



## Trabajo Fin de Grado

Verificación geométrica de Máquina  
Herramienta con Ballbar telescópico

Autor/es

Carolina González Sáez

Director/es

Juan José Aguilar Marín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2015





**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Carolina González Sáez

con nº de DNI 73029036 B en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado (Título del Trabajo)

Verificación Geométrica de Máquina Herramienta con Ballbar telescopico

---

---

---

---

---

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 4 de Septiembre de 2015

Fdo:



## **Verificación geométrica de Máquina Herramienta con Ballbar telescopico.**

### **RESUMEN**

El Trabajo de Fin de Grado se centra en la verificación geométrica de tres Máquinas Herramienta de control numérico disponibles en el taller del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Zaragoza. Las máquinas evaluadas son la fresadora de tres ejes ANAYAK VH1800, fresadora de tres ejes KONDIA B-500 y el torno de dos ejes PINACHO S94 C180.

Los ensayos se llevan a cabo con un Ballbar telescopico Renishaw modelo QC10. Este sistema cuenta con un sensor lineal telescopico de precisión y con una bola de reglaje en uno de sus extremos que permite, mediante ensayos circulares, detectar una serie de errores geométricos, errores de ejecución y errores dinámicos presentes en la Máquina Herramienta.

Renishaw cuenta con un software propio que permite la ejecución de los ensayos, según diferentes modos de trabajo, y la revisión de los resultados mediante la elaboración de un diagnóstico. También ofrece un programa de simulación de errores de máquina. En él, se puede representar la influencia que tiene en el trazado un único error o bien la influencia de la superposición de varios errores.

El desarrollo del TFG implica una serie de trabajos previos. En primer lugar, hay que familiarizarse con el Ballbar telescopico, los elementos que forman el sistema de medición completo, incluyendo el kit adaptador para torno, y su correcta colocación en la máquina. Es necesario tener una serie de conocimientos previos sobre la máquina que se va a emplear, así como entender el funcionamiento del control Fagor que utiliza. También se escriben los diferentes programas de control numérico que usará el Ballbar para realizar las diferentes trayectorias en los ensayos.

La verificación se lleva a cabo en diferentes planos de ensayo, variando parámetros como la longitud del Ballbar, que determina el radio nominal del ensayo circular, el arco de recogida de datos, con el sobrerrecorrido correspondiente, y la velocidad de avance.

Para finalizar, se analizan los diagnósticos obtenidos de cada ensayo y se obtienen una serie de conclusiones. Se tiene en cuenta que para avances elevados, al adquirir mayor importancia el error de seguimiento, el resto de resultados del diagnóstico se ven enmascarados por éste, impidiendo la evaluación individual de cada error; por el contrario, en ensayos a avance pequeño, se detectan mejor los errores de tipo geométrico que afectan al mecanizado de la pieza.



## Agradecimientos

Debo agradecer a Juan José Aguilar, director de este Trabajo Fin de Grado, su ayuda y supervisión a lo largo del mismo.

También quiero agradecer al personal del taller su colaboración y amabilidad a la hora de trabajar con las diferentes máquinas.

Por último, me gustaría agradecer a todos mis familiares y amigos la fuerza y alegría que me han transmitido a lo largo de estos años de carrera. Sin su apoyo, probablemente, este trabajo sería un sueño y no una realidad.



## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	13
1.1.	Objeto del Trabajo de Fin de Grado .....	13
1.2.	Objetivos.....	13
1.3.	Estructura del TFG.....	14
2.	Estado del arte. ....	16
2.1.	Tipos de Máquina Herramienta. ....	16
2.2.	Tipos de errores de Máquina Herramienta. ....	17
2.3.	Componentes del error geométrico.....	17
2.3.1.	Errores de traslación.....	17
2.3.2.	Errores de rotación. ....	18
2.3.3.	Errores de perpendicularidad. ....	18
2.4.	Error de seguimiento.....	19
3.	Sistema de medida.....	21
3.1.	Qué es un Ballbar .....	21
3.2.	Elementos que forman el sistema de medida.....	21
3.3.	Software Renishaw Ballbar QC20.....	23
3.4.	Simulador de errores Renishaw. ....	24
4.	Ensayos.....	26
4.1.	Fresadora KONDIA.....	28
4.1.1.	Plano de ensayo XY.....	29
4.1.2.	Planos de ensayo YZ y ZX.....	34
4.1.3.	Conclusiones de los ensayos. ....	36
4.2.	Fresadora ANAYAK. ....	37
4.2.1.	Plano de ensayo XY.....	38
4.2.1.1.	Juego en los ejes X e Y .....	42
4.2.2.	Planos de ensayo YZ y ZX.....	43
4.2.3.	Conclusiones del ensayo. ....	46
4.3.	Torno PINACHO. ....	47
5.	Conclusiones.....	54
5.1.	Trabajo realizado. ....	54
5.2.	Líneas de trabajo futuro. ....	55
	Anexo I.....	56
	Anexo II.....	65
	Anexo III .....	75
	Anexo IV .....	92
	Referencias .....	100



# Índice de figuras

Figura 2.1: (a) Fresadora ANAYAK; (b) Fresadora KONDIA .....	16
Figura 2.2 Torno PINACHO .....	17
Figura 2.3: Errores de traslación.....	18
Figura 2.4: Errores de rotación .....	18
Figura 2.5: Error de perpendicularidad.....	19
Figura 2.6: Lazo de control de una Máquina Herramienta.....	19
Figura 2.7: Trayectoria sin desviaciones .....	20
Figura 2.8 Trayectoria con desviaciones .....	20
Figura 3.1 Ballbar telescopico QC 10 .....	21
Figura 3.2: Transductor e interfaz del sensor .....	22
Figura 3.3: (a) Barra de extensión; (b) montaje magnético; (c) copa magnética. ....	22
Figura 3.4:Kit adaptador para torno. ....	23
Figura 3.5: Accesorio de radio reducido. ....	23
Figura 3.6 Simulador Renishaw .....	25
Figura 4.1:Planos de ensayo .....	26
Figura 4.2: Diagnóstico fresadora KONDIA, XY ,F10mm/min .....	29
Figura 4.3: Diagnóstico fresadora KONDIA, XY, F10mm/min. ....	30
Figura 4.4: Diagnóstico fresadora KONDIA, XY,F100mm/min. ....	31
Figura 4.5: Simulación de la holgura.....	31
Figura 4.6: (a) Simulación; (b) Superposición. ....	32
Figura 4.7: (a) Simulación; (b) Superposición. ....	32
Figura 4.8: (a) Simulación; (b) Superposición .....	33
Figura 4.9: (a) Simulación; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008. ....	33
Figura 4.10: Diagnóstico fresadora KONDIA, XY, F 1000mm/min .....	34
Figura 4.11: Diagnóstico fresadora KONDIA,YZ, F1000mm/min .....	35
Figura 4.12: Diagnóstico fresadora KONDIA,YZ, F100mm/min .....	35
Figura 4.13: Diagnóstico fresadora KONDIA, ZX, F1000mm/min .....	36
Figura 4.14: Diagnóstico fresadora KONDIA, ZX, F100mm/min .....	36
Figura 4.15: Diagnóstico fresadora ANAYAK, XY, F100mm/min. ....	38
Figura 4.16: Simulación de la holgura.....	39
Figura 4.17: (a) Simulación; (b) Superposición. ....	39
Figura 4.18: (a) Simulación; (b) Superposición. ....	40
Figura 4.19: (a)Simulación; (b) Superposición .....	40
Figura 4.20: (a) Simulación; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008 .....	41
Figura 4.21: Diagnóstico fresadora ANAYAK, XY, F1000mm/min. ....	41
Figura 4.22: Diagnóstico fresadora ANAYAK, XY, F 3000mm/min. ....	42
Figura 4.23: Diagnóstico fresadora ANAYAK, YZ, F1000mm/min .....	44
Figura 4.24: Diagnóstico fresadora ANAYAK,YZ , F 100mm/min .....	44
Figura 4.25: Diagnóstico fresadora ANAYAK, ZX, F1000mm/min .....	45
Figura 4.26: Diagnóstico fresadora ANAYAK, ZX, F100mm/min .....	45
Figura 4.27: Diagnóstico torno PINACHO, ZX , F 1000mm/min .....	48
Figura 4.28: Diagnóstico torno PINACHO, ZX , F 100mm/min .....	48
Figura 4.29: Desviación circular, torno PINACHO,ZX, F100mm/min .....	49
Figura 4.30: (a) Simulación; (b) Simulación (c) Simulación; (d) Simulación .....	50
Figura 4.31: Simulación de la superposición.....	50
Figura 4.32: (a) Simulación de errores; (b) Gráfico según UNE-ISO 230 -4:2008 .....	51
Figura 4.33: Desviación circular,torno PINACHO, ZX, F100mm/min .....	51
Figura 4.34: (a) Simulación; (b) Simulación; (c) Simulación; (d) Superposición.....	52

Figura 4.35: Simulación de la superposición de los errores citados.....	52
Figura 4.36:(a) Simulación de los errores;(b) Gráfico según UNE-ISO 230 -4:2008....	53
Figura I.1: Revisión de resultados del ensayo.....	56
Figura I.2: Ejecutar un ensayo Ballbar .....	57
Figura I.3: Ver historial de la máquina.....	57
Figura I.4: Modo chequeo rápido .....	58
Figura I.5: Configurar ensayo 1.....	58
Figura I. 6: Configurar ensayo 2.....	59
Figura I.7: Resumen del ensayo .....	59
Figura I.8: Conexión de Ballbar .....	60
Figura I.9: (a) Ejecución de ensayo, (b) Símbolos de progresión del ensayo .....	60
Figura I.10: Revisón de resultados .....	61
Figura I.11: Diagnóstico Ballbar .....	61
Figura I.12: Diagnóstico Ballbar, pestaña Valores.....	62
Figura I.13: Diagnóstico Ballbar, pestaña Tabla .....	63
Figura I.14: Diagnóstico Ballbar, pestaña Condiciones de la prueba.....	63
Figura I.15: Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008 .....	63
Figura II. 1: Trazado de la descompensación de escalado .....	66
Figura II. 2: Trazado de la cuadratura .....	67
Figura II. 3: Trazado de la rectitud .....	68
Figura II. 4: Ejemplo de error de rectitud en el eje X.....	68
Figura II. 5: Trazado de error cíclico en el eje Y .....	69
Figura II. 6: Trazado con holgura positiva en eje Y .....	70
Figura II. 7: Trazado con juego lateral positivo en el eje Y .....	71
Figura II. 8: Trazado de vibración de la máquina.....	72
Figura II. 9: Trazado del desajuste del servo.....	73
Figura II. 10: Interpretación de los valores del desajuste del servo. ....	73
Figura II. 11: Trazado de picos en la inversión .....	74
Figura III. 1: Válvula de aire.....	75
Figura III. 2: Interruptor general fresadora ANAYAK .....	75
Figura III. 3: Cuadro de mando inferior fresadora KONDIA.....	76
Figura III. 4: Cuadro de mando fresadora KONDIA.....	76
Figura III. 5: Menú principal fresadora KONDIA .....	77
Figura III. 6: Montaje central magnético de precisión.....	78
Figura III. 7: Pantalla de edición de un programa .....	79
Figura III. 8: Pantalla que muestra la ejecución de un programa. ....	79
Figura III. 9: Cuadro de mando superior fresadora ANAYAK .....	80
Figura III. 10: Cuadro de mando fresadora ANAYAK .....	81
Figura III. 11: Modos de operación de la fresadora ANAYAK .....	81
Figura III. 12: Posicionamiento del montaje central magnético.....	82
Figura III. 13: Modo editar de la fresadora ANAYAK .....	82
Figura III. 14: (a) Ballbar en la fresadora; (b) Modo automático.....	83
Figura III. 15: Cuadro de mando de torno PINACHO: .....	84
Figura III. 16: Volantes electrónicos del torno PINACHO .....	85
Figura III. 17: Menú principal de torno PINACHO .....	85
Figura III. 18: Elementos del kit para tornos posicionados en el torno PINACHO .....	86
Figura III. 19: Modos auxiliares del torno PINACHO .....	86
Figura III. 20: Ballbar en el torno PINACHO .....	87

# Índice de tablas

Tabla 1: Especificaciones del sistema QC10: Barras de extensión.....	22
Tabla 2: Especificaciones del sistema QC10: Transductor del Ballbar.....	28
Tabla 3: Error de seguimiento (mm) en la fresadora KONDIA .....	29
Tabla 4: Error de seguimiento (mm) en la fresadora ANAYAK .....	37
Tabla 5: Error de seguimiento (mm) en la fresadora ANAYAK .....	38
Tabla 6: Holgura de la fresadoraANAYAK, plano XY y avance 100mm/min.....	43
Tabla 7: Análisis del juego en los ejes X e Y de la fresadora ANAYAK .....	43
Tabla 8: Error de seguimiento (mm) en torno PINACHO .....	47
Tabla IV. 1: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 10mm/min.....	92
Tabla IV. 2: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 100mm/min.....	93
Tabla IV. 3: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 1000mm/min.....	94
Tabla IV. 4: Fresadora KONDIA, plano YZ y avance 100mm/min .....	94
Tabla IV. 5: Fresadora KONDIA, plano YZ y avance 1000mm/min .....	94
Tabla IV. 6: Fresadora KONDIA, plano ZX y avance 100mm/min .....	95
Tabla IV. 7: Fresadora KONDIA, plano ZX y avance 1000mm/min .....	95
Tabla IV. 8: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 100mm/min .....	95
Tabla IV. 9: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 1000mm/min. Parte 1 .....	96
Tabla IV. 10: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 1000mm/min. Parte 2 .....	97
Tabla IV. 11: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 3000mm/min .....	98
Tabla IV. 12: Fresadora ANAYAK, plano YZ avance y 100mm/min.....	98
Tabla IV. 13: Fresadora ANAYAK, plano YZ y avance 1000mm/min.....	98
Tabla IV. 14: Fresadora ANAYAK, plano ZX y avance 100mm/min.....	99
Tabla IV. 15: Fresadora ANAYAK, plano ZX y avance 1000mm/min.....	99
Tabla IV. 16: Torno PINACHO, plano ZX y avance 100.....	99
Tabla IV. 17: Torno PINACHO, plano ZX y avance 1000.....	99

# **Capítulo 1**

## **1. Introducción.**

### **1.1. Objeto del Trabajo de Fin de Grado.**

Este Trabajo de Fin de Grado, en adelante TFG, ha sido realizado en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Zaragoza y surge de la necesidad de mejorar la capacidad en la verificación geométrica de Máquinas Herramienta para conocer mejor no sólo los errores geométricos sino también los errores de interpolación y los errores dinámicos.

