot N$ ecuaciones para las 12 incógnitas, con lo que se tiene un sistema sobredeterminado que no tiene solución analítica sino numérica. La solución no es exacta sino que se ajusta lo mejor posible a las $3 \cdot N$ ecuaciones tratando de minimizar el error cuadrático medio. Expresando las ecuaciones en su forma compacta resulta la siguiente ecuación (5):

$$A_{3N \times 12} * X_{12 \times 1} = B_{3N \times 1} \quad (5)$$

Se trata por lo tanto de un sistema sobredeterminado cuya resolución numérica se realiza mediante el Método de Mínimos Cuadrados. Como resultado se obtienen los valores de la matriz de transformación (R_{11} , R_{21} , R_{31} , R_{12} , R_{22} , R_{32} , R_{13} , R_{23} , R_{33} , T_1 , T_2 , T_3) que minimizan el error. Sin embargo, dichos resultados no pueden ser tomados como finales, sino que se utilizan como valores iniciales de un proceso iterativo de ortogonalización para terminar con la posterior normalización de la matriz. Hay que tener en cuenta que, por definición, una matriz de cambio entre sistemas de coordenadas debe ser ortonormal, y esta propiedad se pierde durante el proceso de cálculo por mínimos cuadrados. Lo que quiere decir que a la matriz ortonormal finalmente obtenida le corresponderán valores de error mayores.

La condición de ortogonalidad queda satisfecha cuando se cumplen las siguientes expresiones:

$$R_{11} * R_{12} + R_{21} * R_{22} + R_{31} * R_{32} = 0 \quad (6)$$

$$R_{11} * R_{13} + R_{21} * R_{23} + R_{31} * R_{33} = 0 \quad (7)$$

$$R_{12} * R_{13} + R_{22} * R_{23} + R_{32} * R_{33} = 0 \quad (8)$$

El proceso iterativo de ortogonalización persigue la búsqueda de los valores de R_{ij} que hacen que se cumplan las anteriores expresiones. Para ello se parte de los valores obtenidos en el paso anterior, valores que, aunque no cumplen las condiciones, deberían encontrarse próximos a ello, por lo que las variaciones

que experimenten serán mínimas. Tras varias iteraciones se obtienen los nuevos valores de R11, R21, R31, R12, R22, R32, R13, R23 y R33 que cumplen la condición de ortogonalidad con el menor error cuadrático posible.

El último paso consiste en la normalización de la matriz, para lo cual tan sólo hay que aplicar la siguiente ecuación a cada columna de la matriz de rotación:

$$R'_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sqrt{R_{1j}^2 + R_{2j}^2 + R_{3j}^2}} \text{ Con } i=1..3 \text{ y } j=1..3 \quad (9)$$

Sin embargo, como efecto secundario, es necesario recalcular las componentes de las traslaciones, para lo cual basta con:

- Aplicar la matriz de rotación a los puntos medidos con el palpador.
- Calcular el valor medio de la traslación asociada a todos esos puntos.
- Calcular el valor medio de las coordenadas reales del cubo.

Y las componentes de traslación de la matriz de transformación serán la diferencia entre ambos valores medios.

El proceso completo de cálculo de la matriz de transformación está implementado en una aplicación programada en Visual Basic. Ésta se utilizó para el análisis de los resultados de medición del palpador desarrollado.

3.3. Resultados del palpador

Como hemos comentado anteriormente, tras haber comprobado que las medidas realizadas nos daban una buena repetibilidad, oscilando un máximo de $\pm 1 \mu\text{m}$, pasamos el programa desarrollado en Visual Basic y obtenemos la matriz de cambio de base. Ahora ya estamos listos para comparar las medidas tomadas con el palpador, con las obtenidas en la máquina de medir coordenadas del cubo patrón. Los resultados por eje son los siguientes:



Figura 3.3-1 Error en el eje X en micras

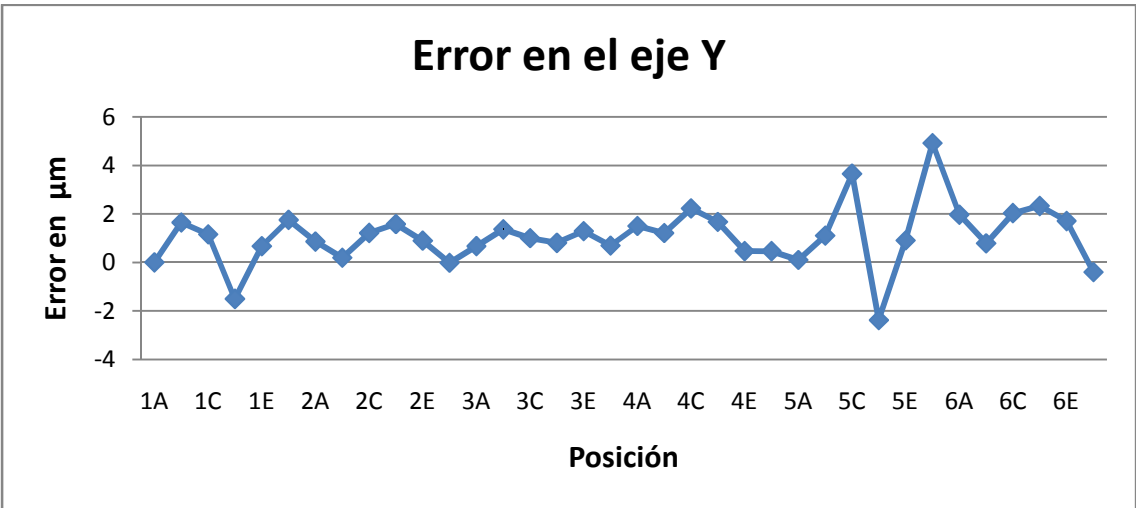


Figura 3.3-2 Error en el eje Y en micras



Figura 3.3-3 Error en el eje Z en micras

MEMORIA

El error cometido máximo es de 5 μm , correspondiente a la cara 5 del cubo patrón. Al comparar dicho error con calibraciones desarrolladas anteriormente, vemos que siempre se produce el mayor error en la cara 5 del cubo, ya que es la medida en la que la bola se sitúa más baja y los sensores del palpador no pueden comprimirse del todo. Por lo tanto desechamos las medidas tomadas de la cara 5, centrándonos únicamente en las cuatro primeras caras que son las más altas y las más fiables, viendo por lo tanto que el error máximo es de $\pm 2 \mu\text{m}$, pudiendo dar como admisible ese error para la utilización del palpador.

4. COMPENSACION ERRORES GEOMÉTRICOS EN MÁQUINA HERRAMIENTA

4.1. Introducción

En la actualidad, casi todos los sectores industriales en auge, como la aeronáutica, utilizan para la fabricación de sus piezas máquinas herramienta. Dichas piezas suelen ser de gran tamaño y el nivel de automatización de las máquinas cada vez es mayor. Se hace notar que la necesidad de la máxima fiabilidad de las piezas fabricadas es esencial. Este requisito implica el uso de sistemas de producción precisos, así como equipos de control dimensional capaces de satisfacer las tolerancias dimensionales requeridas. Además de esto, la aparición de fallos en algunas de estas partes no sólo sería costoso, sino también crítico en términos de seguridad.

La compensación de errores geométricos, tiene como finalidad minimizar la diferencia existente entre la posición final que alcanza la herramienta de la máquina herramienta y la posición teórica programada.

La compensación de dichos errores ha ido siempre ligada a dos técnicas:

- **Métodos volumétricos:** Consiste en medir una nube de puntos distribuidos en el interior del volumen de trabajo de la máquina para obtener información sobre el error global. Partiendo del error obtenido por los puntos y el modelo cinemático de la máquina es posible minimizar el error global de la máquina en los puntos que se consideran. Este método tiene un inconveniente: los resultados no pueden revelar la naturaleza de dichos errores. Esta corrección es, además, eficaz para todo el volumen de trabajo y pero no localmente. Esto puede ser una ventaja si la máquina es estable. Sin embargo, en máquinas de gran tamaño, pueden aparecer deformaciones mecánicas debido a problemas térmicos, por lo que la máquina puede convertirse en otra diferente en cuanto a los errores.

- Métodos geométricos: Consiste en utilizar un aparato calibrado en diferentes posiciones en el volumen de trabajo. Este aparato es medido en una combinación de diferentes posiciones de tal manera, que al compararlas con las medidas que nos da la máquina herramienta, podemos ser capaces de obtener los errores geométricos individualmente. Cuando se utiliza esta técnica en máquinas de gran tamaño, el volumen de trabajo debe ser dividido en partes con el fin de hacer frente a posibles deformaciones mecánicas.

Para la detección de los errores geométricos de las máquinas se pueden distinguir dos métodos, el método directo e indirecto. El método directo estudia el efecto de los errores individualmente y el método indirecto el efecto combinado de los errores.

La medición directa analiza todos los errores de los ejes por separado, independientemente del modelo cinemático de la máquina y el movimiento de los otros ejes. Los métodos para la medición directa están basados en láser o dispositivos multidimensionales, tales como los niveles o medidores electrónicos y las barras telescópicas. El aparato patrón con dimensiones conocidas, debe ser colocado en diferentes posiciones de la máquina herramienta para caracterizar todos los errores. El problema es que la función de aproximación del error obtenido en una posición de la máquina herramienta no son directamente extrapolables al resto del espacio de trabajo. En la actualidad, el sector industrial encargado en la manufacturación, cada vez desarrolla piezas de mayor tamaño con máquinas de mayor alcance, estas requieren costosos sistemas de medición dimensionales para comprobarlas. Estos sistemas de medición limitan el uso de la medición directa y crean la necesidad de utilizar la medición indirecta en este tipo de máquina. La medición indirecta produce una corrección global de los errores de un espacio de trabajo y requiere menos tiempo que la medición directa. Se basa en medir el movimiento de varios ejes de una máquina y para ello se usa métodos basados en la utilización de aparatos que están parcial o totalmente sin calibrar. El método indirecto, se utilizó por primera vez en la identificación de los parámetros cinemáticos complejos, como los de los robots. Con los puntos

elegidos para la medición, distribuidos en el espacio de trabajo, se obtenían una serie de errores puntuales que daban lugar al error global mismo. Estos puntos no son elegidos arbitrariamente, sino que se eligen partiendo de un modelo matemático explicado posteriormente.

El método propuesto en estas hojas se basa en la medición indirecta. A través de una serie de medidas en función del desplazamiento podemos obtener los 21 errores geométricos que influyen en la máquina herramienta. Esto simplifica las configuraciones necesarias para la calibración y reduce la cantidad de instrumentación necesaria. A partir de estas mediciones, se puede calcular el vector de error en cualquier punto particular dentro del volumen de trabajo de la máquina. Por lo tanto, se puede utilizar para descubrir las fuentes de error en el mismo lugar de trabajo mediante ensayos o en calibraciones periódicas, y posteriormente incluirlo en las compensaciones mediante un software especializado.

4.2. Tipos de máquinas herramientas

Para definir nuestro método de obtención de los errores, partimos de un modelo matemático que identifica la posición en la que se encuentra la punta de la herramienta de nuestra máquina en todo momento, y con esta información, obtener los errores individualmente. Este modelo matemático va a depender de cuál va a ser nuestra máquina.

Hasta ahora en el mercado, la mayoría de las máquinas herramienta se suelen clasificar según el movimiento de la mesa de trabajo y el movimiento de la herramienta. Estos grupos se definen con los diferentes ejes que componen la máquina situados delante y detrás de la letra F. La letra F indica la parte fija de la máquina. Donde las letras situadas a la derecha de F representan los ejes que se mueven con la herramienta, y las letras a la izquierda de F representan los ejes que se mueven con la pieza. Los grupos más comunes son: FXYZ, XFYZ, XYFZ, XYZF, aunque existen otras muchas combinaciones.

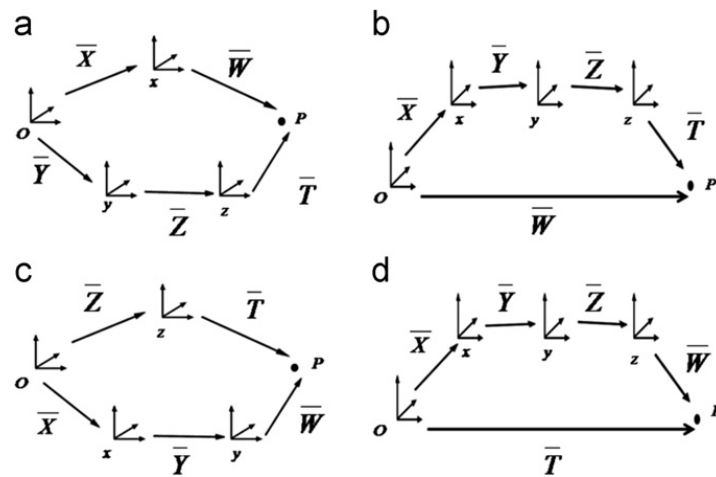


Figura 4.2-1 Esquema cinemático (a) XFYZ, (b) FXYZ, (c) XYFZ and (d) XYZF.

Como puede verse representado los símbolos \bar{X} , \bar{Y} y \bar{Z} hacen referencia a los movimientos de los ejes X, Y, Z, mientras que los símbolos \bar{W} y \bar{T} señalan la posición de la punta de la herramienta con respecto a la máquina de referencia (offset). Este trabajo considera la configuración de una máquina fresadora de control numérico (ANAYAK) de tres ejes, con un control numérico FAGOR 8024. Esta máquina entra en la clasificación de XFYZ. La máquina puede considerarse de mediano tamaño, con un rango de trabajo de $X = 1400 \text{ mm}$, $Y = 600 \text{ mm}$ y $Z = 400 \text{ mm}$.

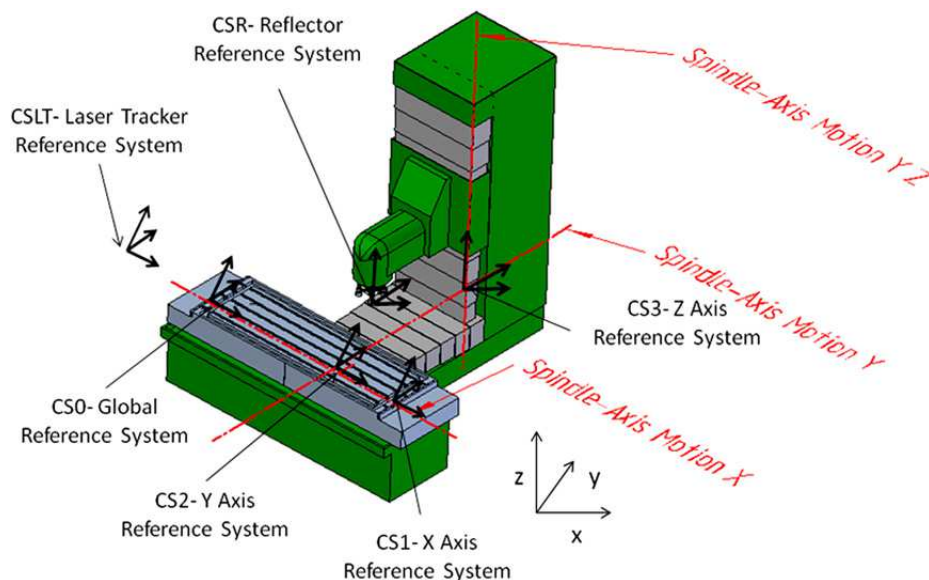


Figura 4.2-2 Máquina de fresado XFYZ

4.3. Modelo matemático

La compensación de los errores geométricos de una máquina se realiza mediante un modelo matemático de la cadena cinemática. Suponiendo que los movimientos de una máquina son las de un cuerpo rígido, la posición de la punta de la herramienta (\bar{W}) puede ser implementado por: la posición programada nominal y la traslación de X, Y, Z llamadas \bar{X} , \bar{Y} y \bar{Z} , los errores rotacionales de los ejes dados en forma de matrices $\bar{R}(X), \bar{R}(Y), \bar{R}(Z)$ y la posición de la punta de la herramienta con respecto a la máquina de referencia (offset) denominada con el vector \bar{X}_p . En nuestro caso, para una máquina de fresado XFYZ:

$$\bar{W} = \bar{R}(X) \cdot (-\bar{X} + \bar{Y}) + \bar{R}(X) \cdot \bar{R}^{-1}(Y) \cdot \bar{Z} + (\bar{R}(X) \cdot \bar{R}^{-1}(Y) \cdot \bar{R}^{-1}(Z)) \bar{X}_p \quad (1)$$

Donde \bar{R}^{-1} es la inversa de la matriz \bar{R} y $U = X, Y, Z$. Los vectores $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{X}_p$ y las matrices \bar{R} y \bar{R}^{-1} pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} X + \delta_X(X) \\ \delta_Y(X) \\ \delta_Z(X) \end{pmatrix}; \bar{Y} = \begin{pmatrix} \delta_X(Y) - \alpha_{XY}Y \\ Y + \delta_Y(Y) \\ \delta_Z(Y) \end{pmatrix}; \bar{Z} = \begin{pmatrix} \delta_X(Z) - \alpha_{ZX}Z \\ \delta_Y(Z) - \alpha_{YZ}Z \\ Z + \delta_Z(Z) \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\bar{X}_p = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\bar{R}(U) = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_Z(U) & -\varepsilon_Y(U) \\ -\varepsilon_Z(U) & 1 & \varepsilon_X(U) \\ \varepsilon_Y(U) & -\varepsilon_X(U) & 1 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\bar{R}^{-1}(U) = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_Z(U) & \varepsilon_Y(U) \\ \varepsilon_Z(U) & 1 & -\varepsilon_X(U) \\ -\varepsilon_Y(U) & -\varepsilon_X(U) & 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

Sustituyendo (2, 3, 4 y 5), en (1), y considerando que un error por otro error nos da un error muy pequeño, por lo tanto despreciable, obtenemos:

- $X_{\text{Final}} = X - \delta_Y(X) - \delta_Z(X) + \delta_X(X) - \alpha_{YX} + \varepsilon_Z(X) \cdot Y - [-\alpha_{ZX} + \varepsilon_Y(Y) - \varepsilon_{YX} \cdot Z + -\varepsilon_{ZY} - \varepsilon_{ZZ} + \varepsilon_{ZX} \cdot YP + [\varepsilon_{YY} + \varepsilon_{YZ} - \varepsilon_Y(X)] \cdot ZP$

- $$Y_{\text{Final}} = Y + \delta_Y(Y) + \delta_Z(Y) - \delta_X(Y) + \varepsilon_Z(X) \cdot X + [-\alpha_{ZY} - \varepsilon_X(Y) + \varepsilon_X(X)] \cdot Z + [\varepsilon_Z(Y) + \varepsilon_Z(Z) - \varepsilon_Z(X)] \cdot X_P + [-\varepsilon_X(Y) - \varepsilon_X(Z) + \varepsilon_X(X)] \cdot Z_P$$
- $$Z_{\text{Final}} = Z + \delta_Y(Z) + \delta_Z(Z) - \delta_X(Z) - \varepsilon_Y(X) \cdot X - \varepsilon_X(X) \cdot Y + [-\varepsilon_Y(Y) - \varepsilon_YZ + \varepsilon_YX \cdot X_P + [\varepsilon_{XY} + \varepsilon_{XZ} - \varepsilon_{XX}] \cdot Y_P$$

Para ajustarnos a las nomenclaturas más utilizadas en este campo, se muestra una tabla en la que se refleja nuestra actual nomenclatura y su correspondencia con la que propone la recomendación alemana VDI 2617. Dicha nomenclatura es más fácil de interpretar a la hora de distinguir los errores. La primera letra indica el eje de movimiento, la segunda el tipo de error geométrico: “P” Posición, “T” Rectitud, “R” rotación, “W” perpendicularidad. La tercera es el eje en el cual aparece el error.

En esta tabla se refleja únicamente para los errores de un eje (el X), pero es igual de aplicable para el resto de ejes. También puede verse la nomenclatura utilizada para los errores de perpendicularidad entre ejes.

Error	ACTUAL	VDI 2617
Posición	$\delta_X(X)$	xPx o xTx
Rectitud horizontal	$\delta_X(Y)$	xTy
Rectitud vertical	$\delta_X(Z)$	xTz
Vuelco o Alabeo	$\varepsilon_X(X)$	xRx
Cabeceo	$\varepsilon_Y(X)$	xRy
Rumbo o Deriva	$\varepsilon_Z(X)$	xRz
Perpendicularidad Y-Z	α_{ZY}	yWz
Perpendicularidad X-Z	α_{ZX}	xWz
Perpendicularidad X-Y	α_{YX}	xWy

Tabla 1 Equivalencia entre las nomenclaturas de los errores en el eje X y los errores de perpendicularidad

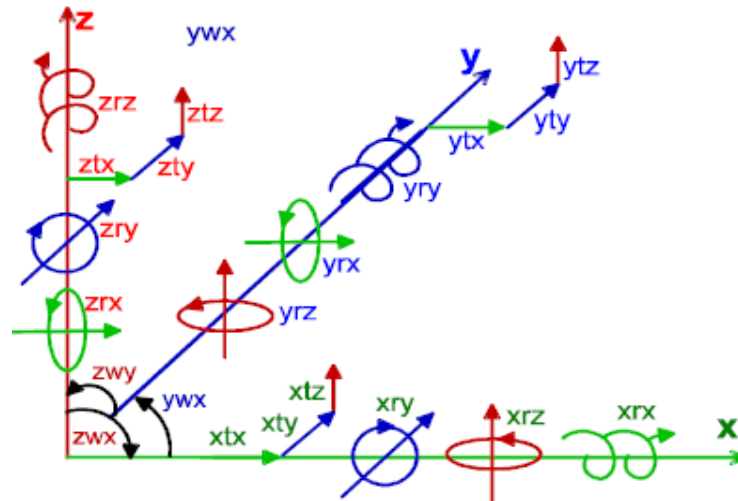


Figura 4.3 Nomenclatura de los 21 errores geométricos

Por lo tanto transformando las fórmulas obtenidas a la nueva nomenclatura nos quedan de la siguiente manera:

- $X_{\text{Final}} = X_{\text{Nom}} - yTx - zTx + xTx - (-xWy + xRz) \cdot Y_{\text{Nom}} - (-xWz + yRy - xRy \cdot Z_{\text{Nom}} - yRz - zRz + xRz \cdot Y_P - (yRy + zRy - xRy) \cdot Z_P$ (6)

- $Y_{\text{Final}} = Y_{\text{Nominal}} + yTy + zTy - xTy + xRz \cdot X_{\text{Nom}} + (-yWz - yRx + xRx) \cdot Z_{\text{Nom}} + (yRz + zRz - xRz) \cdot X_P + (-yRx - zRx + xRx) \cdot Z_P$ (7)

- $Z_{\text{Final}} = Z_{\text{Nominal}} + yTz + zTz - xTz - xRy \cdot X_{\text{Nom}} - xRx \cdot Y_{\text{Nom}} + (-yRy - zRy + xRy) \cdot X_P + (yRx + zRx - xRx) \cdot Y_P$ (8)

Como podemos observar, en cada una de las coordenadas tenemos dos partes totalmente diferenciadas, por un lado la medida nominal y por otro lado los errores que afectan a dicho eje, de esta manera podemos evaluar de forma independiente los 21 errores que afectan a nuestra máquina, las fórmulas se asemejan a lo siguiente:

$$\bar{W} = \bar{X} + \bar{E}; \quad (9)$$

O descomponiendo en las componentes del vector \bar{W} :

- $X_{\text{Final}} = X_{\text{Nominal}} - E_x$ (10)

- $Y_{\text{Final}} = Y_{\text{Nominal}} + E_y$ (11)

- $Z_{\text{Final}} = Z_{\text{Nominal}} + E_z$ (12)

El signo negativo en la coordenada X significa, que al estar nuestro sistema de coordenadas situado en el cabezal de la máquina y ser la mesa la que se desplaza en X, para analizar los errores en dicho eje tenemos que evaluarlos según el movimiento relativo entre ambos.

Despejando la parte de los errores se puede generalizar en una expresión vectorial del modelo de cálculo para la corrección de errores geométricos. Esta expresión hace su comprensión más fácil, y posteriormente nos ayuda a determinar cuales tienen que ser los puntos a medir para poder hallar los 21 errores. Estas componentes son tales:

$$\bar{E} = \bar{P} + \bar{A} \cdot \bar{X}_{\text{Nominal}} + \bar{A}_P \cdot \bar{X}_P; \quad (13)$$

\bar{E} = Vector de error para una posición de referencia \bar{X} de la máquina y un offset de la herramienta o palpador \bar{X}_P .

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} yTx + zTx - xTx \\ yTy + zTy - xTy \\ yTz + zTz - xTz \end{pmatrix}; \quad (14)$$

\bar{P} = Vector de los errores traslacionales.

$$\bar{X}_{\text{Nominal}} = \begin{pmatrix} X_{\text{Nom}} \\ Y_{\text{Nom}} \\ Z_{\text{Nom}} \end{pmatrix}; \quad (15)$$

\bar{X}_{Nominal} = Vector de posición de la máquina.

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & -xWy + xRz & yRy - xRy \\ xRz & 0 & -yWz - yRx + xRx \\ -xRy & -xRx & 0 \end{pmatrix}; \quad (16)$$

\bar{A} = Matriz de los errores de rotación del vector de error en la posición definida por \bar{X} .

$$\bar{X}_P = \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}; \quad (3)$$

\bar{X}_P = Vector de posición del offset de la herramienta o del palpador.

$$\bar{\bar{A}}_P = \begin{pmatrix} 0 & -yRz - zRz + xRz & yRy + zRy - xRy \\ yRz + zRz - xRz & 0 & -yRx - zRx + xRx \\ -yRy - zRy + xRy & yRx + zRx - xRx & 0 \end{pmatrix}; \quad (18)$$

$\bar{\bar{A}}_P$ = Matriz de los errores de rotación del vector de error en la posición \bar{X}_P .

Por primera vez estamos hablando de palpador en vez de punta de la herramienta. Esto es debido a que para calcular los errores en dicha máquina, sustituiremos el cabezal de la máquina por nuestro palpador lineal, con algún accesorio en todo caso, para tomar medida de los errores en diversos puntos. De esta manera obtendremos toda serie de errores que consta en nuestras componentes y podremos obtener el error real en cada lugar de nuestra zona de trabajo. Con el modelo matemático definido, podemos definir cuáles serán los puntos a tener en cuenta, para de esta manera obtener, los errores uno por uno.

4.4. Obtención de errores geométricos

El método utiliza principios trigonométricos y geométricos básicos, además de unos métodos ya clásicos para calcular los 21 errores. La forma de medición de los puntos es a través de una barra de bolas calibrada. De esta manera se necesita tomar medida de la barra en 12 posiciones diferentes y 16 mediciones en esas posiciones para estimar los 21 errores geométricos.

Inicialmente siempre se calculan los errores de inclinación: Deriva y Cabeceo. Lo que vamos a hacer es evaluar las diferencias de las medidas de posición de la barra de bolas, en dos posiciones paralelas al eje de movimiento y separado una distancia entre ellas. Al ser una comparación de dos medidas, los términos de los errores de perpendicularidad no aparecen, ya que son siempre iguales e independientes de la posición, por lo tanto van a ser los últimos en calcularse. En cuanto a los errores traslacionales (\bar{P}), ambas van a ser constantes a lo largo del eje a medir, por lo tanto no nos influyen. Nos queda entonces la fórmula de posición de la herramienta de la siguiente manera:

$$\bar{W} = \bar{X}_{\text{Nominal}} + \bar{A} \cdot \bar{X}_{\text{Nominal}} + \bar{A}_P \cdot \bar{X}_P = \begin{pmatrix} 0 & -xRz & -yRy + xRy \\ xRz & 0 & -yRx + xRx \\ -xRy & -xRx & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{\text{Nom}} \\ Y_{\text{Nom}} \\ Z_{\text{Nom}} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & yRz + zRz - xRz & xRy - yRy - zRy \\ yRz + zRz - xRz & 0 & -yRx - zRx + xRx \\ -yRy - zRy + xRy & yRx + zRx - xRx & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}$$

Y para cada coordenada:

- $X_{\text{Final}} = X_{\text{Nom}} - xRz \cdot Y_{\text{Nom}} + (-yRy + xRy) \cdot Z_{\text{Nom}} + (yRz + zRz - xRz) \cdot Y_P + (xRy - yRy - zRy) \cdot Z_P$
- $Y_{\text{Final}} = Y_{\text{Nom}} + xRz \cdot X_{\text{Nom}} + (-yRx + xRx) \cdot Z_{\text{Nom}} + (yRz + zRz - xRz) \cdot X_P + (-yRx - zRx + xRx) \cdot Z_P$
- $Z_{\text{Final}} = Z_{\text{Nom}} - xRy \cdot X_{\text{Nom}} - xRx \cdot Y_{\text{Nom}} + (-yRy - zRy + xRy) \cdot X_P + (yRx + zRx - xRx) \cdot Y_P$

A continuación vamos a ver la manera de calcular los errores de inclinación que afectan al eje X.

Para ello las medidas se van a tomar a través de un palpador con un solo sensor y la barra de bolas situada en la dirección del eje X. Para la obtención de datos, vamos a fijarnos únicamente en el error producido en dicho eje. En este caso no utilizaremos longitudes en el palpador, que aunque las tiene, tomamos como sistema de referencia el final del mismo. Por lo tanto los términos de \bar{X}_P son nulos y la matriz \bar{A}_P no aparece. Al seguir reduciendo las fórmulas del error queda por lo tanto:

$$X_{\text{Final}} = X_{\text{Nom}} - xRz \cdot Y_{\text{Nom}} + xRy \cdot Z_{\text{Nom}}$$

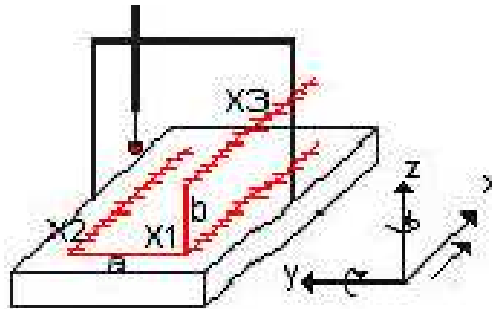


Figura 4.4-1 Posiciones de la barra bolas para evaluar los errores de deriva y cabeceo del eje X

Deriva (xRz): Es la rotación del eje Z que afecta a la posición del eje X. Para calcularla, vamos a medir en las dos posiciones de la barra de bolas mostradas en la figura 4.4-1, X_1 y X_2 . Como se ve, en estas posiciones la coordenada Z permanece constante y entre ambas hay una diferencia de Y a la que llamamos ' a_1 '. Al medir de esta manera y comparar ambas medidas, el término Z desaparece de la fórmula, quedándonos:

$$X_{1Final\ i}(X) = X_{1Nom\ i}(X) - xRz \cdot X_{1Nom\ i}(Y) \rightarrow (1) \rightarrow$$

$$X_{2Final\ i}(X) = X_{2Nom\ i}(X) - xRz \cdot X_{2Nom\ i}(Y) \rightarrow (2) \rightarrow$$

$$\rightarrow (1) \rightarrow X_{1Final\ i}(X) + xRz \cdot X_{1Nom\ i}(Y) = X_{1Nom\ i}(X)$$

$$\rightarrow (2) \rightarrow X_{2Final\ i}(X) + xRz \cdot X_{2Nom\ i}(Y) = X_{2Nom\ i}(X)$$

$$\text{Con } X_{Nom\ i}(X) = X_{1Nom\ i}(X) = X_{2Nom\ i}(X):$$

$$X_{1Final\ i}(X) + xRz \cdot X_{1Nom\ i}(Y) = X_{2Final\ i}(X) + xRz \cdot X_{2Nom\ i}(Y)$$

$$X_{2Final\ i}(X) - X_{1Final\ i}(X) = xRz \cdot (X_{1Nom\ i}(Y) - X_{2Nom\ i}(Y))$$

$$xRz = \frac{X_{2Final\ i}(X) - X_{1Final\ i}(X)}{a_1}; \text{ Donde } a_1 = X_{1Nom\ i}(Y) - X_{2Nom\ i}(Y);$$

En la anotación de la fórmula calculada, X e Y son las coordenadas del punto de cada una de las líneas. Por ejemplo $X_{Nom\ 1\ i}(Y)$ representa el valor de la coordenada nominal Y en la posición i de la línea 1 del eje de movimiento X. Esta anotación va a ser utilizada en todas las siguientes fórmulas desarrolladas, a la vez que el método de despejar utilizando la medida nominal.