Para poder medir estos errores, se usa un Ballbar telescópico modelo QC10 de Renishaw. El Ballbar es un instrumento de medida que permite obtener errores geométricos de una Máquina Herramienta CNC y visualizarlos gracias a su software “Ballbar Renishaw QC20”. Por otro lado, también detecta las imprecisiones que provocan tanto el control- numérico como los componentes de los ejes de la máquina CNC: actuadores, captadores, husillos, etc.

Los resultados obtenidos del ensayo de la máquina se pueden mostrar en forma de un gráfico circular. Si la máquina no tuviese errores se mostraría un círculo perfecto. La presencia de errores hace que el círculo obtenido presente una serie de distorsiones. Como se expondrá en capítulos posteriores, cada tipo de error genera una distorsión diferente, y la superposición de estas distorsiones genera la desviación del círculo perfecto que se observa como resultado de cada ensayo.

Para la realización de este TFG es necesario estar familiarizado con el buen uso de las diferentes Máquinas Herramienta así como tener conocimientos de programación de máquinas CNC. Para facilitar el futuro uso de las mismas, así como del Ballbar, se desarrollan una serie de manuales que se incluyen en Anexos.

### **1.2. Objetivos.**

Los objetivos concretos a realizar en este TFG son los siguientes:

- Creación de los programas CNC para obtener las trayectorias que sigue el sistema Ballbar.
- Medición de errores geométricos mediante un Ballbar telescópico de Máquinas Herramienta CNC, concretamente de los siguientes modelos: fresadora ANAYAK, fresadora KONDIA y torno PINACHO.

- Medición del error de seguimiento de cada Máquina Herramienta.
- Análisis de los diagnósticos de ensayo obtenidos.
- Comparación del juego obtenido en la fresadora ANAYAK con el obtenido mediante un ensayo lineal facilitado por un profesor de la universidad.
- Redacción de manuales de uso de las Máquinas Herramienta empleadas en este TFG.
- Redacción de un manual para el correcto uso del sistema de medición Ballbar.

### **1.3. Estructura del TFG.**

A continuación se muestra un resumen de lo que incluyen los diferentes capítulos del TFG

- **Capítulo 2. Estado del arte.** En este capítulo se explica qué es una Máquina Herramienta y se establece cuáles van a ser sometidas a los ensayos. Se habla de los veintiún componentes del error geométrico de una máquina de tres ejes y se explica la procedencia del error de seguimiento y cómo corregirlo.
- **Capítulo 3. Sistema de medida.** Se define el sistema de medida Ballbar. Se identifican cada uno de los elementos que forman el hardware y se habla del software utilizado, tanto del que permite la recogida y análisis de datos como del simulador que posibilita la reproducción del efecto de los errores en el círculo óptimo.
- **Capítulo 4. Ensayos.** Se explican los diferentes ensayos que se han llevado a cabo así como los parámetros que se han variado en cada uno. Para finalizar se analizan los resultados obtenidos por plano de ensayo y velocidad de avance, estableciendo una conclusión final para cada una de las Máquinas Herramienta. Este análisis se lleva a cabo gracias a los diagnósticos del Ballbar y a la ayuda del simulador, que permite la interpretación del efecto que produce cada error de manera individual.
- **Capítulo 5. Conclusiones globales del TFG y líneas de trabajo futuro.** En este último capítulo se incluyen una serie de conclusiones finales y posibles trabajos futuros a realizar tomando como base este TFG.
- **Anexo I. Software Renishaw Ballbar QC20.** Incluye una descripción detallada de los pasos que hay que seguir, y los parámetros que hay que elegir, para la ejecución de un ensayo.

Asimismo, explica las diferentes opciones de diagnóstico que ofrece la revisión de resultados.

- **Anexo II. Errores detectados por el Ballbar.** Se especifica qué tipo de errores puede detectar el Ballbar según su arco de ensayo. Por otro lado se explican los errores que aparecen en los diagnósticos Ballbar, incluyendo la forma que adquiere el trazado, los valores de diagnóstico, los efectos que tiene a la hora de mecanizar una pieza, una serie de posibles causas y las medidas a tomar para subsanar dicho error.
- **Anexo III. Guías rápidas.** Contiene unos manuales rápidos con los pasos que se han seguido a la hora de usar las Máquinas Herramienta. En ellos se explica desde la puesta en marcha de la máquina hasta la inserción y ejecución de un programa. Para finalizar, se adjunta una guía que incluye los programas CNC de los ensayos y explica, paso a paso, cómo posicionar tanto el montaje central magnético de precisión como el Ballbar.
- **Anexo IV. Tablas de resultados.** En este último Anexo se incluyen las tablas que reflejan los resultados de todos los ensayos efectuados. Están clasificadas por Máquina Herramienta, plano de ensayo y velocidad de avance.

Las referencias que se han tomado para la elaboración de este trabajo, se incluyen en los apartados correspondientes, exceptuando [6] que es una referencia básica a lo largo de todo el documento.

# Capítulo 2

## 2. Estado del arte.

### 2.1. Tipos de Máquina Herramienta.

Una Máquina Herramienta, en adelante MH, es un tipo de máquina usada para dar la forma deseada a una preforma de material. Está constituida por un conjunto de dispositivos que permiten el desplazamiento relativo entre la pieza y la herramienta. Entre otros componentes, se encuentran *dispositivos de accionamiento*, que son los responsables del desplazamiento entre la herramienta y la pieza (motor, transmisiones, husillos...) y *dispositivos de sujeción*, cuyo fin es asegurar que la pieza permanece fija a su posición inicial durante todo el mecanizado (mordazas, mesa portaherramientas, conos de sujeción...) [1].

De aquí en adelante nos centraremos en dos tipos de MH, fresadora y torno, en la que el material sobrante se elimina mediante el arranque de viruta en una serie de operaciones sucesivas que van dando forma a la geometría deseada.

El fresado, es un proceso de mecanizado en el que el husillo principal gira la herramienta mientras la pieza describe movimientos de traslación.

Las máquinas fresadoras que se analizan en este TFG son la fresadora ANAYAK modelo VH1800 (Figura 2.1, a) con un control numérico FAGOR 8025-MS y la fresadora KONDIA modelo B500 (Figura 2.1, b), con un control numérico FAGOR 8055.



Figura 2.1: (a) Fresadora ANAYAK; (b) Fresadora KONDIA

El torneado, es un proceso de mecanizado en el que el husillo principal gira la pieza mientras la herramienta describe movimientos de traslación en el plano horizontal que contiene al husillo. El torno analizado en este TFG es el torno PINACHO modelo S94 C180 (Figura 2.2), con un control numérico FAGOR 800TGI.



Figura 2.2 Torno PINACHO

## 2.2. Tipos de errores de Máquina Herramienta.

Una MH no es una máquina perfecta y por lo tanto las piezas fabricadas tienen errores. Aproximadamente el 70% de este error está formado por un conjunto de errores geométricos de la máquina, errores debido a las influencias térmicas y errores relacionados con la rigidez de la máquina. Otros errores son la resolución y precisión de los sistemas de medida de la posición de los ejes, las deformaciones elásticas de los componentes de guiado, las fuerzas de inercia generadas en movimientos de aceleración o deceleración, la 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].

## 2.3. Componentes del error geométrico.

Los ejes de una MH están compuestos por carros que se mueven sobre guías. Para estudiar los errores geométricos sobre ellos, se toma el carro en su movimiento sobre el eje lineal (guía) como si fuera un sólido rígido. Un sólido rígido posee seis grados de libertad que determinan su posición y orientación en el espacio. Los errores de un eje lineal se forman a partir de seis grados de libertad que dependen de la posición. Estos seis grados de libertad se componen de tres errores de rotación: cabeceo, rumbo y vuelco, y tres errores de traslación: error de posición, error de rectitud horizontal y error de rectitud vertical.

Teniendo en cuenta la existencia de tres ejes (x,y,z), los seis grados de libertad por cada eje, y el error de perpendicularidad relativo entre ejes, se encuentran un total de veintiún componentes del error geométrico en una MH de tres ejes. [3]

### 2.3.1. Errores de traslación.

Al desplazarse los carros por una de las guías, se pueden dar desviaciones de posición que se conocen como errores de traslación (Figura 2.3). Se hallan tres errores:

*Error de posición:* es un error de traslación paralelo al eje de desplazamiento. Es el resultado de la diferencia entre el valor real que alcanza un punto de la parte móvil y el valor que debería haber alcanzado tras la posición programada.

*Error de rectitud horizontal:* es el error de traslación perpendicular al eje de desplazamiento según el eje horizontal al movimiento.

*Error de rectitud vertical:* es el error de traslación perpendicular al eje de desplazamiento según el eje vertical al movimiento.

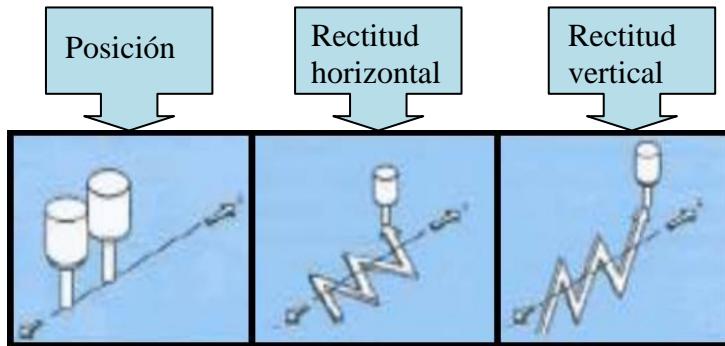


Figura 2.3: Errores de traslación.

### 2.3.2. Errores de rotación.

Al desplazarse los carros por una de las guías, se pueden dar pequeñas rotaciones a lo largo del eje de movimiento conocidas como errores de rotación (Figura 2.4). Se hallan tres errores:

*Error de cabeceo:* es un error de giro alrededor de un eje perpendicular horizontalmente al eje de desplazamiento.

*Error de rumbo:* es un error de orientación alrededor de un eje perpendicular al de desplazamiento.

*Error de balanceo o vuelco:* es un error de giro alrededor del eje de desplazamiento.

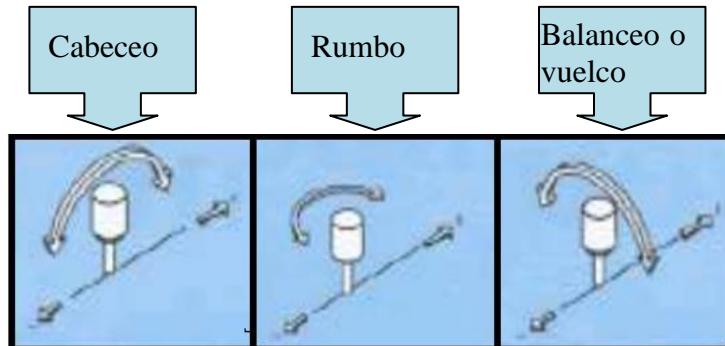


Figura 2.4: Errores de rotación.

### 2.3.3. Errores de perpendicularidad.

Para finalizar, la desviación de cuadratura entre dos ejes nominalmente ortogonales se refleja en los errores de perpendicularidad (Figura 2.5). En este TFG se trabaja con tres ejes ortogonales entre sí que definen el espacio, X, Y y Z, por lo que se tienen tres errores de perpendicularidad: perpendicularidad X-Y, perpendicularidad X-Z y perpendicularidad Y-Z.

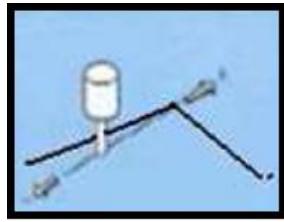


Figura 2.5: Error de perpendicularidad.

#### 2.4. Error de seguimiento.

Los ejes de una Máquina Herramienta CNC se controlan de forma automática mediante lazo de control. La forma más simple de controlar un eje es el control mediante lazo abierto, pero este control tiene la desventaja de acumular errores introducidos por la aplicación de fuerzas exteriores. En la actualidad todas las máquinas disponen de ejes controlados mediante lazo cerrado (Figura 2.6). Cada eje está formado por una serie de elementos:

- Regulador más motor.
- Sistema de transmisión mecánica.
- Sistema de captación de posición.