Cabeceo (xRy): Es la rotación del eje Y que afecta a la posición del eje X. Para calcularla, colocamos la barra de bolas en las dos posiciones X_2 y X_3 de la misma figura. Como se ve en este caso la coordenada que no varía es la del eje Y, y se produce una separación entre ambas barras en el eje Z de ' b_1 '. En

este caso la parte que se anula de la ecuación al realizar la comparación es la de Y.

$$X_{1Final i}(X) = X_{1Nom i}(X) + xRy \cdot X_{1Nom i}(Z) \rightarrow (1) \rightarrow$$

$$X_{3Final i}(X) = X_{3Nom i}(X) + xRy \cdot X_{3Nom i}(Z) \rightarrow (2) \rightarrow$$

$$\rightarrow (1) \rightarrow X_{1Final i}(X) - xRy \cdot X_{1Nom i}(Z) = X_{1Nom i}(X)$$

$$\rightarrow (2) \rightarrow X_{3Final i}(X) - xRy \cdot X_{3Nom i}(Z) = X_{3Nom i}(X)$$

$$\text{Con } X_{Nom i}(X) = X_{1Nom i}(X) = X_{3Nom i}(X):$$

$$X_{1Final i}(X) - xRy \cdot X_{1Nom i}(Z) = X_{3Final i}(X) - xRy \cdot X_{3Nom i}(Z)$$

$$X_{3Final i}(X) - X_{1Final i}(X) = xRy \cdot (X_{3Nom i}(Z) - X_{1Nom i}(Z))$$

$$xRy = \frac{X_{3Final i}(X) - X_{1Final i}(X)}{b_1}; \text{ Donde } b_1 = X_{3Nom i}(Z) - X_{1Nom i}(Z);$$

Calculados xRz y xRy, vamos a calcular los errores de deriva y cabeceo que se producen en el eje Y.

Para calcular dichos errores de inclinación, colocaremos la barra de bolas en dos posiciones a lo largo del eje Y. Las medidas se tomarán con un palpador con dos sensores, de esa manera tendremos dos medidas diferentes en cada posición de la barra. En este caso sí que nos afectará en el cálculo la parte de \bar{A}_p , aunque solo tendremos longitudes en el palpador en la dirección X ya que, al igual que antes existe offset en Z, pero es desde donde tomamos la referencia. El que haya offset en el palpador es debido a que sin él, no sería posible el cálculo del error de deriva yRz. La fórmula de la cual partimos quedará de la siguiente manera:

$$Y_{Final} = Y_{Nom} - yRx \cdot Z_{Nom} + yRz \cdot X_p$$

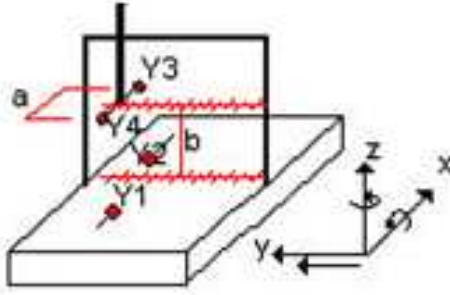


Figura 4.4-2 Posiciones de la barra bolas para evaluar los errores de deriva y cabeceo del eje Y

Deriva (yRz): Es la rotación del eje Z que afecta a la posición del eje Y. Para calcularla, comparamos dos a dos (Y_1 con Y_2 , Y_3 con Y_4) las cuatro medidas realizadas de la barra de bolas, en sus dos posiciones diferentes. Como hemos dicho tendremos una longitud X_P en el palpador, y la toma de medidas se hará a lo largo del eje Y, sin variar la medición de la altura Z, para ninguna de las dos posiciones de la barra.

$$Y_{1Final i}(Y) = Y_{1Nom i}(Y) + yRz \cdot Y_1(X_P) \rightarrow Y_{1Nom i}(Y) = Y_{1Final i}(Y) - yRz \cdot Y_1(X_P)$$

$$Y_{2Final i}(Y) = Y_{2Nom i}(Y) + yRz \cdot Y_2(X_P) \rightarrow Y_{2Nom i}(Y) = Y_{2Final i}(Y) - yRz \cdot Y_2(X_P)$$

$$\text{Con } Y_{Nom i}(Y) = Y_{1Nom i}(Y) = Y_{2Nom i}(Y):$$

$$Y_{1Final i}(Y) - yRz \cdot Y_1(X_P) = Y_{2Final i}(Y) - yRz \cdot Y_2(X_P)$$

$$Y_{1Final i}(Y) - Y_{2Final i}(Y) = yRz \cdot (Y_1(X_P) - Y_2(X_P))$$

$$yRz = \frac{Y_{1Final i}(Y) - Y_{2Final i}(Y)}{Y_1(X_P) - Y_2(X_P)}$$

Con las otras dos medidas, Y_3 e Y_4 , realizamos el mismo proceso:

$$Y_{3Final i}(Y) = Y_{3Nom i}(Y) + yRz \cdot Y_3(X_P) \rightarrow Y_{3Nom i}(Y) = Y_{3Final i}(Y) - yRz \cdot Y_3(X_P)$$

$$Y_{4Final i}(Y) = Y_{4Nom i}(Y) + yRz \cdot Y_4(X_P) \rightarrow Y_{4Nom i}(Y) = Y_{4Final i}(Y) - yRz \cdot Y_4(X_P)$$

$$\text{Con } Y_{Nom i}(Y) = Y_{3Nom i}(Y) = Y_{4Nom i}(Y):$$

$$Y_{3Final i}(Y) - yRz \cdot Y_3(X_P) = Y_{4Final i}(Y) - yRz \cdot Y_4(X_P)$$

$$Y_{3Final i}(Y) - Y_{4Final i}(Y) = yRz \cdot (Y_3(X_P) - Y_4(X_P))$$

$$y_{Rz} = \frac{Y_{3Final\ i}(Y) - Y_{4Final\ i}(Y)}{Y_3(X_P) - Y_4(X_P)}$$

Realizamos la media del error calculado en dos posiciones diferentes, de esta manera obtenemos el error con mas fiabilidad. También que, $Y_1(X_P) - Y_2(X_P) = Y_3(X_P) - Y_4(X_P) = a_2$.

$$y_{Rz} = \frac{(Y_{3Final\ i}(Y) - Y_{4Final\ i}(Y)) + (Y_{1Final\ i}(Y) - Y_{2Final\ i}(Y))}{2 \cdot a_2};$$

$$a_2 = Y_3(X_P) - Y_4(X_P);$$

Cabeceo (yRx): Es la rotación del eje X que afecta a la posición del eje Y. Para calcularla, realizamos una comparación de las medidas de la barra de bolas en sus dos posiciones. En este caso la medida del eje X se mantiene fija, desplazándonos únicamente en las dos posiciones de Z, por lo tanto en este caso el offset X_P va a desaparecer en la comparación de Y_1 con Y_3 e Y_2 con Y_4 . Con ello obtendremos el error y podremos calcular la media entre ambas soluciones. Partimos por lo tanto de:

$$Y_{1Final\ i}(Y) = Y_{1Nom\ i}(Y) - y_{Rx} \cdot Y_{1Nom\ i}(Z) \rightarrow (1) \rightarrow$$

$$Y_{3Final\ i}(Y) = Y_{3Nom\ i}(Y) - y_{Rx} \cdot Y_{3Nom\ i}(Z) \rightarrow (2) \rightarrow$$

$$\rightarrow (1) \rightarrow Y_{1Nom\ i}(Y) = Y_{1Final\ i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{1Nom\ i}(Z)$$

$$\rightarrow (2) \rightarrow Y_{3Nom\ i}(Y) = Y_{3Final\ i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{3Nom\ i}(Z)$$

$$\text{Con } Y_{Nom\ i}(Y) = Y_{1Nom} = Y_{3Nom}:$$

$$Y_{1Final\ i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{1Nom\ i}(Z) = Y_{3Final\ i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{3Nom\ i}(Z)$$

$$Y_{1Final\ i}(Y) - Y_{3Final\ i}(Y) = y_{Rx} \cdot (Y_{3Nom\ i}(Z) - Y_{1Nom\ i}(Z)) =$$

$$y_{Rx} = \frac{Y_{1Final\ i}(Y) - Y_{3Final\ i}(Y)}{Y_{3Nom\ i}(Z) - Y_{1Nom\ i}(Z)}$$

Y con las medidas Y_2 e Y_4 :

$$Y_{2Final i}(Y) = Y_{2Nom i}(Y) - y_{Rx} \cdot Y_{2Nom i}(Z) \rightarrow (3) \rightarrow$$

$$Y_{4Final i}(Y) = Y_{4Nom i}(Y) - y_{Rx} \cdot Y_{4Nom i}(Z) \rightarrow (4) \rightarrow$$

$$\rightarrow (3) \rightarrow Y_{2Nom i}(Y) = Y_{2Final i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{2Nom i}(Z)$$

$$\rightarrow (4) \rightarrow Y_{4Nom i}(Y) = Y_{4Final i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{4Nom i}(Z)$$

$$\text{Con } Y_{Nom i}(Y) = Y_{2Nom i}(Y) = Y_{4Nom i}(Y):$$

$$Y_{2Final i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{2Nom i}(Z) = Y_{4Final i}(Y) + y_{Rx} \cdot Y_{4Nom i}(Z)$$

$$Y_{2Final i}(Y) - Y_{4Final i}(Y) = y_{Rx} \cdot (Y_{4Nom i}(Z) - Y_{2Nom i}(Z)) =$$

$$y_{Rx} = \frac{Y_{2Final i}(Y) - Y_{4Final i}(Y)}{Y_{4Nom i}(Z) - Y_{2Nom i}(Z)}$$

Y al realizar la media, sabiendo que $Y_{3Nom i}(Z) - Y_{1Nom i}(Z) = Y_{4Nom i}(Z) - Y_{2Nom i}(Z) = b_2$.

$$y_{Rx} = \left\{ \frac{(Y_{1Final i}(Y) + Y_{2Final i}(Y)) - (Y_{3Final i}(Y) + Y_{4Final i}(Y))}{2 \cdot b_2} \right\};$$

$$b_2 = Y_{3Nom i}(Z) - Y_{1Nom i}(Z);$$

Por último, calculamos los errores de inclinación del eje Z. En este caso solo colocaremos nuestra barra de bolas en una posición, y mediremos con un palpador con tres offset orientados dos en la dirección X y uno en la dirección Y. Por lo tanto al igual que en el caso anterior, nos afecta pues la medida de la longitud del palpador. Las mediciones se realizarán desplazándose a lo largo del eje Z únicamente. Dichas condiciones modifican la fórmula de la siguiente manera:

$$Z_{Final} = Z_{Nom} - z_{Ry} \cdot X_p + z_{Rx} \cdot Y_p$$

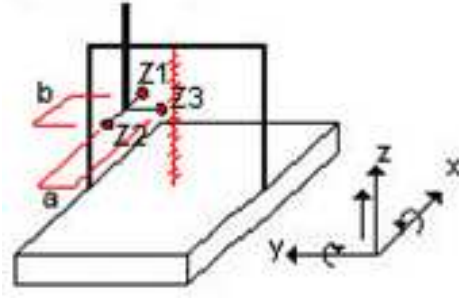


Figura 4.4-3 Posiciones de la barra bolas para evaluar los errores de deriva y cabeceo del eje Z

Deriva (zRy): Es la rotación del eje Y que afecta a la posición del eje Z. Para calcularla, tomamos dos medidas de la barra de bolas en una única posición, con los dos sensores del palpador Z_1 y Z_2 . En este caso, no utilizamos el sensor Z_3 y no nos afecta en la ecuación el término Y_p , únicamente aparecerá la longitud del palpador X_p .

$$Z_{1Final i}(Z) = Z_{1Nom i}(Z) - zRy \cdot Z_1(X_p) \rightarrow Z_{1Nom i}(Z) = Z_{1Final i}(Z) + zRy \cdot Z_1(X_p)$$

$$Z_{2Final i}(Z) = Z_{2Nom i}(Z) - zRy \cdot Z_2(X_p) \rightarrow Z_{2Nom i}(Z) = Z_{2Final i}(Z) + zRy \cdot Z_2(X_p)$$

$$\text{Con } Z_{Nom i}(Z) = Z_{1Nom i}(Z) = Z_{2Nom i}(Z):$$

$$Z_{1Final i}(Z) + zRy \cdot Z_1(X_p) = Z_{2Final i}(Z) + zRy \cdot Z_2(X_p)$$

$$zRy \cdot (Z_1(X_p) - Z_2(X_p)) = Z_{2Final i}(Z) - Z_{1Final i}(Z)$$

$$zRy = \frac{Z_{2Final i}(Z) - Z_{1Final i}(Z)}{b_3}; \text{ Donde } b_3 = Z_1(X_p) - Z_2(X_p);$$

Cabeceo (zRx): Es la rotación del eje X que afecta a la posición del eje Z. Para calcularla, tomamos tres medidas de la barra de bolas en una única posición con los tres sensores (Z_1, Z_2, Z_3). Aunque utilizamos el offset en la dirección X, en la fórmula no queda definido ya que solo lo utilizamos para obtener la coordenada Z y posteriormente realizar la media entre Z_1 y Z_2 , de esta manera da como resultado una barra ficticia separada una distancia Y_p , de la barra que estamos midiendo en realidad.

$$Z_{12Final i}(Z) = Z_{12Nom i}(Z) + z_{Rx} \cdot Z_{12}(Y_p) \rightarrow (1) \rightarrow$$

$$\rightarrow (1) \rightarrow Z_{12Nom i}(Z) = Z_{12Final i}(Z) - z_{Rx} \cdot Z_{12}(Y_p)$$

$$Z_{3Final i}(Z) = Z_{3Nom i}(Z) + z_{Rx} \cdot Z_3(Y_p) \rightarrow Z_{3Nom i}(Z) = Z_{3Final i}(Z) - z_{Rx} \cdot Z_3(Y_p)$$

Con $Z_{Nom i}(Z) = Z_{12Nom i}(Z) = Z_{3Nom i}(Z)$ y con $Z_{12}(Y_p) = 0$:

$$Z_{12Final i}(Z) = Z_{3Final i}(Z) - z_{Rx} \cdot Z_3(Y_p)$$

$$z_{Rx} \cdot Z_3(Y_p) = Z_{3Final i}(Z) - Z_{12Final i}(Z)$$

Donde:

$$Z_{12Final i}(Z) = \frac{Z_{1Final i}(Z) + Z_{2Final i}(Z)}{2}$$

$$z_{Rx} = \frac{Z_{3Final i}(Z) - \left(\frac{Z_{1Final i}(Z) + Z_{2Final i}(Z)}{2} \right)}{a_3}; \text{ Donde } a_3 = Z_3(Y_p);$$

Los siguientes errores que podemos calcular son los errores de posicionamiento. Dichos errores se miden evaluando diferentes posiciones sobre el eje a medir. Para calcular dicho error no influyen en las fórmulas ni los errores de perpendicularidad ni los errores de rectitud, ya que la toma de medidas se hacen únicamente en la dirección paralela al eje, a su vez, solo afectan los errores de cabeceo y deriva que se producen en dicho eje. Por lo tanto, lo que hacemos es en cada posición corregir los errores de cabeceo y deriva calculados previamente y compararlo con las posiciones teóricas o nominales a las que la máquina debería haber ido. Las fórmulas quedan de la siguiente manera:

- $X_{Final} = X_{Nom} + x_{Tx} - x_{Rz} \cdot Y_{Nom} + x_{Ry} \cdot Z_{Nom}$
- $Y_{Final} = Y_{Nominal} + y_{Ty} - y_{Rx} \cdot Z_{Nom} + y_{Rz} \cdot X_p$
- $Z_{Final} = Z_{Nominal} + z_{Tz} - z_{Ry} \cdot X_p + z_{Rx} \cdot Y_p$

Con las medidas realizadas anteriormente de la barra de bolas, podemos obtener cada uno de los errores de posición mediante estas fórmulas.

Error de posición del eje X (xTx): Traslación del eje X que afecta la posición del mismo eje.

$$xTx = X_{1Final\ i}(X) - X_{1Nom\ i}(X) + xRz \cdot X_{1Nom\ i}(Y) - xRy \cdot X_{1Nom\ i}(Z);$$

Como disponemos de más medidas a lo largo del eje X podemos hallar el error en cada posición de la barra y realizar la media, de esta forma obtenemos el error de una manera más fiable. En el resto de errores de posición vamos a realizar el mismo proceso.

$$xTx = \left(X_{1Final\ i}(X) - X_{1Nom\ i}(X) + (xRz \cdot X_{1Nom\ i}(Y)) - (xRy \cdot X_{1Nom\ i}(Z)) \right) + \\ \left(X_{2Final\ i}(X) - X_{2Nom\ i}(X) + (xRz \cdot X_{2Nom\ i}(Y)) - (xRy \cdot X_{2Nom\ i}(Z)) \right) + \\ \left(X_{3Final\ i}(X) - X_{3Nom\ i}(X) + (xRz \cdot X_{3Nom\ i}(Y)) - (xRy \cdot X_{3Nom\ i}(Z)) \right) / 3;$$

Error de posición del eje Y (yTy): Traslación del eje Y que afecta la posición del mismo eje.

$$yTy = \left(Y_{1Final\ i}(Y) - Y_{1Nom\ i}(Y) + yRx \cdot Y_{1Nom\ i}(Z) - yRz \cdot Y_1(X_P) \right) + \\ \left(Y_{2Final\ i}(Y) - Y_{2Nom\ i}(Y) + yRx \cdot Y_{2Nom\ i}(Z) - yRz \cdot Y_2(X_P) \right) + \\ \left(Y_{3Final\ i}(Y) - Y_{3Nom\ i}(Y) + yRx \cdot Y_{3Nom\ i}(Z) - yRz \cdot Y_3(X_P) \right) + \\ \left(Y_{4Final\ i}(Y) - Y_{4Nom\ i}(Y) + yRx \cdot Y_{4Nom\ i}(Z) - yRz \cdot Y_4(X_P) \right) / 4;$$

Error de posición del eje Z (zTz): Traslación del eje Z que afecta la posición del mismo eje.

$$zTz = \left(Z_{1Final\ i}(Z) - Z_{1Nom\ i}(Z) + zRy \cdot Z_1(X_P) \right) + \\ \left(Z_{2Final\ i}(Z) - Z_{2Nom\ i}(Z) + zRy \cdot Z_2(X_P) \right) + \\ \left(Z_{3Final\ i}(Z) - Z_{3Nom\ i}(Z) - zRx \cdot Z_3(Y_P) \right) / 3;$$

Los errores de vuelco o alabeo son calculados de las diferencias de rectitud provenientes de las mediciones realizadas a la barra en sus posiciones paralelas con los ejes de la máquina herramienta, dividiendo el resultado entre la distancia de las barras. Este cálculo se realiza después de corregir la desviación de planitud de la mesa o la orientación de las barras de bolas nominalmente paralelas. Esta corrección es realizada con las mediciones de la barra de bolas en posición diagonal. Estas diagonales (tres bolas medidas en cada posición diagonal) contienen la información de la desviación de planitud de la geometría de la MH en las cuatro bolas de los extremos que forman las diagonales. Las dos barras paralelas a los ejes, que están situadas en el respectivo plano de la MH, son matemáticamente alineadas, de tal forma que las dos bolas de los extremos de las barras situadas de forma paralela a los ejes de la MH, siguen el error de planitud obtenido de las diagonales, ver figura 4.4-4. Nótese que las dos bolas de los extremos de las barras situadas de forma paralela a los ejes deben de coincidir de forma aproximada con las posiciones de las bolas de los extremos de las diagonales.

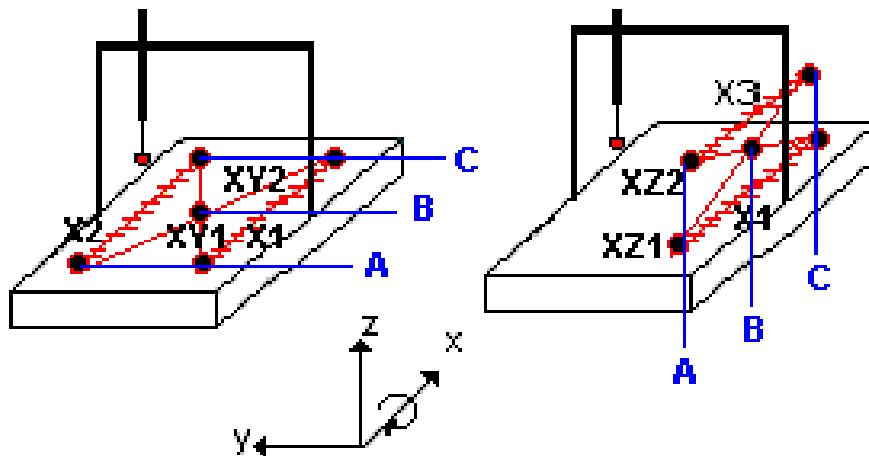


Figura 4.4-4 Posiciones de la barra bolas para evaluar los errores de alabeo y rectitud del eje X

Corrección de la coordenada Z de las bolas medidas en la posición X_2 .

$$X_{2i}(Z_{\text{Corr}}) = -\{(XY_{1C}(Z) - XY_{2C}(Z)) - (XY_{2A}(Z) - XY_{1A}(Z)) - 2 \cdot (XY_{1B}(Z) - XY_{2B}(Z) - X_2CZ - X_1CZ - X_2AZ - X_1AZ) ;$$

Corrección de la coordenada Y de las bolas medidas en la posición X_3 .

$$X_{3i}(Y_{\text{Corr}}) = -\{(XZ_{1C}(Y) - XZ_{2C}(Y)) - (XZ_{2A}(Y) - XZ_{1A}(Y)) - 2 \cdot (XZ_{1B}(Y) - XZ_{2B}(Y) - XZ_{3C}(Y) - XZ_{1C}(Y) - XZ_{3A}(Y) - XZ_{1A}(Y))\};$$

Alabeo (xRx): Rotación del eje X que afecta al mismo eje.

- $X_{2\text{Final } i}(Z_{\text{Corr}}) = X_{2\text{Final } i}(Z) - X_{2i}(Z_{\text{Corr}})$
- $X_{3\text{Final } i}(Y_{\text{Corr}}) = X_{3\text{Final } i}(Z) - X_{2i}(Y_{\text{Corr}})$

$$xRx = -\left\{ \frac{\frac{X_{1\text{Final } i}(Z) - X_{2\text{Final } i}(Z_{\text{Corr}})}{a_1} + \frac{X_{1\text{Final } i}(Y) - X_{3\text{Final } i}(Y_{\text{Corr}})}{b_1}}{2} \right\};$$

Aunque esta forma de calcular el error de vuelco es correcta, podemos utilizar una forma alternativa en la que no tenemos que realizar medidas de la barra en posiciones diagonales. Para ello basta con corregir las coordenadas añadiéndoles los errores calculados anteriormente que les afecten.

- $X_{1i}(Y_{\text{Corr}}) = X_{1\text{Final } i}(Y) - X_{1\text{Nom } i}(Y) - xRz(X_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot X_{1\text{Nom } i}(X) + yRx(X_{1\text{Nom } i}(Y)) \cdot X_{1\text{Nom } i}(Z);$
- $X_{3i}(Y_{\text{Corr}}) = X_{3\text{Final } i}(Y) - X_{3\text{Nom } i}(Y) - xRz(X_{3\text{Nom } i}(X)) \cdot X_{3\text{Nom } i}(X) + yRx(X_{3\text{Nom } i}(Y)) \cdot X_{3\text{Nom } i}(Z);$
- $X_{1i}(Z_{\text{Corr}}) = X_{1\text{Nom } i}(Z) - X_{1\text{Final } i}(Z) - xRy(X_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot X_{1\text{Nom } i}(X);$
- $X_{2i}(Z_{\text{Corr}}) = X_{2\text{Nom } i}(Z) - X_{2\text{Final } i}(Z) - xRy(X_{2\text{Nom } i}(X)) \cdot X_{2\text{Nom } i}(X);$

Como podemos ver nos aparece una nueva nomenclatura, es el caso por ejemplo de $yRx(X_{1\text{Nom } i}(Y))$, esta significa que tenemos que tener en cuenta el error yRx evaluado en la barra en la posición X_1 en función de la coordenada nominal Y.

$$xRx = \frac{\left(\frac{X_{1i}(Y_{\text{Corr}}) - X_{3i}(Y_{\text{Corr}})}{X_{1\text{Nom } i}(Z) - X_{3\text{Nom } i}(Z)} \right) + \left(\frac{X_{1i}(Z_{\text{Corr}}) - X_{2i}(Z_{\text{Corr}})}{X_{1\text{Nom } i}(Y) - X_{2\text{Nom } i}(Y)} \right)}{2};$$

En el siguiente error también vamos a proponer las dos maneras de calcularlo, por lo tanto primero debemos corregir la coordenada X de las bolas medidas en la posición Y_3 e Y_4 , para el método de resolución mediante las diagonales.

$$Y_{2i}(X_{\text{Corr}}) = \{(YZ_{1C}(X) - YZ_{2C}(X)) - (YZ_{2A}(X) - YZ_{1A}(X)) - 2 \cdot (YZ_{1B}(X) - YZ_{2B}(X) - YZ_{3,4C}(X) - YZ_{1,2C}(X) - YZ_{3,4A}(X) - YZ_{1,2A}(X))\};$$

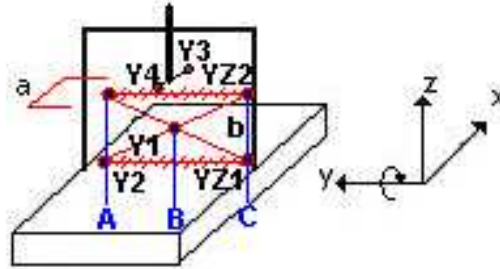


Figura 4.4-5 Posiciones de la barra bolas para evaluar los errores de deriva y cabeceo del eje Y

Alabeo (yRy): Rotación del eje Y que afecta al mismo eje.

$$Y_{3\text{Final } i}(X_{\text{Corr}}) = Y_{1\text{Final } i}(X) - Y_{2i}(X_{\text{Corr}})$$

$$yRy = - \left(\frac{Y_{3\text{Final } i}(X_{\text{Corr}}) - Y_{1i}(X)}{b_2} \right);$$

A continuación pasamos a obtener la fórmula sin utilizar la medida de las barras en posición diagonal. De nuevo tenemos que corregir las coordenadas añadiéndoles los errores calculados anteriormente que les afecten.

- $Y_{1i}(X_{\text{Corr}}) = Y_{1\text{Nom } i}(X) - Y_{1\text{Final } i}(X) - xRz(Y_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{1\text{Nom } i}(Y) + xRy(Y_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{1\text{Nom } i}(Z);$
- $Y_{3i}(X_{\text{Corr}}) = Y_{3\text{Nom } i}(X) - Y_{3\text{Final } i}(X) - xRz(Y_{3\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{3\text{Nom } i}(Y) + xRy(Y_{3\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{3\text{Nom } i}(Z);$
- $Y_{2i}(X_{\text{Corr}}) = Y_{2\text{Nom } i}(X) - Y_{2\text{Final } i}(X) - xRz(Y_{2\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{2\text{Nom } i}(Y) + xRy(Y_{2\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{2\text{Nom } i}(Z);$
- $Y_{4i}(X_{\text{Corr}}) = Y_{4\text{Nom } i}(X) - Y_{4\text{Final } i}(X) - xRz(Y_{4\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{4\text{Nom } i}(Y) + xRy(Y_{4\text{Nom } i}(X)) \cdot Y_{4\text{Nom } i}(Z);$

$$yRy = \frac{\left(\frac{Y_{1i}(X_{\text{Corr}}) - Y_{3i}(X_{\text{Corr}})}{Y_{1\text{Nom } i}(Z) - Y_{3\text{Nom } i}(Z)} \right) + \left(\frac{Y_{2i}(X_{\text{Corr}}) - Y_{4i}(X_{\text{Corr}})}{Y_{2\text{Nom } i}(Y) - X_{4\text{Nom } i}(Z)} \right)}{2};$$

Para el error de alabeo en el eje Z de la máquina herramienta, es calculado únicamente mediante el método en el que no utilizamos las diagonales, ya que este método puede ser utilizado posteriormente ahorrándonos tiempo en las calibraciones de la máquina.

Alabeo (zRz): Rotación del eje Z que afecta al mismo eje.

- $Z_{1i}(Y_{\text{Corr}}) = Z_{1\text{Final } i}(Y) - Z_{1\text{Nom } i}(Y) - xRz(Z_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot Z_{1\text{Nom } i}(X) + yRx(Z_{1\text{Nom } i}(Y)) \cdot Z_{1\text{Nom } i}(Z) - xRx(Z_{1\text{Nom } i}(X)) \cdot Z_{1\text{Nom } i}(Z);$
- $Z_{2i}(Y_{\text{Corr}}) = Z_{2\text{Final } i}(Y) - Z_{2\text{Nom } i}(Y) - xRz(Z_{2\text{Nom } i}(X)) \cdot Z_{1\text{Nom } i}(X) + yRx(Z_{2\text{Nom } i}(Y)) \cdot Z_{2\text{Nom } i}(Z) - xRx(Z_{2\text{Nom } i}(X)) \cdot Z_{2\text{Nom } i}(Z);$

$$zRz = \frac{Z_{1i}(Y_{\text{Corr}}) - Z_{2i}(Y_{\text{Corr}})}{b_3};$$

Los errores de rectitud son evaluados en las barras paralelas a los ejes, corrigiendo los errores de alabeo multiplicados por las distancias de la barra al eje de coordenadas respectivo. Al igual que en los errores anteriores también tenemos que evaluar ciertos errores ya que nos influyen a la hora de calcular las rectitudes, el motivo por lo que entran esos errores que no corresponden con el eje en el que estamos midiendo, es porque están multiplicados por la coordenada cambiante del eje. Para cada error de rectitud partimos previamente de despejar el error de las fórmulas del modelo.