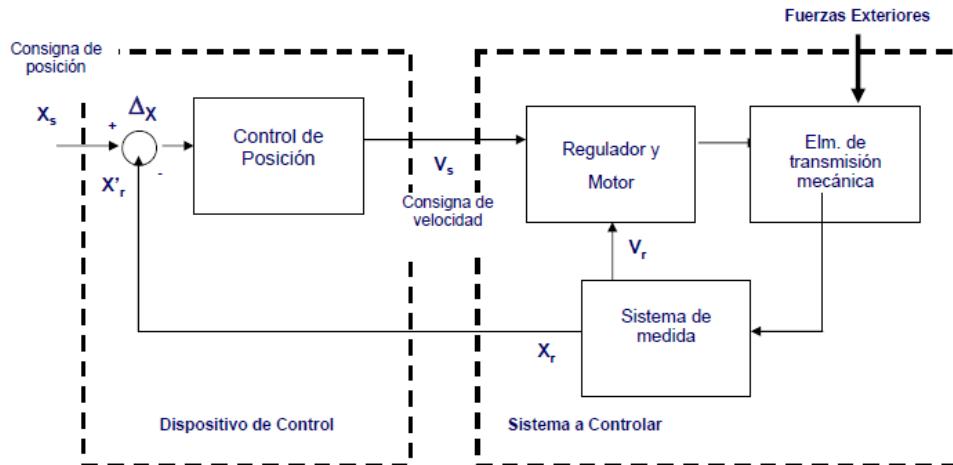


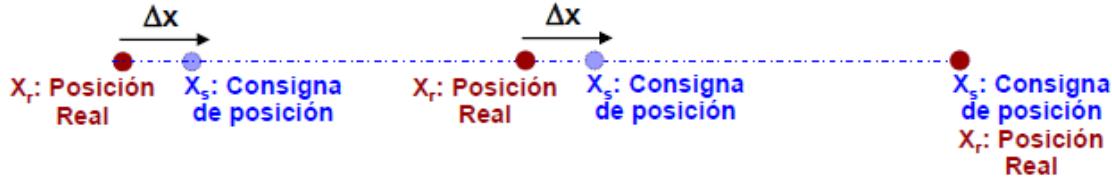
Figura 2.6: Lazo de control de una Máquina Herramienta.

En general, un control numérico básico calcula la consigna de posición de cada eje y convierte esta consigna en una señal de velocidad ( $V_s$ ). Cuando esta consigna llega al regulador, se ejecuta el movimiento controlando cada eje. Los sistemas de medida y control de posición suelen comportarse de forma proporcional. Este factor de proporcionalidad se conoce como  $K_v$  o ganancia del lazo cerrado, y se calcula como la relación entre la consigna de velocidad  $V_s$  y la desviación  $\Delta x$ .

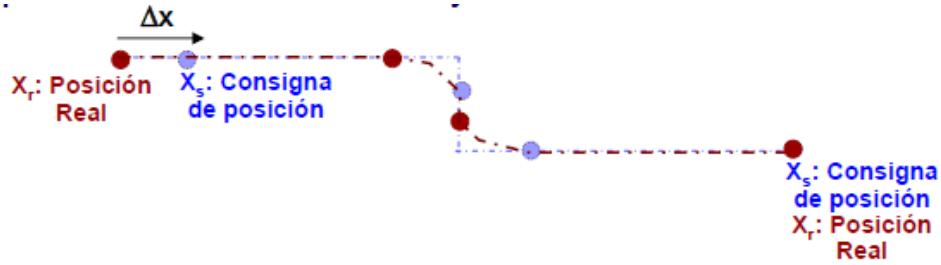
La desviación  $\Delta x$ , es un retraso que lleva el eje en relación a la consigna de posición. Este retraso no introduce errores en movimientos rectilíneos. Sin embargo sí que supone un error en el mecanizado de aristas o de superficies complejas en las que interviene la interpolación entre varios ejes.

El error de seguimiento se puede calcular como  $\Delta x = \frac{V_s}{K_v}$ . Si la posición real  $x_r$  es cercana a la consigna de posición  $x_s$ , el error de seguimiento será pequeño. Por el contrario, si la posición real  $x_r$  se aleja de la consigna de posición  $x_s$ , el error de seguimiento presentará valores altos.

El error de seguimiento representa, por tanto, un desfase entre la consigna de posición  $x_s$  y la posición real  $x_r$ . Si la interpolación es sencilla (como una línea recta), la trayectoria realizada no presenta desviaciones (Figura 2.7). Sin embargo, si la trayectoria es más compleja, el desfase producido por el error de seguimiento puede introducir errores en la trayectoria (Figura 2.8).[4]



**Figura 2.7:** Trayectoria sin desviaciones



**Figura 2.8** Trayectoria con desviaciones

Este defecto se puede corregir utilizando diferentes algoritmos de control [9]:

- Control proporcional con ganancia de posición variable, introduciendo un valor variable de  $K_v$  en función del error de seguimiento.
- Introducir controles de posición tipo PID, que se basan en suavizar las aceleraciones y deceleraciones, por lo que se puede aumentar la ganancia del lazo de posición  $K_v$ .
- Considerar algoritmos tipo Feed-Forward, basado en introducir directamente valores proporcionales a la consigna de posición, velocidad y aceleración.

# Capítulo 3

## 3. Sistema de medida.

### 3.1. Qué es un Ballbar .

El sistema Ballbar Renishaw (Figura 3.1) se compone del propio Ballbar (básicamente, un sensor lineal telescopico de alta precisión con bolas de precisión en sus extremos) y montajes magnéticos de precisión, uno (ajustable) sujeto a la mesa de la máquina gracias a su base imantada y el otro al husillo 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 cada minuto las variaciones de radio mientras la máquina recorre una trayectoria circular programada alrededor de un montaje en la mesa de la MH.



Figura 3.1 Ballbar telescopico QC 10

Los datos se recogen y se envían a un PC, donde el software de Renishaw calcula las mediciones globales de precisión de posicionamiento (circularidad, desviación circular) según estándares internacionales como UNE-ISO 230-4:2008 [8] y ASME B5.54-2005 [7], o los propios informes de análisis de Renishaw. Este informe se basa en un análisis aritmético exclusivo para diagnosticar errores de máquina individuales a partir de una serie de lecturas lineales. Los datos se muestran de forma gráfica y en formato numérico para facilitar su diagnóstico. [5]

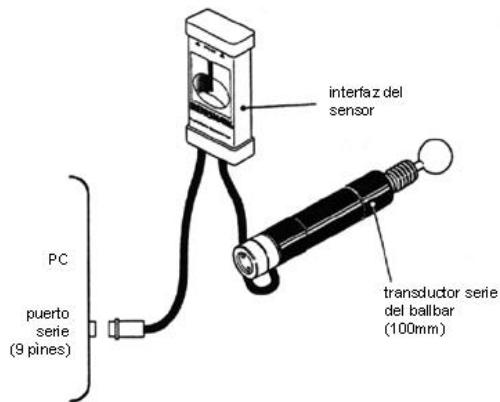
### 3.2. Elementos que forman el sistema de medida.

El kit básico del Ballbar telescopico modelo QC10 incluye un Ballbar, formado por un transductor, un conjunto de barras de diferente extensión, dos llaves para el

acoplamiento de las barras, una montaje magnético de precisión y un casquillo con base imantada.

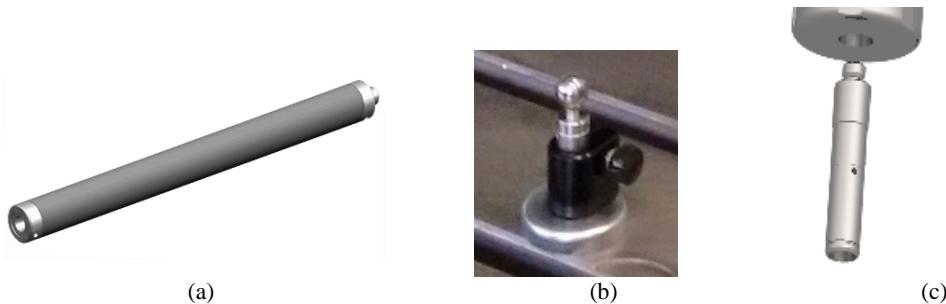
El transductor (Figura 3.2) es el componente principal del sistema Ballbar. Se trata de un transductor lineal de precisión, cuya compresión y extensión puede medirse con precisión en un recorrido de aproximadamente  $\pm 1$  mm sobre su longitud nominal. El transductor genera señales eléctricas que se convierten electrónicamente a un formato que pueda interpretar el software del ordenador. De este modo, se analizan y se miden cada minuto los cambios en la longitud nominal del transductor.

El Ballbar se conecta a uno de los puertos serie del ordenador a través de la caja de la interfaz del sensor. La interfaz del sensor (Figura 3.2), alimentada por una batería de 9V, contiene los circuitos electrónicos y controla la compresión y la extensión del transductor, a continuación, genera un informe de los datos de lectura que envía al ordenador a través de una conexión serie.



**Figura 3.2:** Transductor e interfaz del sensor

Las barras de extensión (Figura 3.3, a) aumentan la longitud del Ballbar y, por tanto, permiten calibrar un área mayor de la máquina. El kit incluye tres barras de extensión (Tabla 1) de longitud 50mm, 150mm y 300mm. La barra se enrosca en el extremo del Ballbar, utilizando para apretar las juntas unas llaves suministradas. Se puede colocar más de una barra de extensión para lograr la longitud de Ballbar necesaria.



**Figura 3.3:** (a) Barra de extensión; (b) montaje magnético de precisión; (c) copa magnética.

Longitud nominal	Tolerancia
50 mm	$\pm 50$ mm
150 mm	$\pm 50$ mm
300 mm	$\pm 50$ mm

**Tabla 1:** Especificaciones del sistema QC10: Barras de extensión.

El montaje central magnético de precisión (Figura 3.3,b) lleva en su base un imán que le permite ser fijado en la mesa de trabajo de la máquina. Una vez colocado en la posición deseada, el tornillo permite ajustar la bola de reglaje en la que se colocará el Ballbar.

La copa magnética (Figura 3.3, c) se introduce en el portaherramientas y en ella se colocará la bola de reglaje del Ballbar.

Para los ensayos en torno, se necesita un kit especial (Figura 3.4). Este kit incluye un brazo adaptador, una barra cilíndrica, una junta de bola, una copa magnética y un tornillo de copa. El brazo adaptador se coloca en la mordaza en la mesa de trabajo y a él se enrosca el tornillo de copa (al cual se le ha introducido previamente la copa magnética en la que se situará una de las bolas de reglaje del Ballbar). La junta de bola se introduce en la base ajustable de la barra cilíndrica y ésta, a su vez, en el plato del husillo principal.



Figura 3.4:Kit adaptador para torno.

Aunque no se ha utilizado en este TFG, Renishaw también posee un kit accesorio de radio reducido (Figura 3.5). Puede utilizarse para realizar ensayos de Ballbar de 50 mm. Es adecuado para ensayos en máquinas con ejes de recorrido corto o para resaltar el efecto de los errores servo-dinámicos de la máquina. La única desventaja de este kit es que no puede ser utilizado para ensayos en plano vertical o con el kit accesorio de torno.



Figura 3.5: Accesorio de radio reducido.

### 3.3. Software Renishaw Ballbar QC20.

Para la recogida de datos se ha usado el Software Renishaw Ballbar QC 20. Este software ofrece cuatro modos de trabajo que se introducen a continuación:

- *Comprobación rápida*, se pueden definir de manera fácil y rápida los ensayos de Ballbar, ejecutarlos y revisar los resultados.

- *Operario*, permite ejecutar ensayos predefinidos de Ballbar en cada MH. Los resultados se almacenan y pueden revisarse de forma individual o como parte de un análisis del historial, que muestra las variaciones de rendimiento de la máquina entre los ensayos.
- *Avanzado*, es el modo de utilización más completo del software de Ballbar y debe ser utilizado por operadores expertos. En este modo puede definir un ensayo, revisar los resultados, almacenar los ensayos como plantillas para usarlas en el modo Operario y definir las carpetas de máquina donde se almacenan las plantillas de ensayos y los resultados.
- *Configuración*, permite añadir, editar y eliminar del sistema un Ballbar o un calibrador.

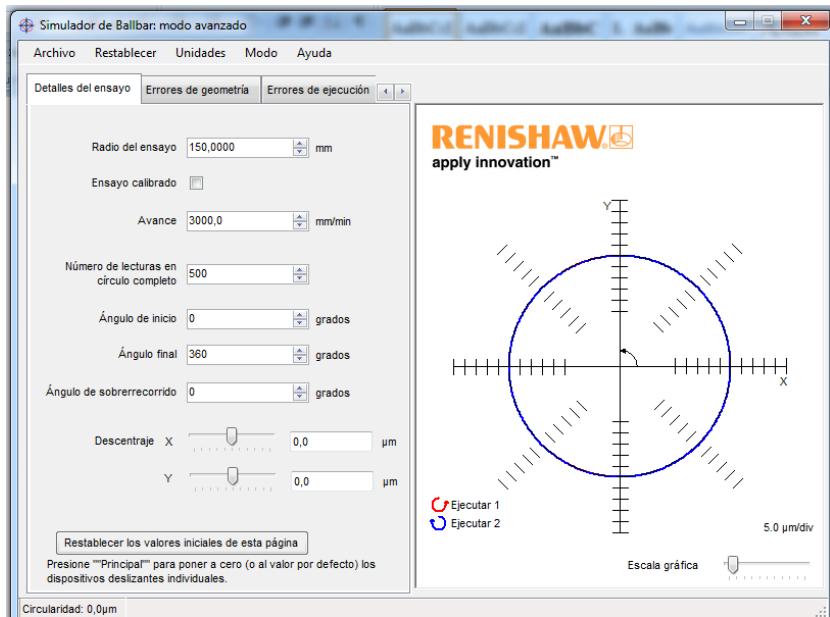
En este TFG se ha utilizado el modo chequeo rápido, ya que lo que interesa es la ejecución y revisión de ensayos con Ballbar y no el seguimiento de estos errores a lo largo del tiempo.