Rectitud (xTz): Rectitud del eje X en la dirección del eje Z. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición X_1 .

$$X_{1\text{Final } i}(Z) = X_{1\text{Nom } i}(Z) - xTz - xRy \cdot X_{1\text{Nom } i}(X) - xRx \cdot X_{1\text{Nom } i}(Y)$$

$$xTz = X_{1\text{Nom } i}(Z) - X_{1\text{Final } i}(Z) - xRx \cdot X_{1\text{Nom } i}(Y) - xRy \cdot X_{1\text{Nom } i}(X);$$

Rectitud (xTy): Rectitud del eje X en la dirección del eje Y. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición X_1 .

$$Y_{\text{Final}} = Y_{\text{Nominal}} - xTy + xRz \cdot X_{\text{Nom}} + xRx \cdot Z_{\text{Nom}}$$

$$xTy = X_{1\text{Nom i}}(Y) - X_{1\text{Final i}}(Y) + xRx \cdot X_{1\text{Nom i}}(Z) + xRz \cdot X_{1\text{Nom i}}(X);$$

Rectitud (yTx): Rectitud del eje Y en la dirección del eje X. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición Y_1 .

$$Y_{1\text{Final i}}(X) = Y_{1\text{Nom i}}(X) - yTx + xRz \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Y) + yRy \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Z)$$

$$yTx = Y_{1\text{Nom i}}(X) - Y_{1\text{Final i}}(X) - yRy \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Z) - xRz(Y_{1\text{Nom i}}(X)) \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Y);$$

Rectitud (yTz): Rectitud del eje Y en la dirección del eje Z. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición Y_1 .

$$Y_{1\text{Final i}}(Z) = Y_{1\text{Nom i}}(Z) + yTz - xRx \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Y) - yRy \cdot Y_1(X_p)$$

$$yTz = Y_{1\text{Final i}}(Z) - Y_{1\text{Nom i}}(Z) + yRy \cdot Y_1(X_p) + xRx(Y_{1\text{Nom i}}(X)) \cdot Y_{1\text{Nom i}}(Y);$$

Rectitud (zTx): Rectitud del eje Z en la dirección del eje X. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición Z_1 .

$$Z_{1\text{Final i}}(X) = Z_{1\text{Nom i}}(X) - zTx - (yRy - xRy) \cdot Z_{1\text{Nom i}}(Z)$$

$$zTx = Z_{1\text{Nom i}}(X) - Z_{1\text{Final i}}(X) - yRy(Z_{1\text{Nom i}}(Y)) \cdot Z_{1\text{Nom i}}(Z) + xRy(Z_{1\text{Nom i}}(X)) \cdot Z_{1\text{Nom i}}(Z);$$

Rectitud (zTy): Rectitud del eje Z en la dirección del eje Y. Las medidas las realizamos con la barra de bolas en la posición Z_3 .

$$Z_{3\text{Final i}}(Y) = Z_{3\text{Nom i}}(Y) + zTy + (-yRx + xRx) \cdot Z_{3\text{Nom i}}(Z)$$

$$zTy = Z_{3Final i}(Y) - Z_{3Nom i}(Y) + yRx(Z_{3Nom i}(Y)) \cdot Z_{3Nom i}(Z) - xRx(Z_{3Nom i}(X)) \cdot Z_{3Nom i}(Z);$$

Finalmente los errores de perpendicularidad son evaluados de las diferencias de longitudes de las mediciones de las diagonales en cada plano del sistema de coordenadas, ver figuras 4.4-4 y 4.4-5. Sin embargo, estas longitudes son solo evaluadas después de corregir las coordenadas de las respectivas bolas con todos los errores antes calculados, pasándoles de nuevo el modelo. aplicando de forma correcta los vectores de palpadores utilizados en la medición de las diagonales.

$$LXY_{1,2 Corr} = LXZ_{1,2 Corr} = LYZ_{1,2 Corr} = \sqrt{(X_{2Corr} - X_{1Corr})^2 + (Y_{2Corr} - Y_{1Corr})^2 + (Z_{2Corr} - Z_{1Corr})^2}$$

Donde U y V son las proyecciones de las barras de bolas nominales.

Perpendicularidad (xWy): Perpendicularidad entre el eje X y el eje Y.

$$xWy = \frac{(LXY_{1Corr} - LXY_{2Corr}) \cdot LXY_{1Corr}}{2 \cdot U(XY_1) \cdot V(XY_1)};$$

Perpendicularidad (xWz): Perpendicularidad entre el eje X y el eje Z.

$$xWz = \frac{(LXZ_{1Corr} - LXZ_{2Corr}) \cdot LXZ_{1Corr}}{2 \cdot U(XZ_1) \cdot V(XZ_1)};$$

Perpendicularidad (yWz): Perpendicularidad entre el eje Y y el eje Z.

$$yWz = - \left(\frac{(LYZ_{1Corr} - LYZ_{2Corr}) \cdot LYZ_{1Corr}}{2 \cdot U(YZ_1) \cdot V(YZ_1)} \right);$$

4.5. Verificación del método

Habiendo calculado las fórmulas previamente no podemos darlas por buenas hasta que no realicemos una prueba en la cual nos den credibilidad en su utilización. Para ello lo que hacemos es crear un simulador de la máquina herramienta en el programa MATLAB, introduciendo las fórmulas para comprobar su validez.

El proceso utilizado para la verificación del modelo puede verse detallado esquemáticamente en el siguiente esquema.

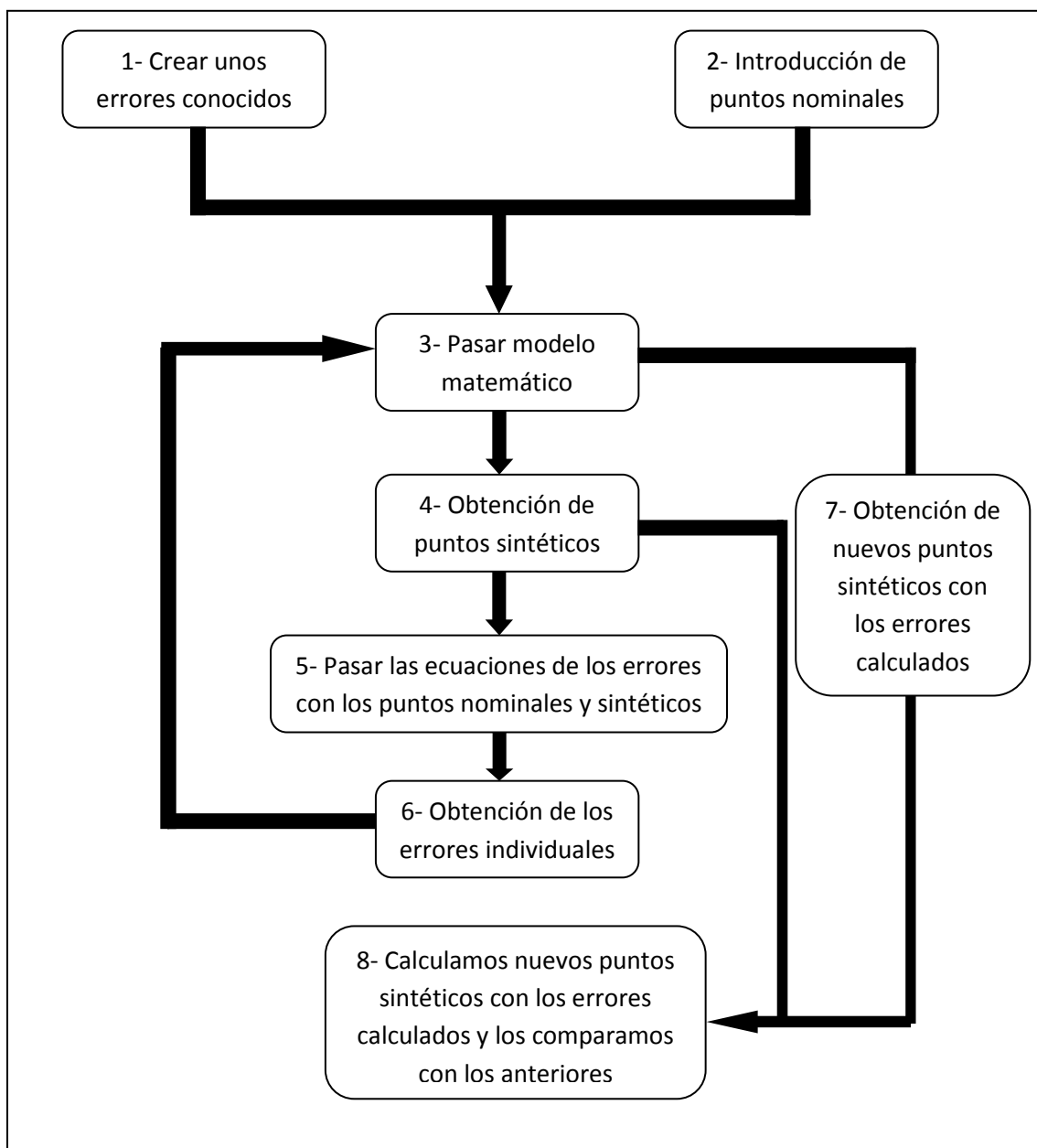


Figura 4.5-1 Esquema del programa de verificación de las fórmulas obtenidas

El programa comienza como vemos introduciendo unos puntos nominales en la máquina herramienta, para después, aplicarles unos errores conocidos. Estos errores se incluyen pasando el modelo matemático explicado en el apartado 4.3. En la siguiente figura podemos ver los puntos nominales y como repercuten los errores que introducimos intencionadamente.

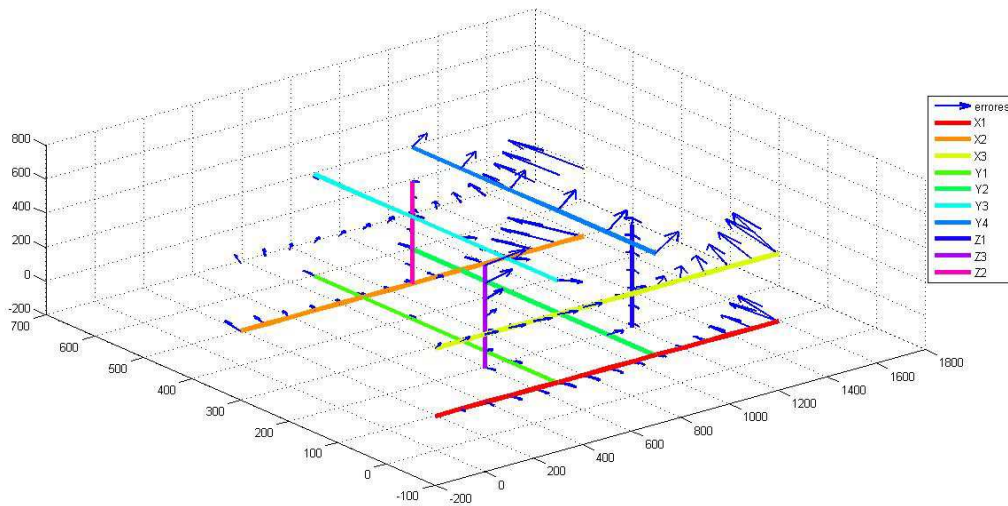


Figura 4.5-2 Visualización de los puntos nominales y de los errores introducidos

Los puntos sintéticos son los puntos finales que obtenemos al introducir los errores en los puntos nominales, en el gráfico quedan representados como los puntos finales de las flechas. Ya tenemos introducido en el programa unos puntos con unos errores conocidos.

Estos puntos sintéticos junto a los nominales son los que introducimos en las fórmulas desarrolladas en el apartado anterior. Podemos de esta manera calcular todos los errores geométricos que afectan a nuestra máquina. El opuesto a dichos errores son los que deberíamos introducir en nuestra máquina herramienta para que esta quede compensada, esta sería la forma de calibrarla, pero en este caso lo que estamos buscando es si las fórmulas halladas son correctas y validas. Para ello lo que hacemos es una comparación de los errores obtenidos con los errores introducidos, y deberían salirnos los mismos o por operaciones con decimales en las fórmulas muy parecidos.

En las siguientes gráficas podemos ver superpuestos ambos errores, lo que significa que nos salen idénticos, dando por bueno el método desarrollado.

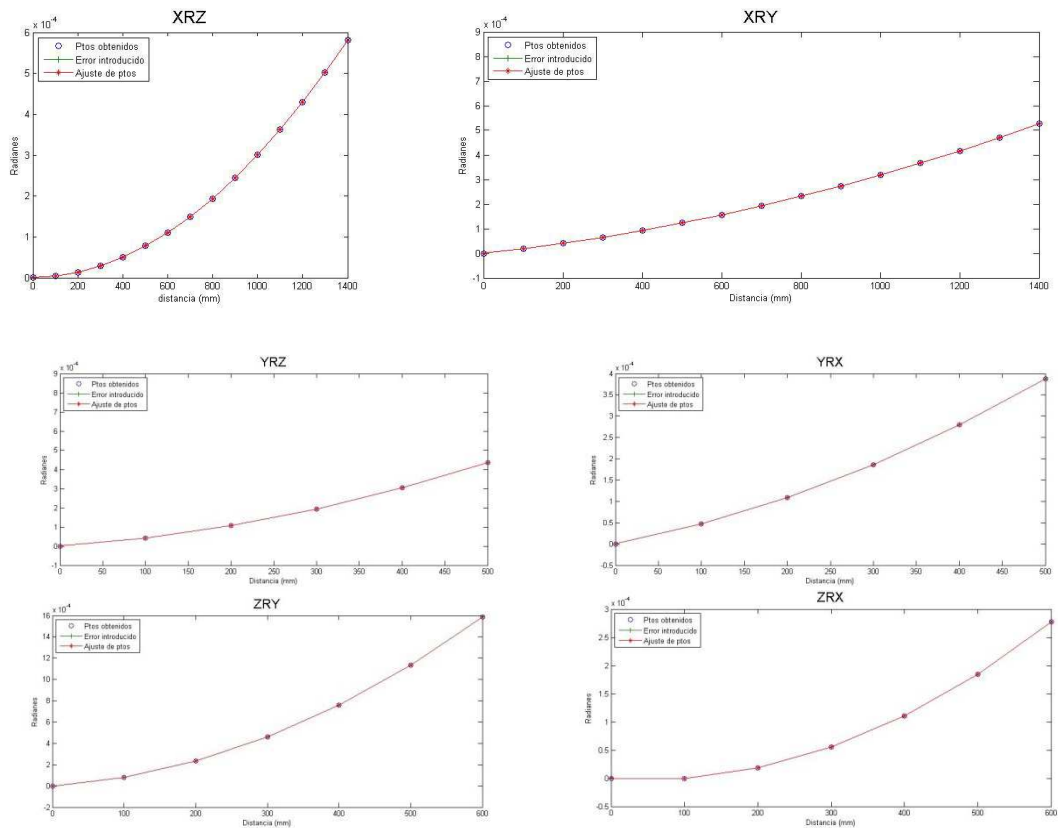


Figura 4.5-3 Gráficas comparativas de los errores de deriva y rumbo entre los errores introducidos y los obtenidos

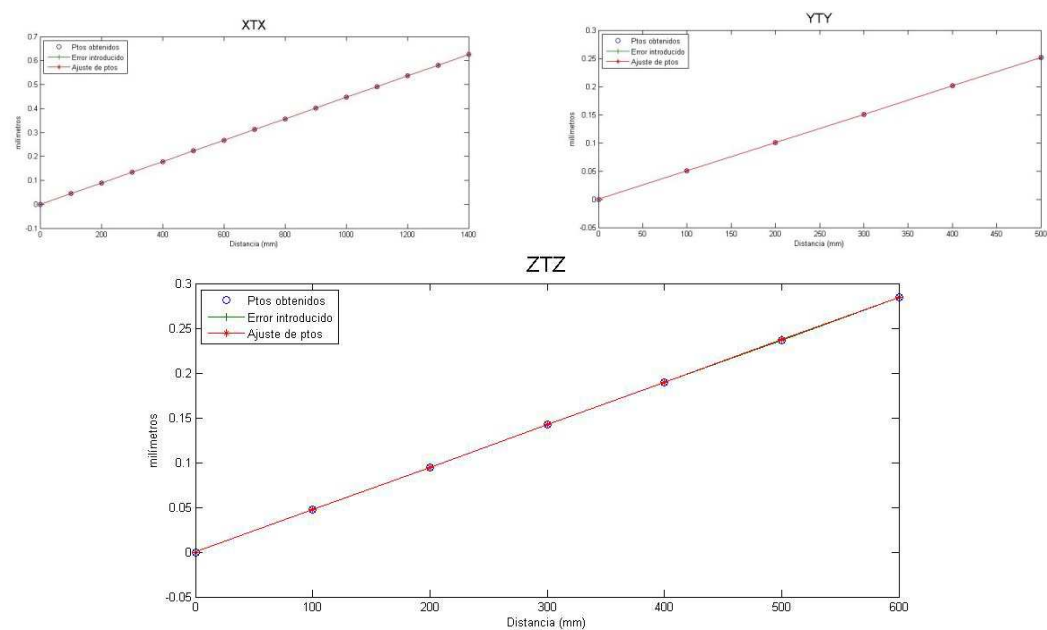


Figura 4.5-4 Gráficas de los errores de posición entre los errores introducidos y los obtenidos

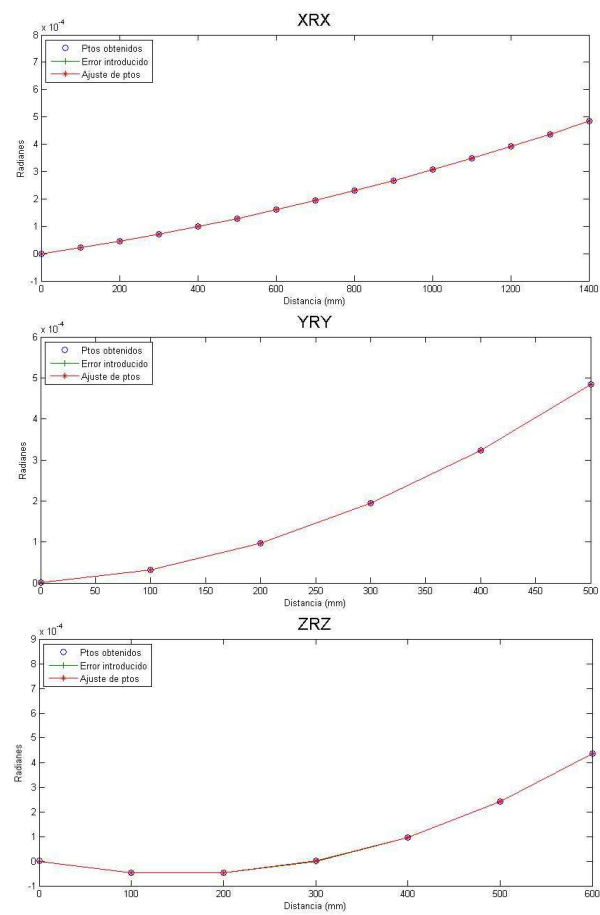


Figura 4.5-5 Gráficas de los errores de vuelco entre los errores introducidos y los obtenidos

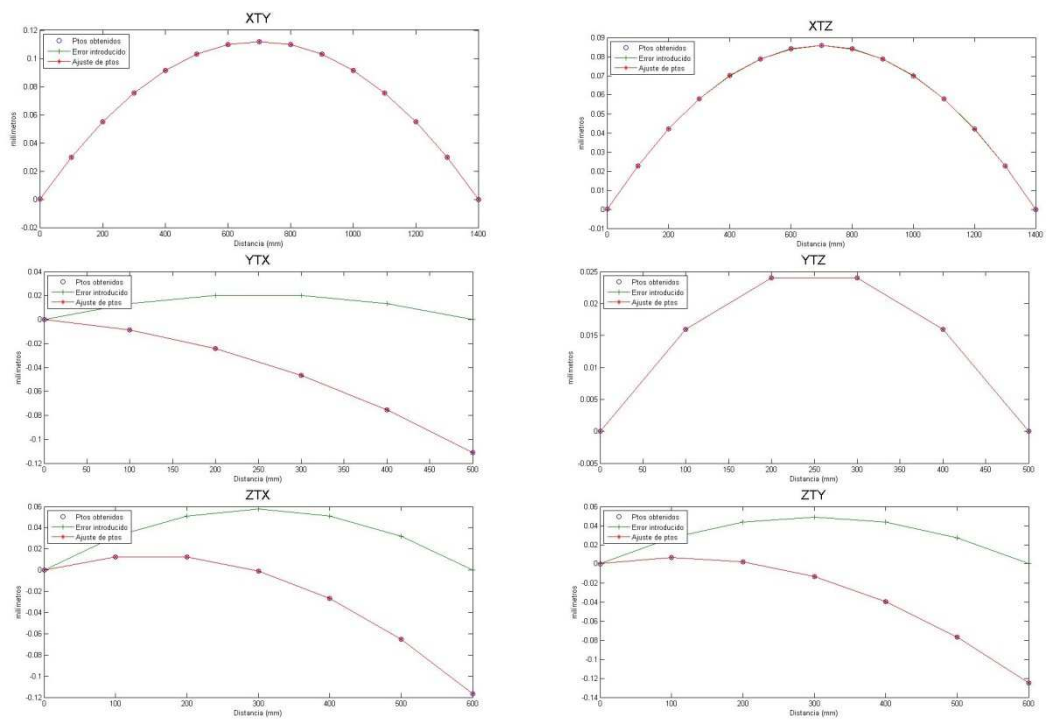


Figura 4.5-6 Gráficas de los errores de rectitud entre los errores introducidos y los obtenidos

Como podemos ver en los errores yTx , zTx y zTy los valores introducidos con los calculados no coinciden, esto es debido a que en el programa no han sido divididos todos los errores y los de perpendicularidad quedan incluidos en los errores anteriores.

Para ver el residuo que queda lo que hacemos es pasar de nuevo el modelo matemático para los nuevos errores y calcular otros puntos sintéticos. Estos nuevos puntos sintéticos son representados gráficamente junto a las anteriores y podemos ver el residuo que deja.

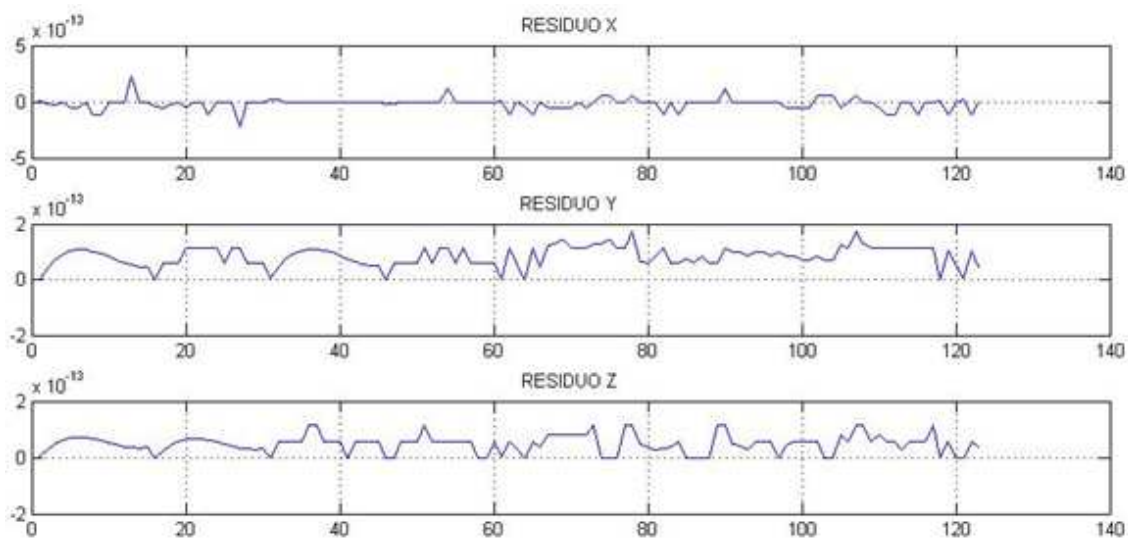


Figura 4.5-3 Gráficas de residuos en las diferentes coordenadas de los puntos

Como podemos ver el valor de los puntos varia muy poco ya que el orden de magnitud es de 10^{-13} , pudiendo dar este valor como nulo o cero, quedando validado el método.

5. EXPLICACIÓN DEL ENSAYO

En este apartado vamos a aplicar el método descrito en el apartado 4.4 para la obtención de errores geométricos y vamos a describir el procedimiento para realizar las mediciones de la barra de bolas calibrada.

El proceso de verificación se ha efectuado con una máquina fresadora (ANAYAK) de tres ejes, con control numérico FAGOR 8024. Para ello la máquina estaba descargada, es decir, sin piezas de trabajo, completamente montada y en condiciones de trabajo en vacío.

En el capítulo anterior hemos visto que se necesita tomar medida de la barra de bolas en 12 posiciones diferentes y 16 mediciones en esas posiciones, claro que eso era la teoría. Llevarlo a lo práctica no es tan sencillo, ya que por el tamaño de la barra de bolas (720 mm de longitud con 13 esferas separadas entre sí 60 mm), la máquina no ofrece la posibilidad de medirla completamente o por utilizar el palpador autocentrante, no podemos palpar a la barra de bolas calibrada de cualquier manera ni desde cualquier punto como exponía el método, ya que tenemos el impedimento de que los sensores podrían golpear a la propia barra antes que a las bolas. Por ello, finalmente se realizan 16 mediciones estando la barra en 12 posiciones diferentes.

El orden en el que se toman las medidas de la barra de bolas no es el mismo que el propuesto por el método, esto es únicamente por agilizar el proceso de medición ya que se utilizan utillajes que hay que montar y desmontar durante el ensayo. Estos utillajes son dos cubos y un cilindro calibrados que permiten colocar el palpador en diferentes posiciones, consiguiendo de esta manera los offsets requeridos por el método de calcular los errores.

Para realizar las medidas, contamos con un programa informático que nos ayuda a la hora de recoger los datos de las medidas y procesarlos. Dicho programa, recoge todos los datos en una hoja Excel para su posterior utilización y realiza una matriz de cambio de base, gracias a la cual podemos interpretar las medidas de los sensores y compararlas con las posiciones en las que se sitúa la máquina herramienta.

MEMORIA

Por último decir que todas las mediciones se han tomado un total de 3 veces cada una, para evitar posibles errores y asegurar la repetibilidad del proceso.

A continuación se muestra los sistemas de referencia utilizados en la máquina herramienta y palpador, siéndonos útiles para ver donde influirá la medida del offset. Como puede verse el sistema de referencia palpador se sitúa en la base del mismo.

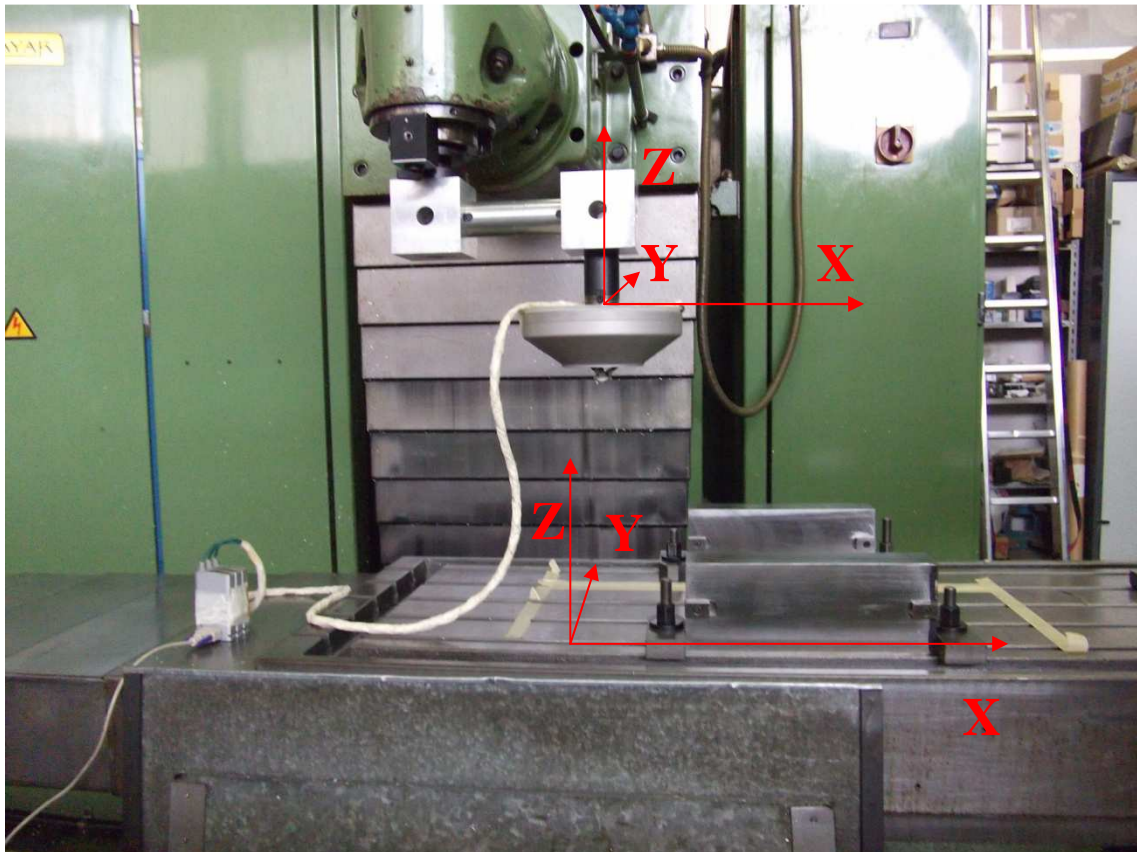


Figura 5 Ejes de la máquina herramienta y sistema referencia palpador

5.1. Iniciación del ensayo

Los pasos a seguir para comenzar el ensayo son los siguientes:

1. Comunicar la máquina al ordenador. De esta manera podremos utilizar el programa de ensayos creado.
2. Comunicar el palpador con el ordenador. Necesario para almacenar las lecturas obtenidas.
3. Abrir el programa creado.

MEMORIA

En este momento colocamos en la máquina el palpador con sus accesorios correspondientes y la barra de bolas en la posición que queramos medir. Los pasos siguientes son los mismos para todas las mediciones, con alguna diferencia que se explicara detalladamente en los siguientes apartados. Al inicializar el programa se nos muestra en pantalla la siguiente información.

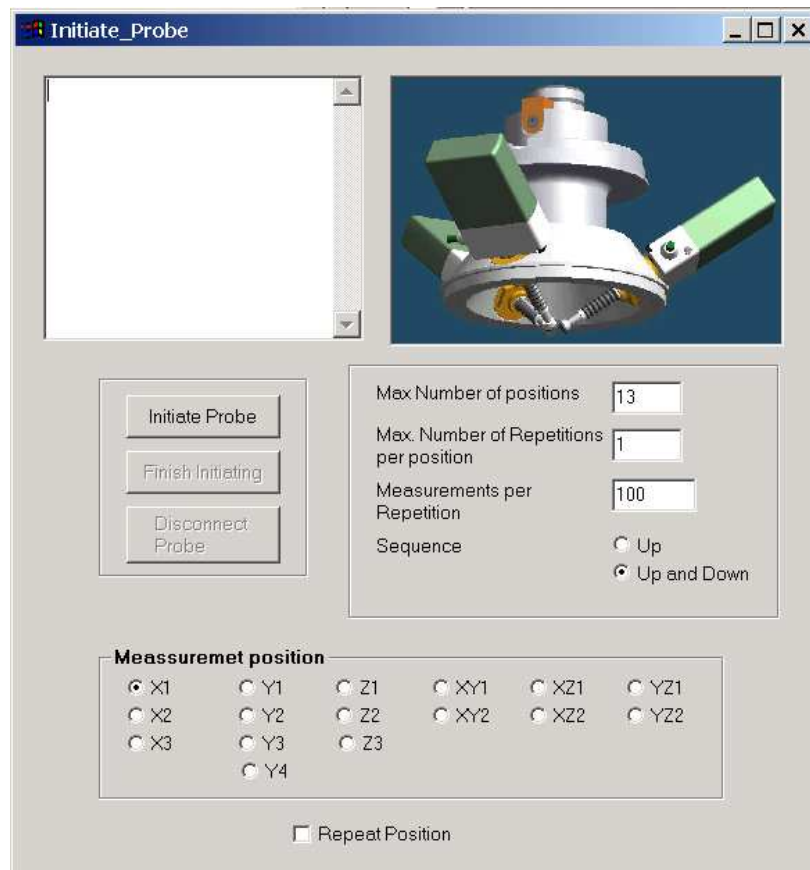


Figura 5.1-1 Software de control

- **Meassurement position:** En este apartado se selecciona la posición de la barra a medir, por defecto siempre marca X1. El no equivocarse de medida es importante, ya que para cada medida, el programa manda órdenes a la máquina diferentes pudiendo estropear la barra de bolas o el palpador si nos confundimos. Según la posición que marquemos condiciona también las bolas a medir.
- **Max. Number of positions:** Aquí se indica el número de bolas a medir de la barra. Este número viene condicionado de la posición que hayamos elegido, ya que por la geometría de la máquina en las mediciones de Y y

de Z, no podemos medir las 13 bolas de la barra y que en las diagonales solo se necesita la medida de 3 puntos de la barra. Las bolas medidas en cada posición son:

- 13 bolas: Para las mediciones de X1, X2 y X3.
 - 8 bolas: Para las mediciones de Y1, Y2, Y3 e Y4.
 - 6 bolas: Para las mediciones de Z1, Z2 y Z3.
 - 3 bolas: Para las mediciones de todas las diagonales.
- Max. Number of Repetitions per position: Es el número de veces que se mide cada bola. Por defecto siempre aparece uno.
 - Measurements per Repetition: Es el número de mediciones que se desean tomar para, haciendo la media de las mismas, obtener el centro de la esfera medida disminuyendo así el efecto del error de seguimiento del control de la máquina. Por defecto siempre marca 100 y es el número que nosotros hemos utilizado.
 - Sequence: Se selecciona el proceso de medida, ida o ida-vuelta. Para nuestro ensayo usamos la opción por defecto que es la opción de ida-vuelta.
 - Initiate Probe: Una vez hemos configurado el resto de parámetros pulsamos este botón. Al igual que en el programa de calibración mostrado en el apartado 3.2.4, abre la comunicación con la tarjeta para PC a la que se conectan los sensores. Nos pide que se debe realizar la inicialización de los encoders, para ello es necesario comprimir el vástago de cada sensor en el orden indicado en dicho cuadro de texto para su identificación y su puesta a cero.
 - Finish Initiating: Finaliza la inicialización una vez hemos realizado los pasos anteriores y nos abre la siguiente pantalla.