En el Anexo I se incluye una explicación más extensa de este modo de trabajo. También se incluyen los pasos que hay que seguir para llevar a cabo un ensayo y cómo se procede a la revisión de los resultados de los ensayos.

El software puede analizar automáticamente los resultados obtenidos para ensayos de 360° y diagnosticar la magnitud de los errores de máquina. En el Anexo II se incluye la descripción de cada tipo de error. Esta descripción incluye el tipo de trazado, detalles de los valores del diagnóstico, efectos en la pieza mecanizada, posibles causas y medidas a tomar para solucionar el error.

### **3.4. Simulador de errores Renishaw.**

El software de Renishaw (Figura 3.6) incluye un simulador que permite observar, de manera rápida, los errores que detecta el Ballbar en sus ensayos. Mediante el modo Avanzado de estas simulaciones se puede ver cómo influye cada error, ya sea de manera individual o mediante la superposición de varios, en la distorsión del círculo perfecto. Es necesario introducir una serie de parámetros previos a la introducción de los errores.



**Figura 3.6** Simulador Renishaw

Los parámetros a introducir son el radio de ensayo (mm), avance (mm/min), número de lecturas en círculo completo, ángulo de inicio (grados), ángulo final (grados), ángulo de sobrerecorrido (grados) y descentraje en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ )

Los errores se engloban en tres grupos diferentes:

- *Errores de geometría*: descompensación de escalado ( $\mu\text{m}$ ), cuadratura ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ), rectitud en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ), error cíclico en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ) y paso cíclico en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ).
- *Errores de ejecución*: holgura en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ), compensación de holgura en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ) y juego lateral en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ).
- *Errores dinámicos*: vibración pk-pk ( $\mu\text{m}$ ), reculación del servo (ms) y picos en la inversión en ejes X e Y ( $\mu\text{m}$ ).

# Capítulo 4

## 4. Ensayos.

Como se ha comentado en capítulos anteriores, en este TFG se han realizado ensayos de verificación geométrica en tres MH.

A continuación vienen explicados todos los ensayos realizados. Las tablas que contienen los datos obtenidos de cada ensayo se recogen en el Anexo IV. En los ensayos se han variado parámetros como el radio del Ballbar, la velocidad de avance, el arco de captura de datos, arco de sobrerecorrido y el plano de ensayo, contemplándose los planos XY, YZ y ZX (Figura 4.1).

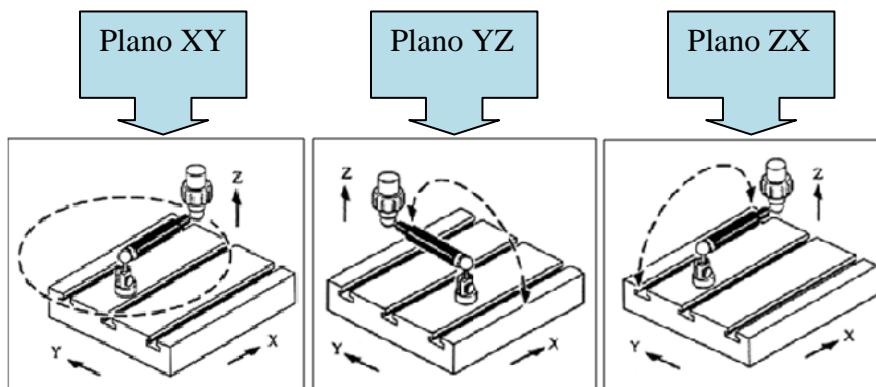


Figura 4.1: Planos de ensayo

En este TFG no se han obtenido resultados correspondientes a la desviación radial, ya que no se ha calibrado la longitud total del Ballbar antes de iniciar cada ensayo.

El error de seguimiento, el cual se ha explicado anteriormente en el Capítulo 2, es uno de los principales errores que afectan a las MH, sobretodo a altas velocidades de avance. El sistema de medición Ballbar no permite obtener los resultados del error de seguimiento, por ello los resultados se han obtenido directamente del control FAGOR correspondiente a cada MH.

### Selección del radio de ensayo.

Un Ballbar estándar está formado por un recorrido de 100mm de longitud. Mediante el ensamblaje de barras de extensión de diferentes longitudes, se puede modificar la longitud del mismo, variando así el radio de la trayectoria nominal.

En este TFG se ha usado la unión de las barras de extensión de longitudes 50mm y 100 mm para los ensayos en la fresadora ANAYAK, hechos con una longitud de Ballbar igual a 300mm, y la barra de extensión de 50 mm para la realización de ensayos en la fresadora KONDIA, en los que la longitud del Ballbar era igual a 150 mm. El ensayo en el torno PINACHO se ha realizado con la longitud estándar del Ballbar.

El motivo por el que se realizan ensayos con diferentes diámetros de trayectoria nominal, es la diferencia del tipo de error registrado. Un Ballbar de menor longitud detecta errores servo-dinámicos, especialmente cuando se combinan con una velocidad de avance rápida y una captura de datos dinámica. Esto se debe a que los radios más pequeños requieren cambios más rápidos de la velocidad de los ejes, y pueden ser útiles para analizar la capacidad de una máquina para interpolar rápidamente trayectorias circulares pequeñas. Un radio mayor, aumenta la sensibilidad del sistema para detectar problemas geométricos.

Como se relata en los manuales de las MH utilizadas en este TFG, incluidos en el Anexo III, el rango de trabajo de la máquina puede restringir la longitud máxima del Ballbar en el ensayo.

### **Selección del arco del ensayo.**

Dependiendo el tipo de máquina y el plano del ensayo, se seleccionará un arco de ensayo determinado. Antes de seleccionar los grados del arco, hay que tener en cuenta una serie de factores:

- El software sólo produce un diagnóstico completo de los errores de máquina cuando el ensayo se realiza con un arco de 360 grados. Para los ensayos con arco de 180 grados, sólo se obtendrán la desviación circular (en sentido horario y antihorario) y la desviación circular bidireccional.
- Se recomienda no utilizar arcos menores de 180 grados, salvo que las limitaciones de espacio impidan realizar ensayos de 180 o 360 grados.
- No se deben utilizar arcos menores de 90 grados.

Generalmente, se utiliza un arco de ensayo de 360 grados con sobrerrecorrido de 180 grados, ya que utiliza el programa automático más sencillo y permite el diagnóstico automático del trazado. Sin embargo, un arco de ensayo de 360 grados con sobrerrecorrido de 45 grados también permite realizar el diagnóstico, con la ventaja de reducir la duración del ensayo en un 37%. La principal desventaja es la complejidad del programa automático.

Los sobrerrecorridos son necesarios para que la entrada a las trayectorias medidas se haga de forma suave y así evitar errores debidos a cambios bruscos de dirección.

### **Selección de la velocidad de avance.**

Los estándares B5.54 [7] y B5.57 recomiendan realizar los ensayos entre el 10% y el 80% de la velocidad máxima programable de la máquina. La máxima velocidad de avance programable para la fresadora ANAYAK es de 6000 mm/min, para la fresadora KONDIA es de 15000 mm/min y para el torno PINACHO es de 6000mm/min.

Como se ha comentado en apartados anteriores, un avance mayor es más adecuado para identificar errores servo-dinámicos, como el error de seguimiento, desajuste del servo y picos de inversión. Una velocidad de avance lenta, reduce los errores servo-dinámicos y permiten una visión más clara de errores geométricos como cuadratura, descompensación de ejes y rectitud.

### Precisión y resolución del sistema.

La precisión de medición del sistema Ballbar puede dividirse en dos partes: precisión de circularidad (desviación circular) y precisión de radio absoluto (desviación radial).

El Ballbar se calibra durante el proceso de fabricación para garantizar la precisión de las mediciones de circularidad. Sin embargo, las mediciones de radio absoluto sólo pueden obtenerse utilizando el calibrador opcional para calibrar la longitud del Ballbar antes de iniciar la sesión de captura de datos.

Como ya se ha comentado, en este TFG no se ha calibrado la longitud del Ballbar antes de cada ensayo, por lo que a continuación se explica únicamente la precisión de circularidad.

La precisión de circularidad es la precisión con la que el Ballbar puede medir la falta de circularidad que posee la trayectoria de una herramienta, y depende principalmente de la precisión del transductor de desplazamiento (Tabla 2) y la esfericidad de las bolas. En el Ballbar empleado, el grado de esfericidad de las bolas es AFBMA 10 [13].

El transductor de desplazamiento se calibra durante el proceso de fabricación en base a un interferómetro láser, el resultado es un factor de escala que el software utiliza para compensar las imprecisiones. Este factor de escala es un valor próximo a 1.0, 0,9980 en el caso del Ballbar utilizado. El valor está impreso en la etiqueta pegada en la carcasa del transductor, la cual refleja también el número de serie. Tanto el factor de escala como el número de serie, deben introducirse manualmente en el software para definir correctamente el Ballbar antes de comenzar los ensayos.

La estabilidad del transductor y del circuito electrónico integrado es tan precisa que, en condiciones de uso normales, únicamente requieren un calibrado al año.

<b>Frecuencia de datos</b>	250 muestras por segundo (máximo)
<b>Longitud nominal</b>	100 mm (entre los centros de las bolas)
<b>Carrera</b>	-1,25mm a +1,75mm
<b>Resolución</b>	0,1 µm
<b>Rango de medición</b>	± 1 mm
<b>Precisión</b>	0,5 µm (a 20º) ±(0,8 µm + 0,4% de la lectura) (0 - 40º)

Tabla 2: Especificaciones del sistema QC10: Transductor del Ballbar

#### 4.1. Fresadora KONDIA.

Los ensayos realizados en la fresadora KONDIA han sido para un radio de trayectoria nominal igual a 150mm.

En la Tabla 3 se incluyen los resultados obtenidos para el error de seguimiento (mm) en los diferentes ensayos.

KONDIA		F1000	F100	F10
Plano XY	Eje X	1,000	0,100	0,012
	Eje Y	1,000	0,100	0,009
Plano XZ	Eje X	1,000	0,102	-
	Eje Z	1,003	0,095	-
Plano YZ	Eje Y	0,999	0,101	-
	Eje Z	1,007	0,110	-

Tabla 3: Error de seguimiento (mm) en la fresadora KONDIA

#### 4.1.1. Plano de ensayo XY.

Los ensayos en los que la trayectoria seguida por el Ballbar se encontraba en el plano XY, el arco de captura de datos ha sido de 360 grados en sentido antihorario y 360 grados en sentido horario, con un sobrerrecorrido de 180 grados en ambos sentidos para eliminar efectos de aceleración y deceleración.

#### Ensayo 1.

El ensayo (Figura 4.2) se realizó a una velocidad de avance de 10 mm/min. Esta baja velocidad de avance permite observar mejor los errores de tipo geométrico. El diagnóstico del ensayo es correcto, ya que los trazados de los ciclos horario y antihorario se superponen a los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 29,2  $\mu\text{m}$ .

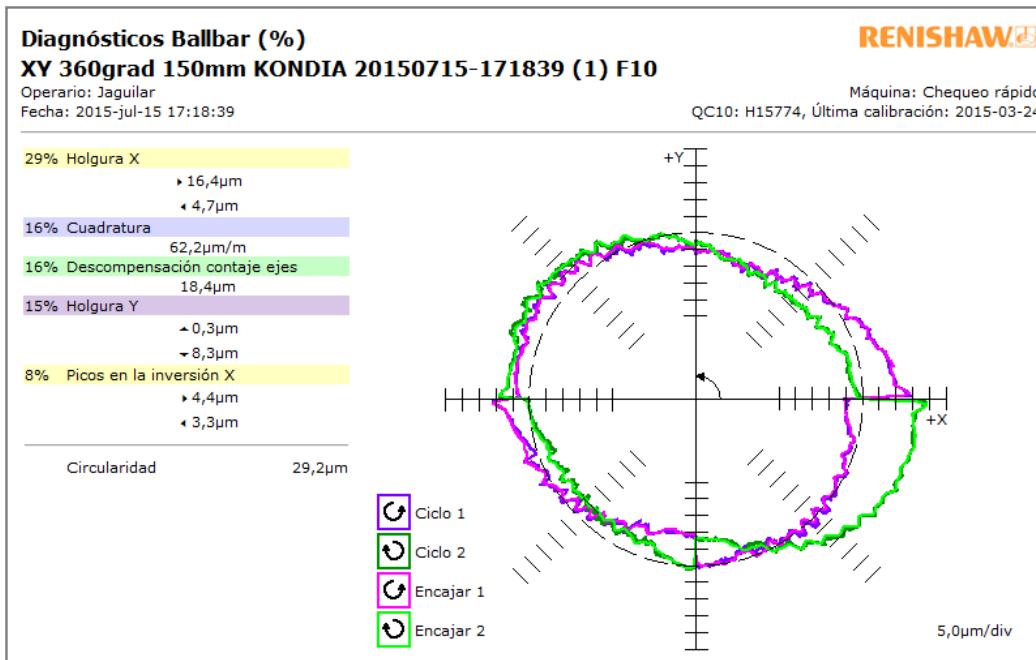


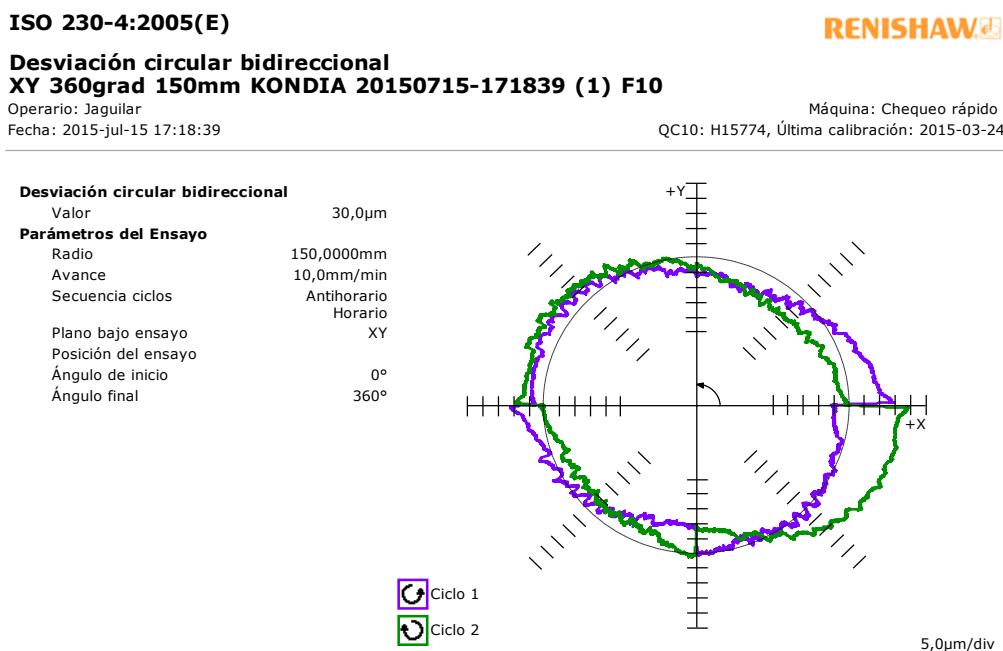
Figura 4.2: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano XY y con avance 10mm/min.

Como se observa en la Figura 4.2, los errores más influyentes en la circularidad independiente son la holgura, en ambos ejes, cuadratura, descompensación contaje ejes y picos en la inversión en el eje X.

El simulador de Renishaw no permite velocidades de avance menores de 100mm/min, por lo que no se puede comprobar la influencia de cada error en el círculo óptimo de manera independiente.

La holgura se hace presente en ambos ejes, adquiriendo mayor importancia en el eje X. Esto es consecuencia del juego en el sistema motor en la máquina, bien debido a una flotación de los cojinetes en el husillo de avance o una tuerca gastada. La presencia del juego lateral desigual es prácticamente despreciable. En este ensayo los picos en la inversión del eje X adquieren mayor relevancia que en el eje Y. El ángulo entre los ejes X e Y es superior a 90°, consecuencia de la deformación de los ejes de la máquina y de su desalineación en determinadas posiciones. Adquiere gran importancia el sobrerrecorrido que realiza el eje X sobre el eje Y, siendo además el eje Y el que supera al eje X durante 0,87 milisegundos. Éste sobrerrecorrido puede deberse a un error angular que hace que los ejes cabeceen saliéndose del plano de ensayo; a un daño o recalentamiento del husillo, provocado por un fallo del cabeceo; o a un exceso o defecto de tensado de la regla de cinta del eje. La presencia de este tipo de fallos en el husillo, genera el error cíclico en ambos ejes. Finalmente, como consecuencia de una posible deformación de las guías o mala alienación de la máquina, se hace presente una ligera falta de rectitud, siendo mayor en el eje Y que en el X.

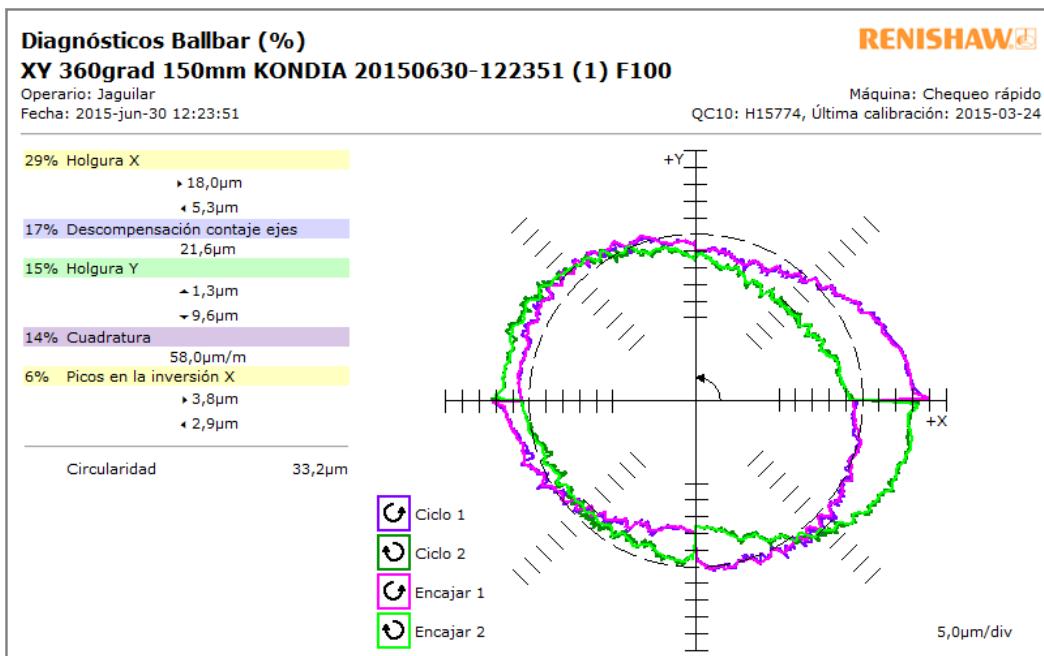
Analizando estos errores según la UNE-ISO 230 -4:2008 [8] se obtiene el siguiente gráfico (Figura 4.3), dónde se pueden observar la desviación circular horaria bidireccional.



**Figura 4.3:** Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano XY y con avance 10mm/min.

## Ensayo 2.

El ensayo (Figura 4.4) se realizó a una velocidad de avance de 100 mm/min. El diagnóstico del ensayo es correcto, ya que los trazados de los ciclos horario y antihorario se superponen a los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 33,2 µm.

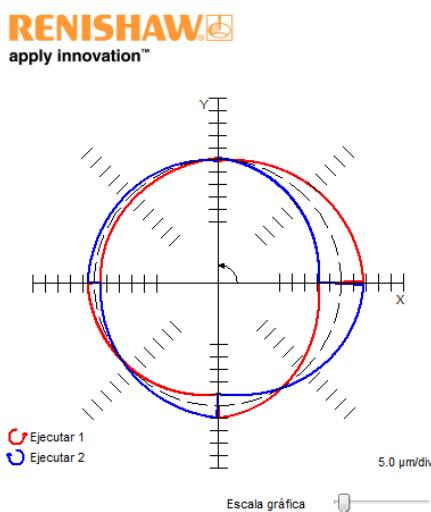


**Figura 4.4:** Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano XY y con avance 100mm/min.

Como se observa en la (Figura 4.4), los errores más significativos y, por tanto, los que más afectan a la circularidad del ensayo son holgura, en ambos ejes, descompensación contaje ejes, cuadratura y picos en la inversión del eje X.

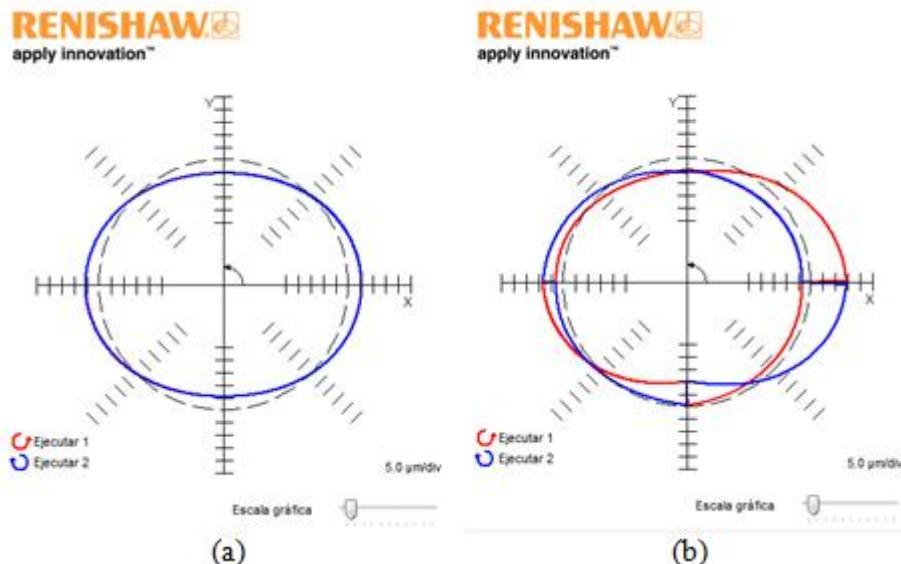
Con la ayuda del simulador Renishaw, se reproducen uno a uno los errores presentes en el ensayo para determinar el efecto que producen en el trazado. Las imágenes de la izquierda muestran el efecto que causa el error en el trazado del ensayo y las imágenes de la derecha la superposición de los errores descritos hasta ese momento.

La presencia de holgura (Figura 4.5) en el eje X es el error más influyente en la circularidad independiente, y superpuesto con la holgura en el eje Y consigue un efecto de máxima holgura en el eje X positivo e Y negativo. Esto se debe a que el sistema motor de la máquina hace juego, bien debido a una flotación de los cojinetes en el husillo de avance o una tuerca gastada.



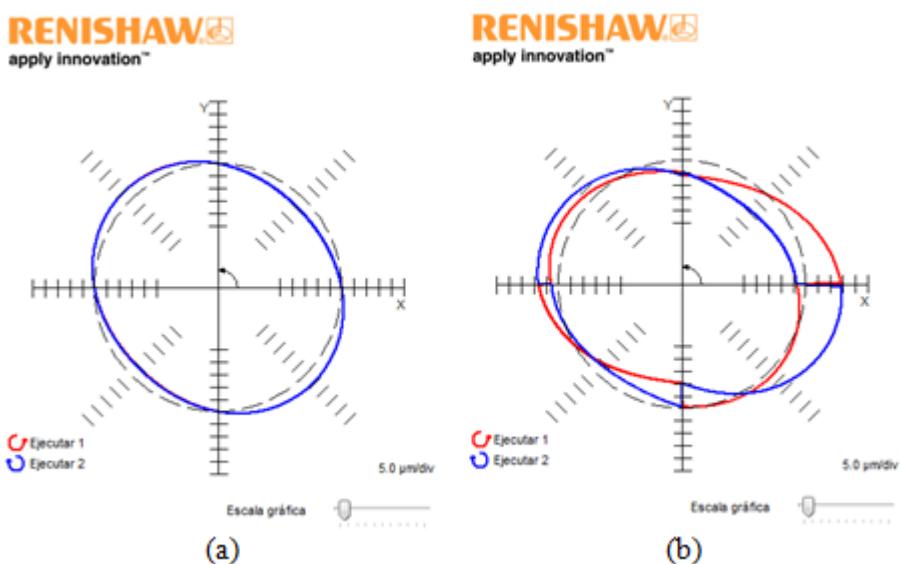
**Figura 4.5:** Simulación de la holgura.

La descompensación de escalado (Figura 4.6, a) provoca que el eje X realice un sobrerrecorrido sobre el eje Y. La causa puede ser que la máquina esté sometida a un error angular que hace que los ejes cabeceen saliéndose del plano de ensayo; que el eje del husillo esté dañado o recalentado debido a un fallo del cabeceo o que la regla de cinta del eje esté muy tensa o demasiado floja.



**Figura 4.6:** (a) Simulación de la descompensación de escalado; (b) Superposición de holgura y descompensación de escalado.