MEASUREMENT POSITION: YZ2

Ball search

Start Measurement YZ2

Last ball

Measuring position YZ2

POSITION 2
REPETITION 1 OF 0

Time in seconds
0,45

DOWN

Probe ref.

Probe	Value	range	X	Y	Z
LE 1	0,0000	0,0008	0,0314		
LE 2	-0,0233	0,0010		0,1710	
LE 3	0,0008	0,0025			-0,0527

Machine Tool ref.

Axis	Value	Abs. deviation
X	0121,038	3,9456
Y	-0317,876	1,4776
Z	0417,945	0,0919

Figura 5.1-2 Interfaz para la toma de datos

Al pulsar el botón de finalizar la inicialización nos abre la pantalla mostrada en la figura 5.1-2. En esta pantalla podemos ver las medidas de los sensores y la posición en la que se encuentra el cabezal de la máquina herramienta. Este interfaz y los pasos que debemos de seguir valen para todas las medidas que vamos a realizar.

1. Debemos situarnos en la primera bola. Para cada medida la primera bola cambia, ya que como hemos comentado no en todas las posiciones medimos la misma cantidad de bolas. Nos colocamos pues en la primera bola con los sensores comprimidos entre 4 y 5 mm y pulsamos 'start measurement'. A continuación, en la bola se realiza un proceso de medida que consiste en la toma de nueve puntos contenidos dentro de un rango de $\pm 1\text{mm}$ alrededor de su centro. Con las coordenadas de estos nueve puntos en el sistema de referencia máquina y en el

palpador es posible calcular la matriz de transformación que los relaciona. Seguidamente el palpador se separa de la bola y nos lleva, según la posición que hayamos elegido, aproximadamente hasta la última bola de la serie.

2. En este segundo paso debemos situar el palpador en la última bola, nuevamente comprimido entre 4 y 5 mm y pulsamos 'Last ball'. Tras realizar la medida, la máquina se separa y se sitúa de nuevo en la primera bola, comenzando así el proceso de medida.

El proceso de medida comienza en la primera bola y tras su medición, y según la posición de la barra de bolas, la máquina se desplaza a lo largo de esta situándose en cada una de ellas el tiempo suficiente para permitir la captura del valor de la posición alcanzada. En el proceso de medición, en la primera posición en sentido creciente y en la primera en sentido decreciente, se ha retrocedido en el primer caso y avanzado en el segundo, 5 mm en dirección del eje de movimiento, la finalidad de esta operación es que aparezca el juego del eje y tenerlo en cuenta en los datos.

Tras finalizar el proceso, el software guarda en un fichero Excel todos los datos.

5.2. Secuencia de mediciones

Como hemos dicho anteriormente, la secuencia de medición no es idéntica a la del modelo ni tampoco las posiciones de la barra. Esto es debido al tiempo que cuesta montar y desmontar cada utillaje de la máquina y prepararlo para el siguiente, la secuencia de posiciones de la barra de bolas y los utillajes utilizados serán los siguientes.

5.2.1. Posiciones en Z y sus diagonales

Se miden las posiciones Z_1 , Z_2 , Z_3 , XZ_1 , XZ_2 , XZ_3 , YZ_1 e YZ_2 . El modelo teórico decía que para la determinación de los errores en Z, bastaba con colocar la barra de bolas en una en dirección paralela al eje Z y medir con tres sensores la barra, ya que esto no es posible porque el sensor autocentrante solo dispone

de un sensor, lo que hacemos es intentar dejar el palpador fijo y ser la barra de bolas la que se posicione a su alrededor.

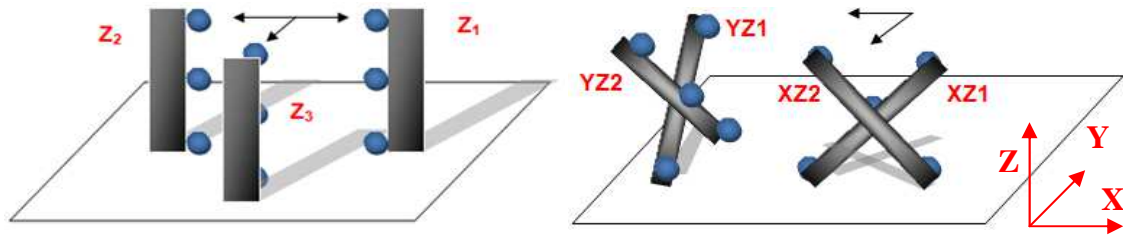


Figura 5.2.1-1 Disposición de la barra de bolas para medir en el eje Z y sus diagonales

Para la toma de medidas el utillaje a utilizar es únicamente el cubo en el cual se sujeta el palpador. Dicho cubo va unido al cabezal de la fresadora mediante un cono para mangos de herramienta estándar. Para realizar la toma de medidas de las diferentes Z o las diagonales basta con orientar el cabezal hasta la posición deseada. Dicho cabezal a la hora de introducirlo en las fórmulas en todas posiciones tendrá un offset en Z, ya que hemos tomado como referencia la base del palpador en su punto más bajo, mas luego un offset en X y en Y según este orientado el cabezal.



Figura 5.2.1-2 Utillaje utilizado para las mediciones en Z y sus diagonales

Para las posiciones a lo largo del eje Z la medición empieza cogiendo la cuarta bola empezando desde abajo y tras hacer el cubo con el cual realiza el cambio de base, asciende 300 mm hacia arriba pasando por 6 bolas. Seguidamente baja hasta abajo y realiza todas medidas como hemos nombrado antes. Según la posición en el eje Z que estemos, el movimiento que realiza el cabezal para retirarse es distinto. Para asegurar las barras utilizamos unos gatos y para intentar mantenerla lo más recta posible utilizamos una escuadra.



Figura 5.2.1-3 Mediciones de la barra de bolas en las posiciones Z_1 , Z_2 y Z_3

Al igual que en el caso anterior, para medir las diagonales, inicialmente se palpa la cuarta bola empezando por abajo. En este caso la barra de bolas se coloca a 45° con la horizontal, tanto para las YZ como para las XZ, de tal manera que el cabezal de la máquina asciende 300 mm en Y y 300 mm en Z para el primer caso y 300 mm en X y 300 en Z para el segundo, colocándose en la octava bola contando desde abajo. Cuando se mide la bola número ocho y baja hasta abajo para empezar a medir, al final no para en dicha bola, sino en la nueve.



Figura 5.2.1-4 Mediciones de la barra de bolas en las posiciones YZ_1 e YZ_2



Figura 5.2.1-5 Mediciones de la barra de bolas en las posiciones XZ_1 e YZ_2

5.2.2. Posiciones en Y

Para esta nueva medición de posiciones lo primero que debemos hacer es cambiar el cabezal. En este caso el cabezal dispone de dos cubos, uno de ellos unido a la fresadora y en el otro se inserta el palpador, y un cilindro que une ambos cubos.



Figura 5.2.2-1 Utillaje utilizado para las mediciones en Y

Con esta nueva configuración tomaremos medida de la barra de bolas en las posiciones Y_1 , Y_2 , Y_3 e Y_4 . A la hora de desarrollar las fórmulas, este cabezal proporciona un offset en la dirección X. En este caso la barra de bolas se colocara en dos posiciones paralelas al eje Y a dos alturas diferentes y será el cabezal el que gire para obtener las cuatro mediciones. Para conseguir dicha

altura utilizamos dos bloques patrón de acero de igual tamaño. Para la sujeción utilizamos fijadores magnéticos.

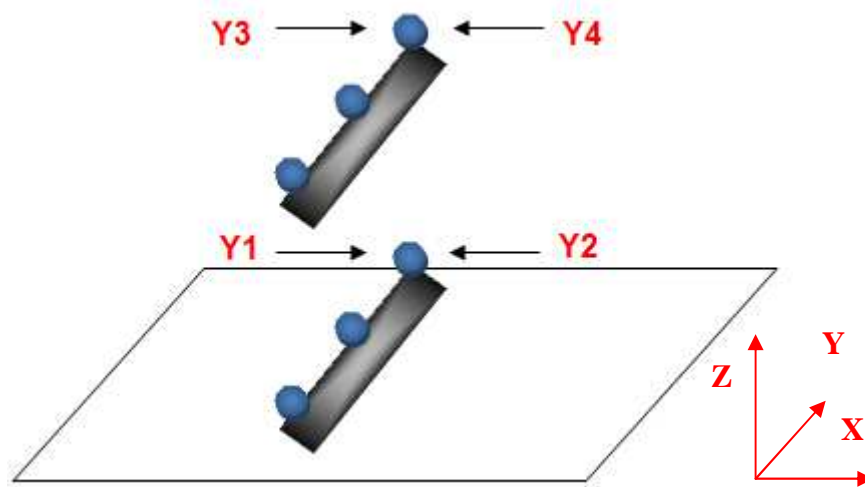


Figura 5.2.2-2 Disposición de la barra de bolas para medir en el eje Y

En este caso tampoco medimos la barra por completo, se miden únicamente 8 bolas, comenzando por cuarta al igual que en los casos anterior.



Figura 5.2.2-3 Mediciones de la barra de bolas en las posiciones Y_1 , Y_2



Figura 5.2.2-4 Mediciones de la barra de bolas en la posición Y_4 con los bloques patrón

5.2.3. Posiciones en X y sus diagonales

Para las siguientes medidas cambiamos el cabezal por última vez y realizamos las medidas a lo largo del eje X. El cabezal consta únicamente de un cubo en cual va montado el palpador.



Figura 5.2.3-1 Utillaje utilizado para las mediciones en X y sus diagonales

En el caso de las medidas X_1 , X_2 y X_3 esta vez sí que va a ser medido las 13 bolas que contiene la barra de bolas. Por lo tanto se situara en la primera bola

para iniciar el programa y este nos desplazara hasta la última. Para la toma de las diagonales también mide desde la primera bola y se desplaza hasta la última, midiendo después la bola intermedia.

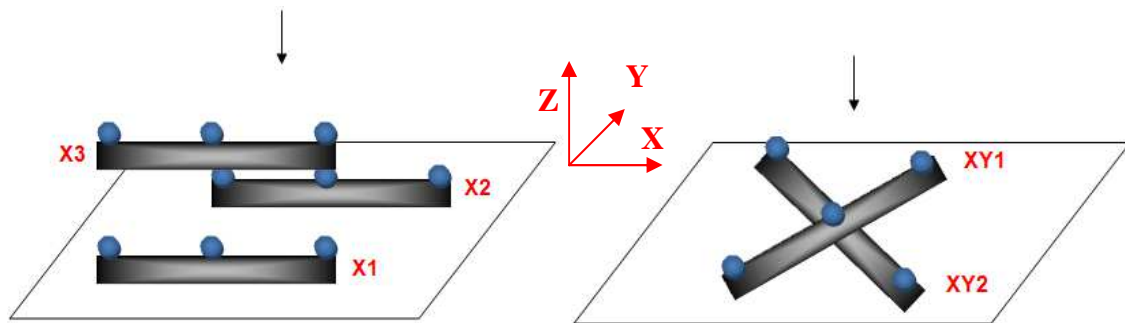


Figura 5.2.3-2 Disposición de la barra de bolas para medir en el eje X y sus diagonales

Para la medida de X_3 volvemos a utilizar los bloques patrón para levantarlo una distancia en Z y las diagonales de nuevo las situamos a 45° .



Figura 5.2.2-3 Mediciones de la barra de bolas en las posiciones X_1 , X_3 , XY_1 y XY_3

5.3. Análisis de los resultados

Tras realizar el ensayo de verificación de la fresadora con el palpador autocentrante, obtenemos los diferentes errores geométricos que le afectan. A continuación analizamos dichos errores obtenidos con el método de la barra patrón y palpador autocentrante y los comparamos con los errores obtenidos con otro método más fiable, como es el método del interferómetro laser. Dichas comparativas se realizan únicamente de los errores que afectan al eje lineal X, ya que disponemos de datos tomados con anterioridad del interferómetro en dicho eje. Los errores a analizar son los errores de traslación (posición y rectitudes) y los errores de rotación (rumbo y cabeceo).

El método láser proporciona mejores resultados debido a su baja incertidumbre de medida y a su buena estabilidad frente a las vibraciones de la máquina y las condiciones ambientales. Sin embargo, con la utilización del método barra-palpador se simula de manera más realista el movimiento que sigue la máquina en la mecanización de una pieza en una situación de funcionamiento real. Comprobaremos pues los beneficios que supone el uso del palpador frente al interferómetro.



Figura 5.3 Medición según el método del palpador autocentrante y del interferómetro laser.

5.3.1. Error de posición xTx

Los datos representados en las gráficas se han obtenido como media de 3 mediciones (tanto con el láser como con el palpador), entendiendo por una medición, el recorrido tanto creciente como decreciente del campo de medida y la media de ambos. El rango entre el máximo valor medido y el mínimo para las 3 series en los sentidos creciente y decreciente, es mejor que 2 μm para el palpador y 1 μm para el interferómetro.

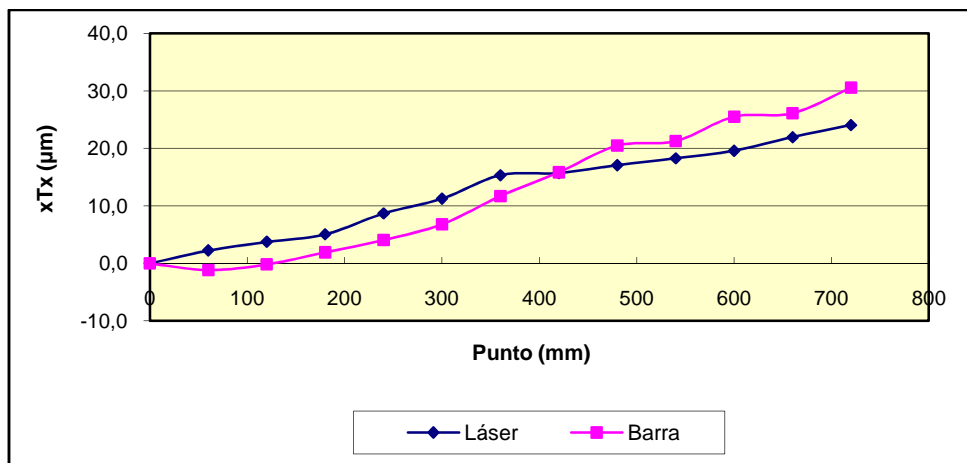


Figura 5.3.1 Comparación del error de posición xPx medido con ambos.