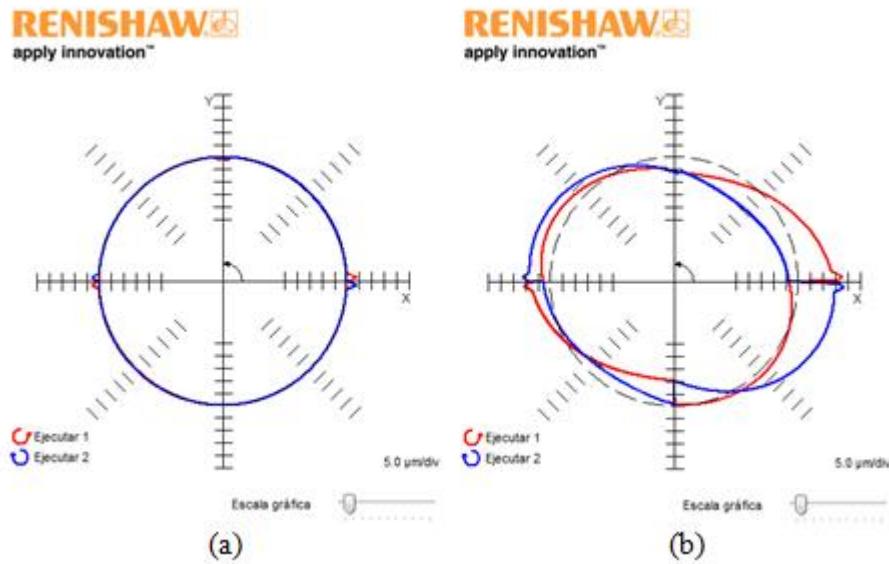
Como el error de cuadratura (Figura 4.7, a) es positivo, con sentido positivo en ambos ejes, nos indica que el ángulo entre los ejes X e Y es superior a  $90^\circ$ , lo que se debe a una deformación de los ejes de la máquina por su propio peso y a su desalineación en determinadas posiciones



**Figura 4.7:** (a) Simulación del error de cuadratura; (b) Superposición de holgura, descompensación de escalado y error de cuadratura.

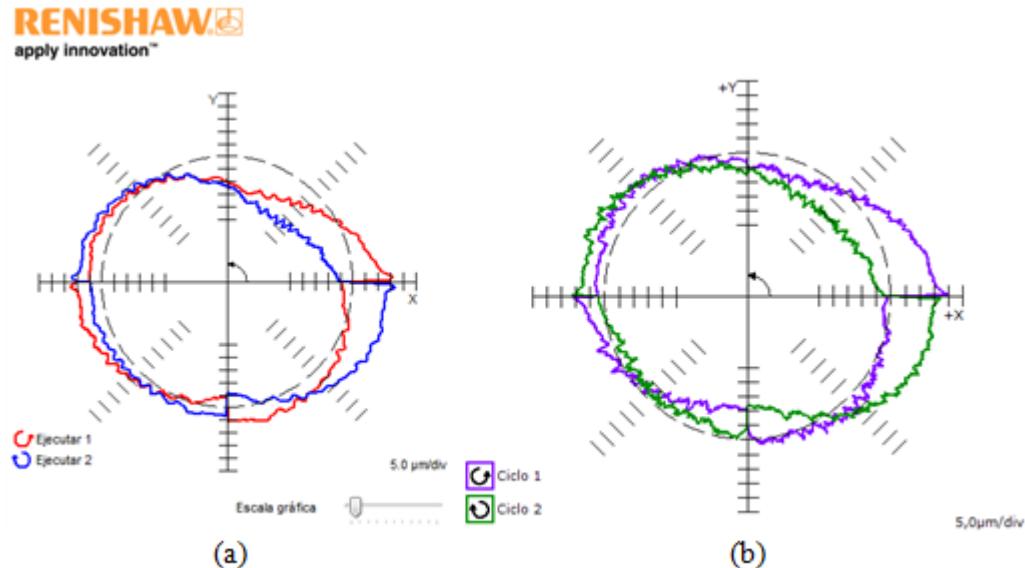
En este ensayo los picos en la inversión (Figura 4.8, a) del eje X adquieren mayor relevancia que en el eje Y. Esto se debe a que el motor del eje X ha aplicado una

fuerza excesiva sobre el eje en el punto de inversión, haciendo que se bloquee ligeramente en el punto de inversión al cambiar de dirección las fuerzas de fricción.



**Figura 4.8:** (a) Simulación de los picos en la inversión; (b) Superposición de holgura, descompensación de escalado, error de cuadratura y picos en la inversión.

Añadiendo al simulador el resto de errores detectados en el diagnóstico como la presencia de juego lateral, la regulación del servo, que hace que el eje X supere al eje Y durante 0,17 milisegundos, el error cíclico en ambos ejes y la falta de rectitud se obtiene como resultado gráfico final mostrado en la Figura 4.9(a). Comparándolo con el gráfico obtenido según la UNE-ISO 230 -4:2008 [8] (Figura 4.9, b), se observa una muy buena aproximación, demostrando así la utilidad del simulador. Las pequeñas diferencias que puede presentar la gráfica simulada con respecto a la gráfica real, se deben a una serie de parámetros que no se pueden reflejar en el simulador.



**Figura 4.9:** (a) Simulación de todos los errores; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008.

### Ensayo 3.

El ensayo se realizó a una velocidad de avance de 1000 mm/min. El diagnóstico del ensayo es correcto, ya que los trazados de los ciclos horario y antihorario se superponen a los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 65,6 $\mu$ m.

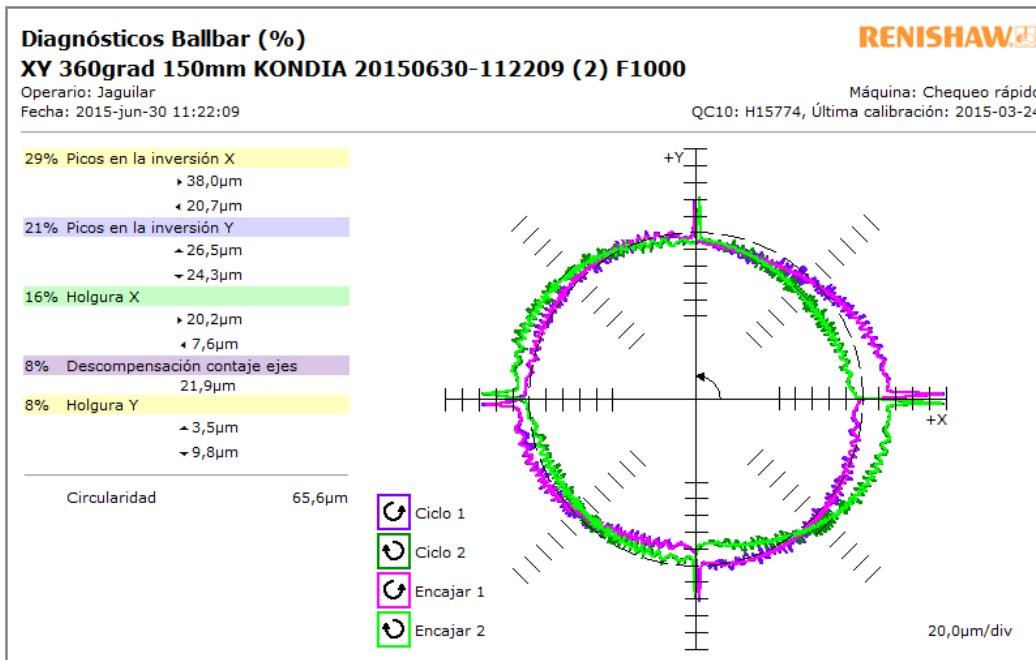


Figura 4.10: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano XY y con avance 1000mm/min

A velocidades de avance grande, como en este ensayo, adquieren mayor importancia los errores dinámicos, sobretodo el error de seguimiento. Por ello no se puede hacer una evaluación precisa de los errores que proporciona el diagnóstico del ensayo, ya que no tiene en cuenta el error de seguimiento y los valores de los errores que proporciona se ven enmascarados por el efecto de éste.

#### 4.1.2. Planos de ensayo YZ y ZX.

Los ensayos en los que la trayectoria seguida por el Ballbar se encontraba en el plano YZ y ZX, el arco de captura de datos ha sido de 180 grados en sentido antihorario y 180 grados en sentido horario, con un sobrerrecorrido de 5 grados en ambos sentidos para eliminar efectos de aceleración y deceleración.

En los ensayos realizados a avance igual a 1000mm/min la principal influencia en el trazado la ejerce el error de seguimiento, y en los ensayos realizados a avance 100mm/min se observa de manera más clara la influencia de los errores geométricos.

Como los ensayos con este arco de captura, solo muestran gráficos donde se observa la desviación circular horaria, antihoraria y bidireccional [8], y habiendo explicado anteriormente los resultados obtenidos en los ensayos a 360 grados, en este apartado sólo se incluyen los gráficos proporcionados por el software.

## Plano YZ, Ensayo 1.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
YZ 180grad 150mm KONDIA 20150701-140843 (2) F1000**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-jul-01 14:08:43

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	49,4µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	150,0000mm
Avance	1000,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario
	Horario
Plano bajo ensayo	YZ
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	0°
Ángulo final	180°

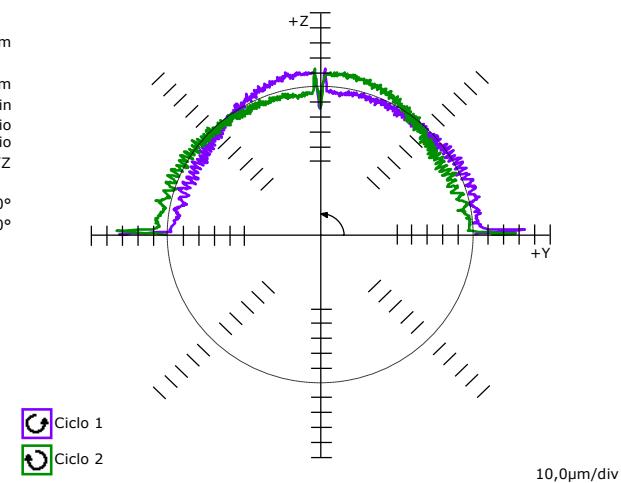


Figura 4.11: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano YZ y con avance 1000mm/min

## Plano YZ, Ensayo 2.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
YZ 180grad 150mm KONDIA 20150701-143158 (2) F100**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-jul-01 14:31:58

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	47,0µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	150,0000mm
Avance	100,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario
	Horario
Plano bajo ensayo	YZ
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	0°
Ángulo final	180°

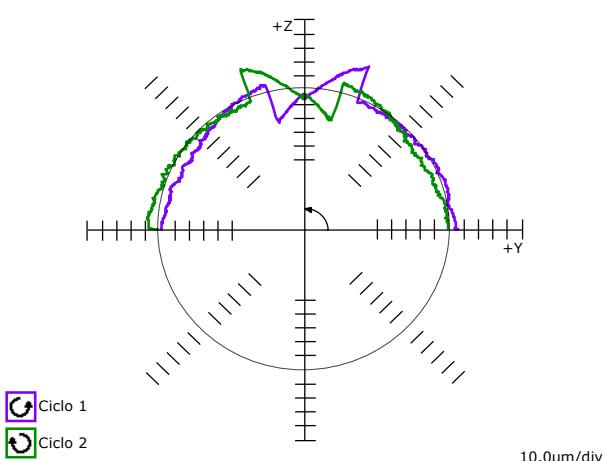


Figura 4.12: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano YZ y con avance 100mm/min

## Plano ZX, Ensayo 1.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
ZX 180grad 150mm KONDIA 20150701-123951 (1) F1000**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-jul-01 12:39:51

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Parámetros del Ensayo	Valor
Radio	150,0000mm
Avance	1000,0mm/min
Secuencia ciclos	Horario Antihorario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	270°
Ángulo final	90°

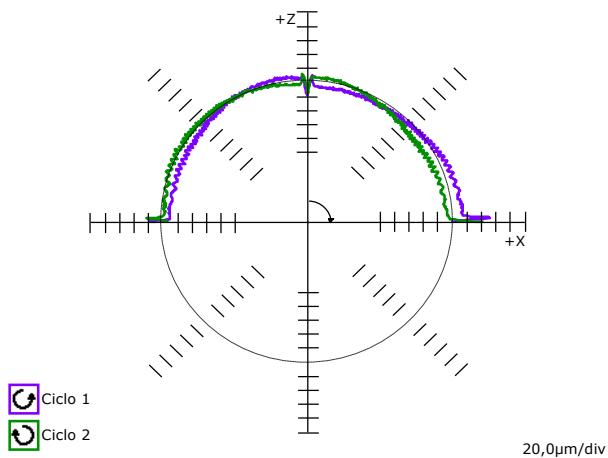


Figura 4.13: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano ZX y con avance 1000mm/min

## Plano ZX, Ensayo 2.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
ZX 180grad 150mm KONDIA 20150701-125503 (1) F100**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-jul-01 12:55:03

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Parámetros del Ensayo	Valor
Radio	150,0000mm
Avance	100,0mm/min
Secuencia ciclos	Horario Antihorario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	270°
Ángulo final	90°

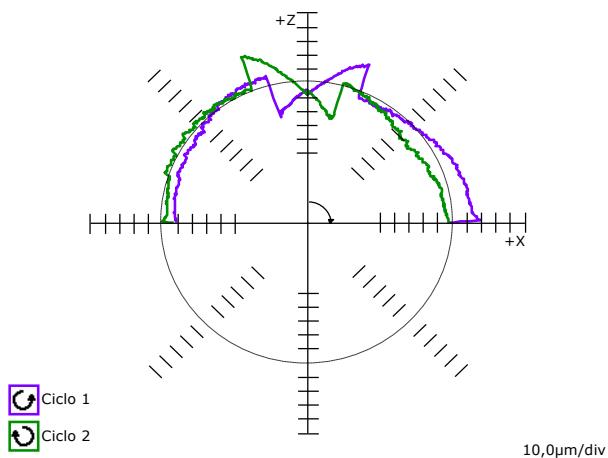


Figura 4.14: Diagnóstico fresadora KONDIA en el plano ZX y con avance 100mm/min

### 4.1.3. Conclusiones de los ensayos.

Se consideran grandes velocidades de avance o avance elevado los ensayos realizados a 1000mm/min, y bajas velocidades de avance o bajo avance los ensayos realizados a 10mm/min y 100mm/min. Los ensayos realizados a velocidades de avance de 100mm/min y 1000mm/min se realizaron dos y tres veces, respectivamente. Sin embargo, el ensayo realizado a avance 10mm/min se realizó una única vez, debido al gran tiempo que dura el ensayo.

La diferencia entre la consigna de posición y la posición real se conoce como error de seguimiento. Este error de seguimiento, aumenta proporcionalmente desde un avance de 10mm/min hasta un avance de 1000 mm/min.

Como se ha comentado, del ensayo realizado a gran velocidad de avance no se puede determinar con certeza el valor de los errores diagnosticados, ya que el programa no detecta el error de seguimiento, que es el principal causante de la falta de circularidad a grandes velocidades. Los ensayos a baja velocidad, permiten una mejor percepción de los errores geométricos y su influencia en la circularidad.

La descompensación de escalado produce un sobreerreccorrido del eje X sobre el eje Y, su causa puede ser una mala configuración de los parámetros de compensación de errores lineales, el exceso o defecto de tensado de la regla de cinta del eje o un daño en el eje del husillo. La cuadratura provoca que el ángulo entre los ejes sea superior a 90 grados, esto puede ser provocado por una deformación de los ejes de la máquina. Éste error puede influir en el cabeceo de los ejes, lo que también explicaría la descompensación de escalado. Se comprueba que el error de cuadratura no se ve afectado por el avance, pero sí adquiere mayor importancia en la circularidad independiente en el ensayo a avance 10mm/min. La ligera falta de rectitud en los ejes o su deformación, son los responsables del leve error de rectitud que diagnostica el programa. Analizando el error cíclico, se comprueba en el simulador que los trazados en ambos sentidos son idénticos, por lo que el causante de dicho error es el husillo del eje.

La influencia del juego lateral es prácticamente despreciable, por lo que los problemas de holgura en los ejes podrían deberse al juego que hace el sistema motor de la máquina, bien debido a una flotación de los cojinetes en el husillo de avance o una tuerca desgastada.

Para minimizar el error generado por los picos en la inversión se debe trabajar a velocidades de avance bajas Debido a que la regulación del servo no produce error, la causa de la presencia en los picos de inversión reside en el motor del eje, que aplica una fuerza excesiva sobre él en el punto de inversión, haciendo que se bloquee ligeramente al cambiar de dirección las fuerzas de fricción

#### **4.2. Fresadora ANAYAK.**

Los ensayos realizados en la fresadora ANAYAK han sido para un radio de trayectoria nominal igual a 300mm.

En la Tabla 4, se incluyen los resultados obtenidos para el error de seguimiento (mm) en los diferentes ensayos..

<b>ANAYAK</b>		F100	F1000	F3000
Plano XY	Eje X	0,261	3,000	12,700
	Eje Y	0,238	3,000	12,400
Plano XZ	Eje X	0,240	4,400	-
	Eje Z	0,200	2,300	-
Plano YZ	Eje Y	0,230	3,490	-
	Eje Z	0,220	3,450	-

**Tabla 4:** Error de seguimiento (mm) en la fresadora ANAYAK

Se observa que los resultados obtenidos para esta fresadora son mucho mayores que los obtenidos para la fresadora KONDIA. Con motivo de comprobar cómo aumenta en esta máquina el error de seguimiento respecto de la velocidad de avance, y qué valores máximo alcanza, se han realizado ensayos en vacío (Tabla 5) para velocidades de avance igual a 2000 mm/min y 4000 mm/min en el plano XY.

ANAYAK		F2000	F3000	F4000
Plano XY	Eje X	8,000	12,700	12,500
	Eje Y	7,800	12,400	12,500

Tabla 5: Error de seguimiento (mm) en la fresadora ANAYAK

#### 4.2.1. Plano de ensayo XY.

Los ensayos en los que la trayectoria seguida por el Ballbar se encontraba en el plano XY, el arco de captura de datos ha sido de 360 grados en sentido antihorario y 360 grados en sentido horario, con un sobrerrecorrido de 180 grados en ambos sentidos para eliminar efectos de aceleración y deceleración

#### Ensayo 1.

Ensayo realizado a una velocidad de avance de 100 mm/min. El diagnóstico del ensayo es correcto, ya que los trazados de los ciclos horario y antihorario se superponen a los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 98,7  $\mu\text{m}$ .

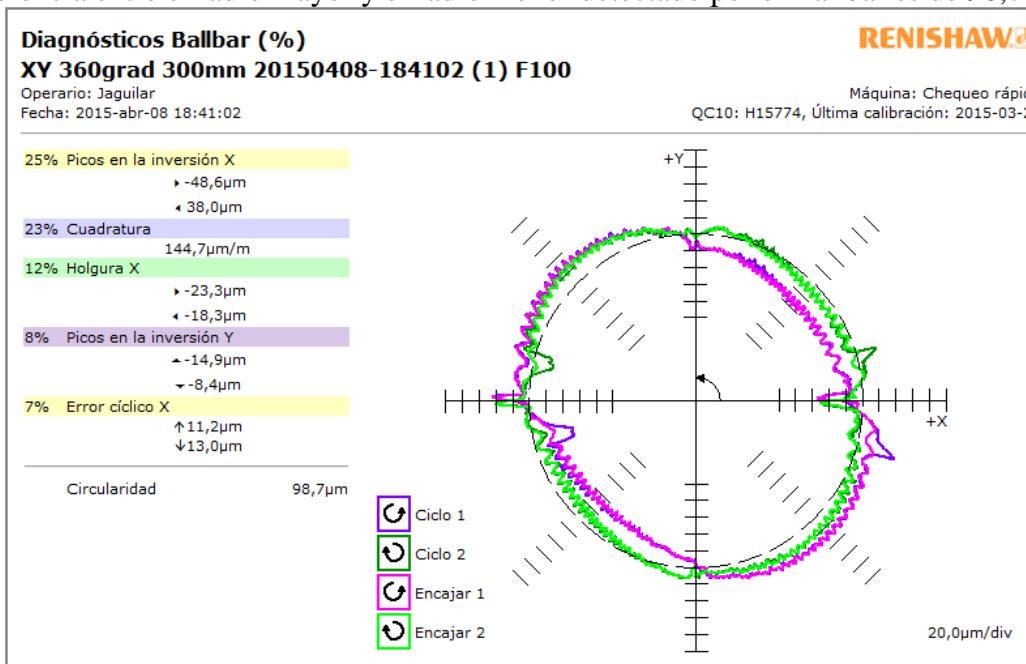


Figura 4.15: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano XY y con avance 100mm/min.

Como se observa en la Figura 4.15, los errores más significativos y, por tanto, los que más afectan a la circularidad del ensayo son los picos en la inversión en ambos ejes, cuadratura, holgura en el eje X y el error cíclico en el eje X.

Con la ayuda del simulador Renishaw, se reproducen uno a uno los errores presentes en el ensayo para determinar el efecto que producen en el trazado. Las imágenes de la izquierda muestran el efecto que causa el error en el trazado del ensayo y las imágenes de la derecha la superposición de los errores descritos hasta ese momento.

Ambos ejes presentan holgura negativa (Figura 4.16). Teniendo en cuenta la repetibilidad de holgura positiva en el ensayo a avance 1000 mm/min y que la holgura no varía con la velocidad de avance, este valor negativo se debe a una excesiva compensación de holgura aplicada a la máquina, lo que convierte un problema previo de holgura positiva en una negativa.

**RENISHAW**  
apply innovation™

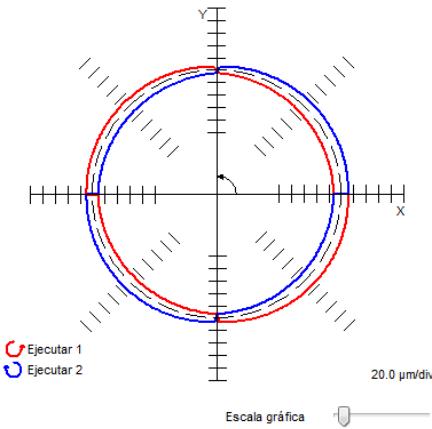


Figura 4.16: Simulación de la holgura.

En este ensayo adquieren gran importancia los elevados resultados obtenidos en los picos de inversión (Figura 4.17, a), sobretodo en el eje X. Esto es debido a que el tiempo de respuesta del servo de la máquina es inadecuado en la compensación de holgura, lo que significa que la máquina no puede compensar la holgura a tiempo, haciendo que el eje se detenga mientras se compensa el espacio provocado por la holgura.

**RENISHAW**  
apply innovation™

**RENISHAW**  
apply innovation™

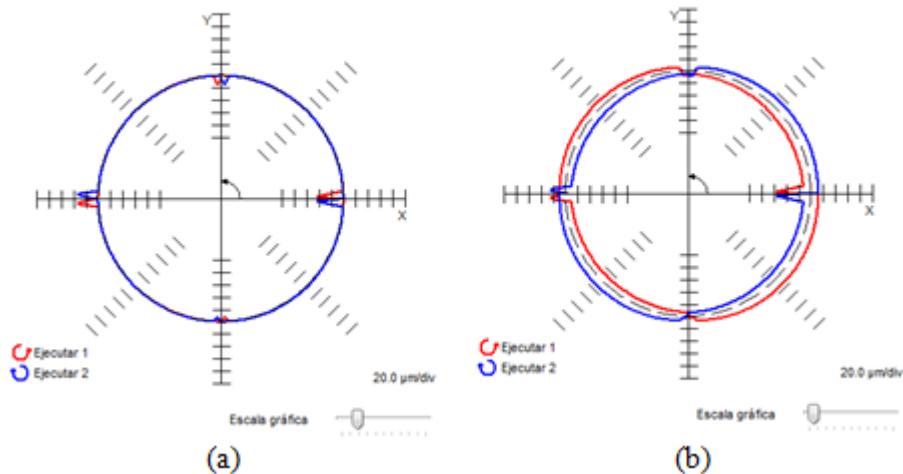
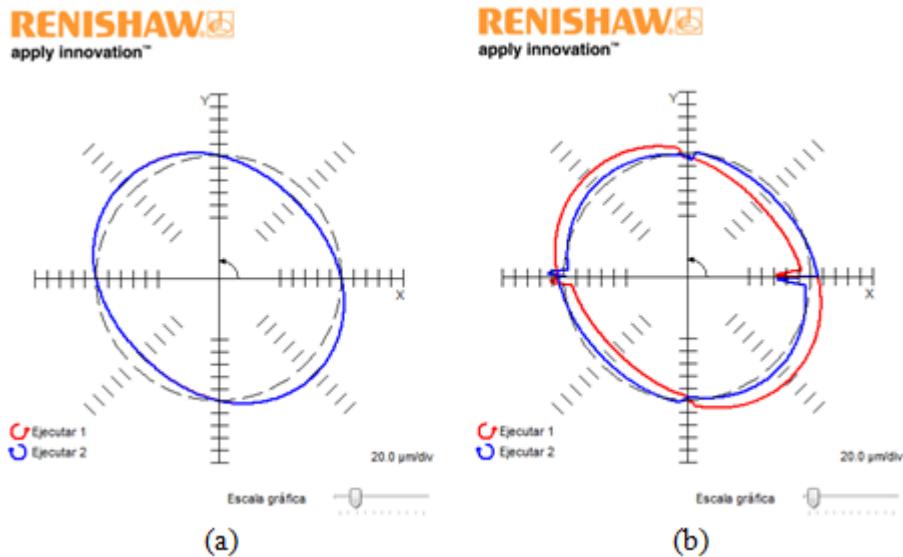


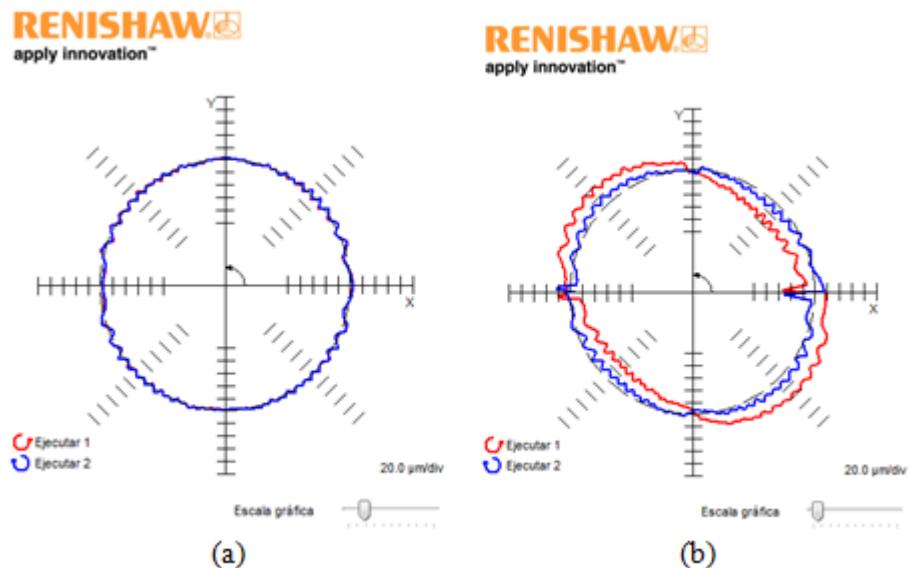
Figura 4.17: (a) Simulación de los picos en la inversión; (b) Superposición de holgura y picos en la inversión.