Analizando la figura 5.3.1, se observa los dos métodos siguen una trayectoria similar alcanzándose diferencias no mayores de 3 μm hasta el punto 420. Sigue existiendo un comportamiento aproximadamente lineal y el juego sigue siendo de 20 μm en ambos métodos. En la parte final aumentan ligeramente las diferencias (> 6 μm) a pesar de que las tendencias del error entre los datos medidos por el método del láser y el método de la barra de esferas son similares. Si se toma como referencia el método del interferómetro láser, se puede atribuir la diferencia del sistema barra-palpador con respecto a él a diferentes causas: posible error de medición del palpador (su error de medida es de aproximadamente $\pm 2 \mu\text{m}$), posibles errores en la calibración de la barra de bolas, posibles dilataciones o contracciones de la barra (a pesar de que la medida es muy rápida y se realiza una corrección aproximada de la temperatura), posibles vibraciones de la máquina durante el proceso que afecten a la medida del palpador (a pesar de que se realiza una media de 100

medidas individuales en cada punto, éstas presentan un recorrido de aproximadamente $\pm 2 \mu\text{m}$).

En la Tabla 5.3.1, se muestran el tiempo aproximado que se ha invertido en el diagnóstico del error. En éste se incluye el montaje, puesta en marcha del instrumento y proceso de medida de los tres ciclos.

Métodos	Tiempo aproximado empleado en la medición
Interferómetro láser	90 minutos
Barra de esferas y palpador autocentrante	45 minutos

Tabla 5.3.1 Comparación entre método para la medición del error xPx.

5.3.2. Error de rectitud xTy

Para obtener las rectitudes a partir de las mediciones de los instrumentos, se ha utilizado el criterio de error nulo en el punto inicial y en el punto final. En la siguiente figura se muestran los resultados del error xTy para cada uno de los métodos.

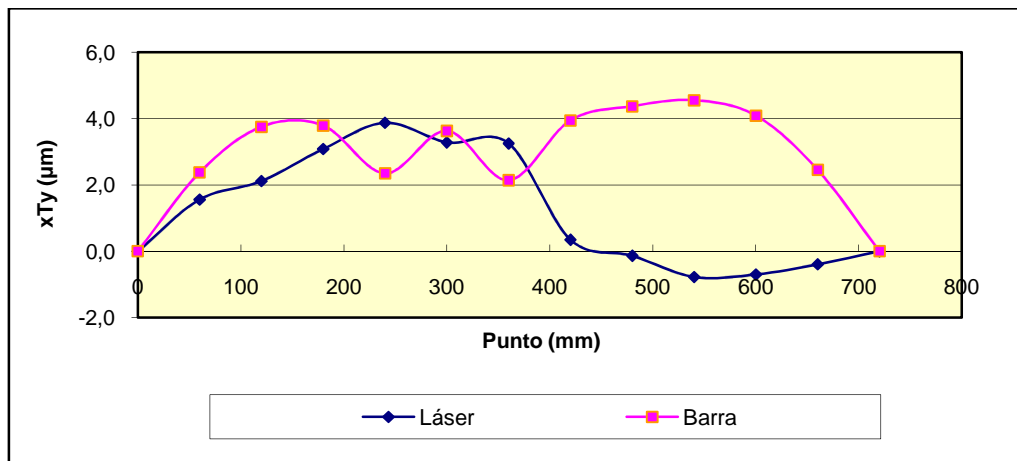


Figura 5.3.2 Comparación del error de posición xTy

Se observa que el método láser y la barra de esferas tienen un comportamiento similar hasta el punto 400. La diferencia puede ser debida a errores de

calibración de la barra en dirección Y, resultando ésta no del todo precisa a partir de este punto. Analizando la figura, se observa que existe una diferencia de $\pm 3 \mu\text{m}$ entre el láser y el método de la barra-palpador. Por otro lado, en la Tabla 5.3.2 se comparan las características del ensayo obtenidas por los dos métodos directos, comprobando de nuevo que el tiempo del palpador-barra es mucho menor.

Métodos	Tiempo aproximado empleado en la medición
Interferómetro láser	100 minutos
Barra de esferas y palpador autocentrante	45 minutos

Tabla 5.3.2 Comparación para el error xTy.

5.3.3. Error de rectitud xTz

Para este error la planitud de la mesa afecta de manera significativa ya que desviaciones en dirección Z se pueden originar por valles en la mesa. Por este motivo, para realizar la comparación entre los dos métodos se ha elegido la posición X3 de la barra, en la que ésta se encuentra ubicada sobre dos apoyos puntuales (bloques patrón).

En la gráfica 5.3.3 se muestran los resultados (aplicando la aproximación de ajuste por punto final) del error de rectitud de la máquina.

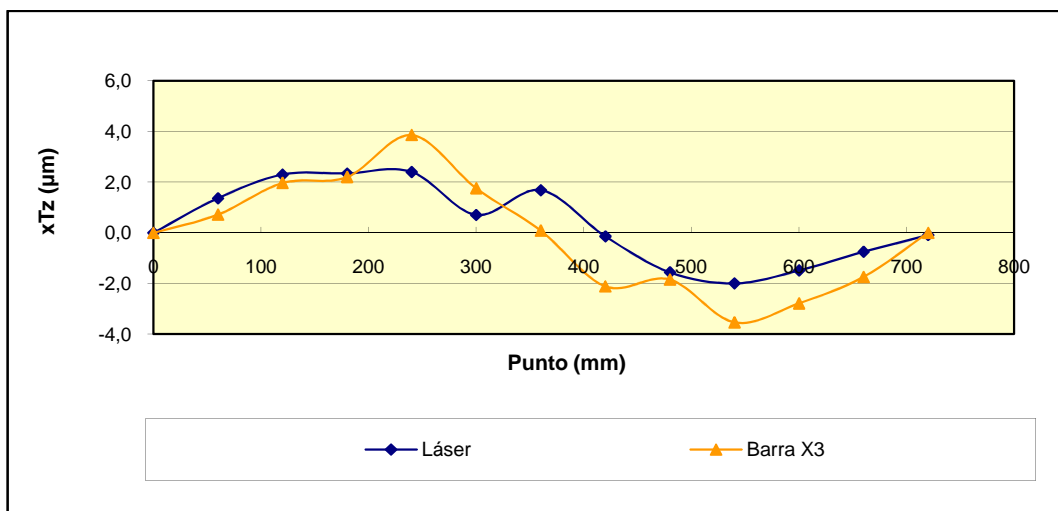


Figura 5.3.3 Comparación de resultados del error de rectitud xTz

Si se toma el láser como referencia, la barra de esferas sigue una progresión similar en los valores alcanzados y en la trayectoria seguida. Los resultados de los dos métodos son muy parecidos con diferencias entre ellos de pocos micrómetros. A continuación se muestran las características de los instrumentos desde el punto de vista de la funcionalidad (Tabla 5.3.3).

Métodos	Tiempo aproximado empleado en la medición
Interferómetro láser	100 minutos
Barra de esferas y palpador autocentrante	45 minutos

Tabla 5.3.1. Comparación para el error xTz.

5.3.4. Error de Cabeceo xRy

En la siguiente gráfica se muestra el error de cabeceo xRy de la fresadora diagnosticado con el interferómetro láser y el método de la barra.

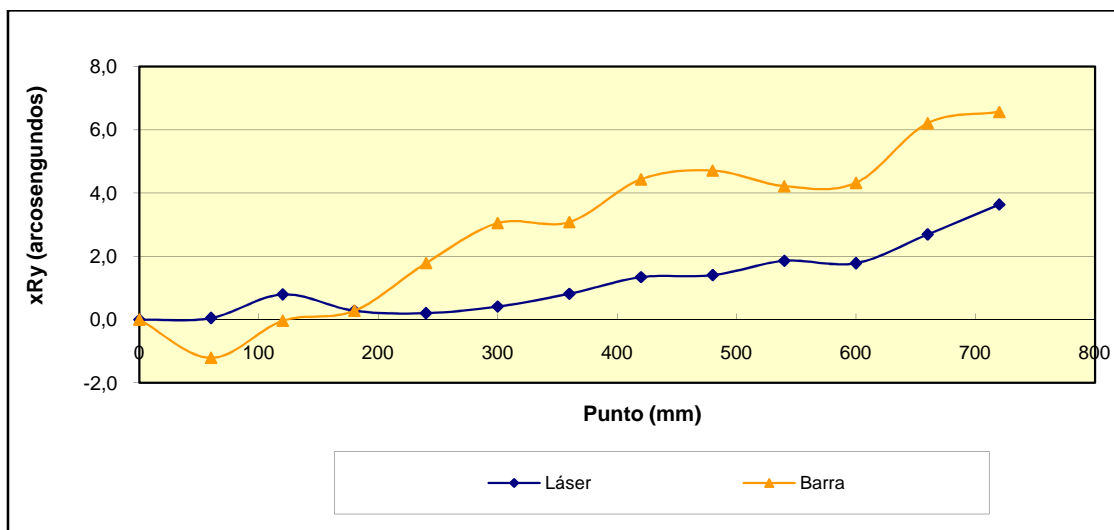


Figura 5.3.4 Comparación del error de cabeceo xRy

En la gráfica 5.3.4, tanto el método de la barra como el láser obtienen un error con una trayectoria semejante existiendo entre ambos diferencias menores de 2,5 arcosegundos.

Métodos	Tiempo aproximado empleado en la medición
Interferómetro láser	90 minutos
Barra de esferas y palpador autocentrante	90 minutos

Tabla 5.3.4 Comparación para el error xRy.

Los errores de ángulo, en general, para el método de la barra necesitan del doble de esfuerzo que el diagnóstico de los errores de traslación. El motivo de esta situación es porque se necesita medir la barra en dos posiciones paralelas.

Con el método barra-palpador se ha determinado un error con una trayectoria similar al del láser pero con valores distintos. Esto se debe en gran parte a la superposición de errores de ángulo en cada posición de la barra y al valor de la distancia entre las ubicaciones de las mismas.

5.3.5. Error de rumbo xRz

Por último comparamos de nuevo el interferómetro láser con el método de la barra.

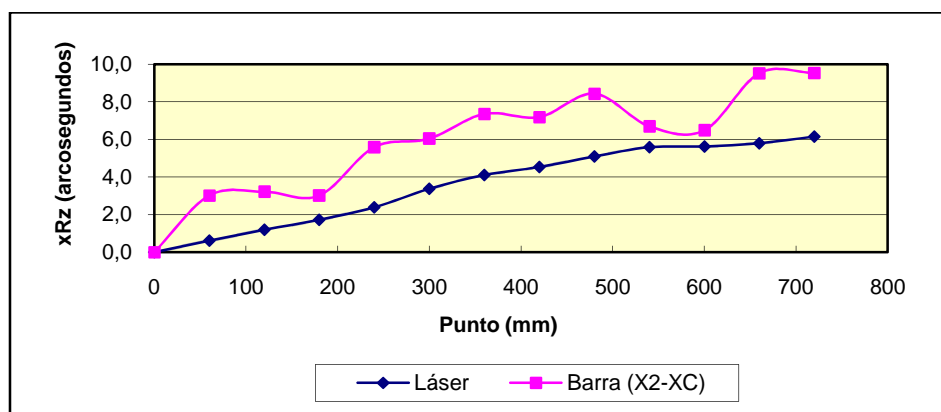


Figura 5.3.5 Comparación del error de rumbo xRz

Las diferencias entre los resultados se deben a que el interferómetro láser mide los giros que experimenta la lente reflectora y no acumula ningún error

geométrico más. Sin embargo, con la barra, para determinar el error de ángulo se necesita medir las desviaciones de posición en dos posiciones paralelas, por lo que se acumulan errores en cada medición. En definitiva, el método de la barra, es más propenso a acumular fuentes de error, lo que repercute en su resultado final. En la Tabla 5.3.5, se comparan los resultados obtenidos con los dos métodos en el ensayo.

Métodos	Tiempo aproximado empleado en la medición
Interferómetro láser	90 minutos
Barra de esferas y palpador autocentrante	90 minutos

Tabla 5.3.5 Comparación para el error xRz.

5.3.6. Comparación de tiempos de verificación

En los apartados anteriores, se ha realizado una comparación de tiempos (por error) para cada uno de los métodos. Con el objetivo de tener una visión más global, en este apartado se va a realizar una comparación del tiempo total empleado en la verificación de la fresadora con los dos métodos utilizados: el método del interferómetro láser y el método de la barra de esferas y palpadores autocentrantes.

En la siguiente tabla, se indica de forma orientativa, el coste del tiempo empleado en el montaje y en la medición de los errores.

Métodos	Interferómetro láser	Barra de esferas y palpadores autocentrantes
Posición (xPx)	90	45
Rectitud (xTy)	100	45
Rectitud (xTz)	100	45
Cabeceo (xRy)	90	90
Rumbo (xRz)	90	90
Tiempo total	690	405

Tabla 5.3.6 Tiempos empleados en la verificación (en minutos).

A partir de la suma de tiempos, se obtiene el tiempo total empleado en la verificación pudiéndose extraer como conclusiones:

- El coste total empleado por el sistema barra-palpador es aproximadamente un 40% menor que con el del interferómetro láser, es decir, se reduce casi a la mitad el tiempo empleado en la verificación.
- El tiempo de preparación del instrumento (montaje) con el método barra-palpador puede ser aproximadamente un 75% menor que el del interferómetro láser para la medición de los errores de un eje. Esto es debido a que el montaje de las lentes y alineación del láser requiere de más esfuerzo que el montaje del palpador en el cabezal de la máquina y de la barra en la mesa.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Para concluir podemos decir que hemos obtenido un método de obtención de los errores de una máquina herramienta de manera rápida y precisa. Este método nos permite obtener todos los errores de una vez mediante la formulación matemática desarrollada en las anteriores hojas y la explicación del ensayo puede valer para posteriores calibraciones. Dejando como trabajo para el futuro las siguientes cuestiones.

- Obtener otros métodos de verificación de los errores en máquina herramienta más rápidos y precisos.
- Realizar nuevas calibraciones tanto del palpador como de la máquina herramienta para conseguir mejorar sus presiones.
- Preparar un software o programa que permita el uso de todas las fórmulas directamente al medir las barras, sin tener que trasladar los datos a otros software exteriores.

7. BIBLIOGRAFÍA

- A Displacement Method for Machine Geometry Calibration. G. Zhang, R. Ouyang, B. Lu, Tianjin University / PRC; R. Hocken; R. Veale, A. Donmez.
- Medición de errores geométricos sistemáticos en máquina de medición por coordenadas por el método de barra de bolas. Octavio Icasio Hernández, Eugen Trapet.
- Geometrical verification of machine tools using laser tracker and multilateration techniques. José A. Yagüe-Fabra, Jesús Velázquez, Diana Acosta. Universidad de Zaragoza.
- Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements. Sergio Aguado, David Samper, Jorge Santolaria, Juan Jose Aguilar. Universidad de Zaragoza.
- Software compensation of rapid prototyping machines. Kun Tong, E. Amine Lehtihet, Sanjay Joshi.
- A Method for Squareness Error Verification on a Coordinate Measuring Machine. J.-P. Kruth, L. Zhou, C. Van den Bergh and P. Vanherck.
- Recomendación VDI/VDE 2617/1: Accuracy of Coordinate Measuring Machines; Characteristics and their Checking; Generalities, 1986.
- Recomendación VDI/VDE 2617/2.1: Accuracy of Coordinate Measuring Machines; Characteristic Parameters and their Checking; Measurement Task Specific Measurement Uncertainty; Length Measurement Uncertainty, 1986.
- Recomendación VDI/VDE 2617/3: Accuracy of Coordinate Measuring Machines; Characteristic Parameters and their Checking; Components of Measurement Deviation of the Machine, 1989.
- www.mfgnewsweb.com

MEMORIA

- www.measurementdevices.com
- www.interempresas.net
- www.renishaw.es
- www.hexagonmetrology.com
- www.faro.com
- www.leica-geosystems.com
- www.ibspe.com
- www.heidenhain.es
- www.measurecontrol.com
- www.interempresas.net
- www.hamarlaser.com