Como el error de cuadratura (Figura 4.18, a) es positivo, con sentido positivo en ambos ejes, el ángulo entre los ejes X e Y es superior a 90°, lo que se debe a una deformación de los ejes de la máquina por su propio peso y a su desalineación en determinadas posiciones



**Figura 4.18:** (a) Simulación del error de cuadratura; (b) Superposición de holgura, picos en la inversión y error de cuadratura.

Analizando el error cíclico (Figura 4.19, a), se comprueba que los trazados en ambos sentidos son idénticos, por lo que el causante de dicho error es el husillo del eje.



**Figura 4.19:** (a)Simulación del error cíclico; (b) Superposición de holgura, picos en la inversión, error de cuadratura y error cíclico.

Añadiendo al simulador el resto de errores detectados en el diagnóstico como la presencia de juego lateral desigual, la regulación del servo, que hace que el eje Y supere al eje X durante 4,67 milisegundos, la descompensación de escalado y la falta de rectitud, se obtiene como resultado gráfico final la Figura 4.20 (a).Comparándolo con el gráfico obtenido según la UNE-ISO 230 -4:2008 [8] (Figura 4.20, b), se observa una muy buena aproximación, demostrando así la utilidad del simulador. Las pequeñas diferencias que puede presentar la gráfica simulada con respecto a la gráfica real, se deben a una serie de parámetros que no se pueden reflejar en el simulador.

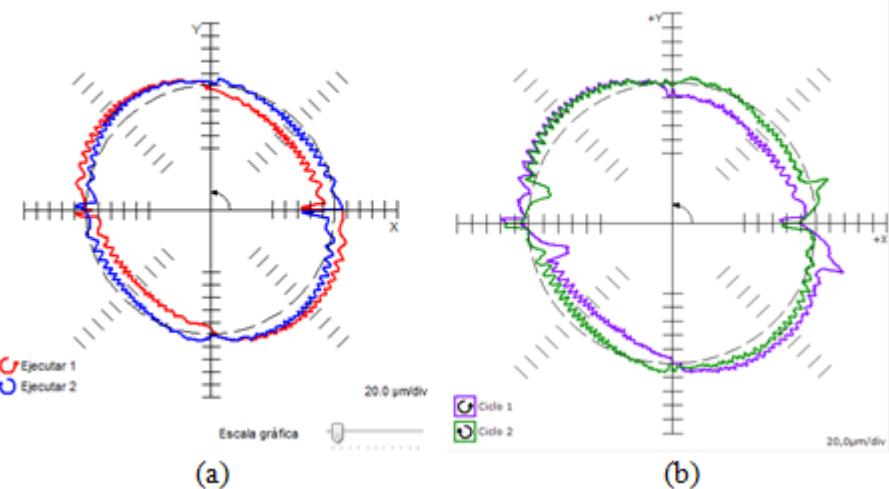


Figura 4.20: (a) Simulación de todos los errores; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008

### Ensayo 2.

El ensayo se realizó a una velocidad de avance de 1000 mm/min, El diagnóstico del ensayo es correcto, ya que los trazados de los ciclos horario y antihorario se superponen a los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 976,8μm.

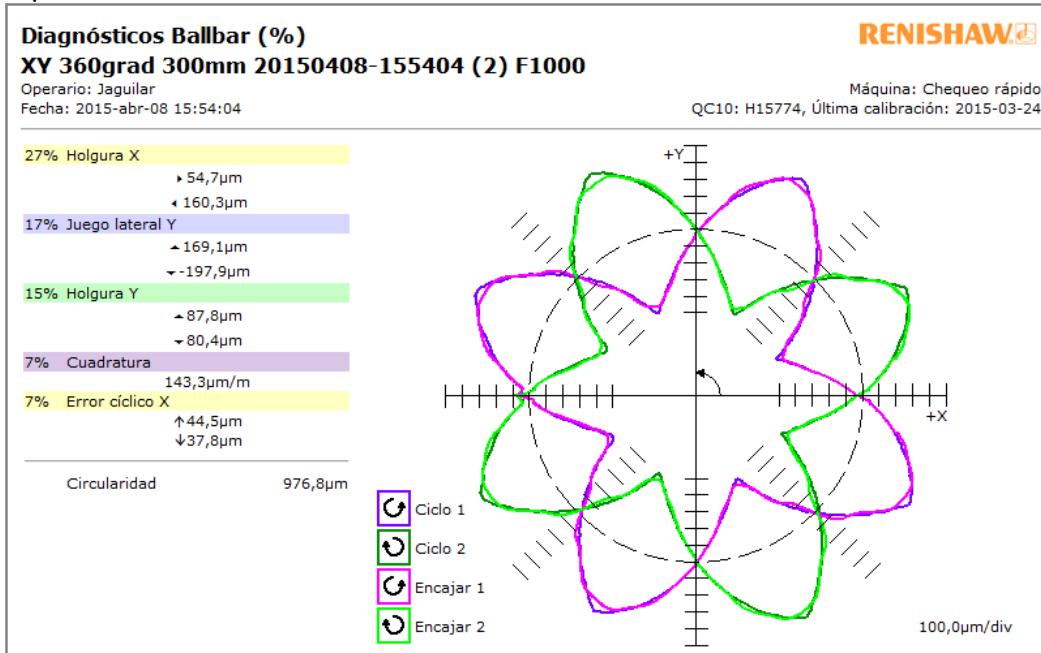


Figura 4.21: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano XY y con avance 1000mm/min.

A velocidades de avance grande, como en este ensayo, adquieren mayor importancia los errores dinámicos, sobretodo el error de seguimiento. Por ello no se puede hacer una evaluación precisa de los errores que proporciona el diagnóstico del ensayo, ya que no tiene en cuenta el error de seguimiento y los valores de los errores que proporciona se ven enmascarados por el efecto del error de seguimiento.

### Ensayo 3.

El ensayo se realizó a una velocidad de avance de 3000 mm/min. A pesar de que la superposición de los trazados ajustados generados a partir de los resultados diagnosticados es peor que en los ensayos anteriores, se considera bastante aproximada, por lo que se determina que el diagnóstico del ensayo es correcto. La diferencia entre el radio mayor y el radio menor detectado por el Ballbar es de 1580,3 $\mu$ m, es un valor muy elevado por lo que el rendimiento de la máquina a esta velocidad de avance es muy bajo.

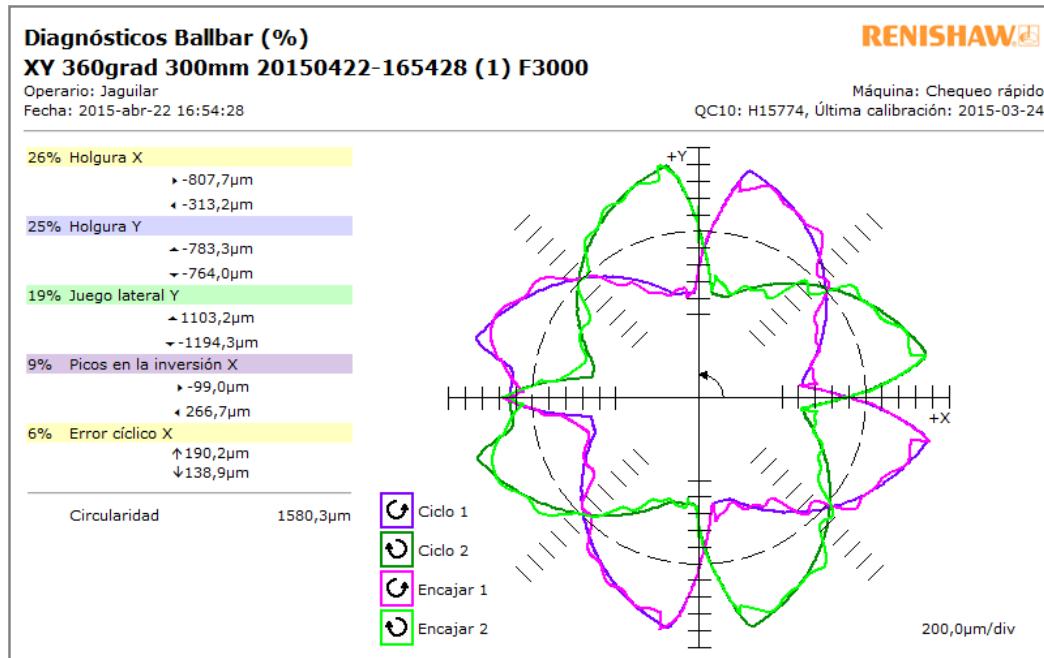


Figura 4.22: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano XY y con avance 3000mm/min.

A velocidades de avance grande, como en este ensayo, adquieren mayor importancia los errores dinámicos, sobretodo el error de seguimiento. Por ello no se puede hacer una evaluación precisa de los errores que proporciona el diagnóstico del ensayo, ya que no tiene en cuenta el error de seguimiento y los valores de los errores que proporciona se ven enmascarados por el efecto del error de seguimiento.

#### Repetibilidad de los datos.

Para comprobar la precisión de los datos obtenidos, se analiza la desviación circular bidireccional del ensayo a avance 1000mm/min. Los resultados del ensayo repetido diez veces, se pueden observar en la Tabla IV. 9 y Tabla IV. 10 incluidas en el Anexo IV.

Se obtiene un rango igual a 6,70  $\mu$ m con una desviación estándar de 2,29  $\mu$ m. La variabilidad que se percibe con la repetición del ensayo en las mismas condiciones es debida fundamentalmente a aspectos dinámicos de la máquina y a variaciones a corto plazo de repetibilidad de la propia máquina. Los errores del instrumento se estiman en  $\pm 1 \mu$ m, por lo que no se considera su influencia en la variabilidad.

##### 4.2.1.1. Juego en los ejes X e Y.

Se evalúa, de manera excepcional, el juego presente en el eje X y en el eje Y, analizando la media, el rango y la desviación estándar de los resultados y comparándolos con los proporcionados por Sergio Aguado Jimenez [12].

Los datos recogidos (Tabla 6) para su análisis y comparación son los datos de holgura obtenidos en el plano de ensayo XY para una velocidad de avance de 100mm/min, ya que como se ha comentado, a bajas velocidades de avance se perciben mejor los errores geométricos.

	Media	Rango	Desviación
Holgura X ( $\mu\text{m}$ )	22,85	0,90	0,64
Holgura Y ( $\mu\text{m}$ )	12,70	0,60	0,42

Tabla 6: Holgura de la fresadora ANAYAK, plano XY y avance 100mm/min

En una trayectoria lineal, la diferencia entre la lectura de posición de un eje a la ida y la lectura de posición en el mismo eje a la vuelta, da como resultado el juego del eje. En la Tabla 7 se pueden observar la media y el rango de los datos proporcionados sobre el juego de la máquina [12].

	Media	Rango	Desviación
Juego X ( $\mu\text{m}$ )	22,90	13,10	3,58
Juego Y ( $\mu\text{m}$ )	12,20	20,00	6,66

Tabla 7: Análisis del juego en los ejes X e Y de la fresadora ANAYAK [12]

Comparando la media de ambas tablas, observamos que tanto en el ensayo de una trayectoria lineal como el realizado en este TFG de trayectoria circular, se obtienen resultados bastante similares.

El ensayo cuyos resultados aparecen en la Tabla 7, se realizó a lo largo del eje X desde 0 hasta 1300mm de distancia, y a lo largo del eje Y de 0 a 690mm. El juego no es el mismo en cada posición del eje, lo que conlleva una obtención de resultados dispares si se observa una distancia u otra. Consecuencia de ello es que el rango de datos, así como la desviación, sea más grande para el ensayo de trayectoria lineal que para el de trayectoria circular.

La ventaja del ensayo mediante Ballbar telescopico es que, además de obtener el juego presente, obtiene otros muchos errores que afectan a la MH.

#### 4.2.2. Planos de ensayo YZ y ZX.

Los ensayos en los que la trayectoria seguida por el Ballbar se encontraba en el plano YZ y ZX, el arco de captura de datos ha sido de 180 grados en sentido antihorario y 180 grados en sentido horario, con un sobrerrecorrido de 5 grados en ambos sentidos para eliminar efectos de aceleración y deceleración.

En los ensayos realizados a avance igual a 1000mm/min la principal influencia en el trazado la ejerce el error de seguimiento, y en los ensayos realizados a avance 100mm/min se observa de manera más clara la influencia de los errores geométricos.

Como los ensayos con este arco de captura, solo muestran gráficos donde se observa la desviación circular horaria, antihoraria y bidireccional [8], y habiendo explicado anteriormente los resultados obtenidos en los ensayos a 360 grados, en este apartado sólo se incluyen los gráficos proporcionados por el software.

## Plano YZ, Ensayo 1.

ISO 230-4:2005(E)

**REISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
YZ 180grad 300mm 20150429-155904 (1) F1000**

Operario: Jaguilar  
Fecha: 2015-abr-29 15:59:04

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	918,6µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	300,0000mm
Avance	1000,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario Horario
Plano bajo ensayo	YZ
Posición del ensayo	0°
Ángulo de inicio	180°
Ángulo final	

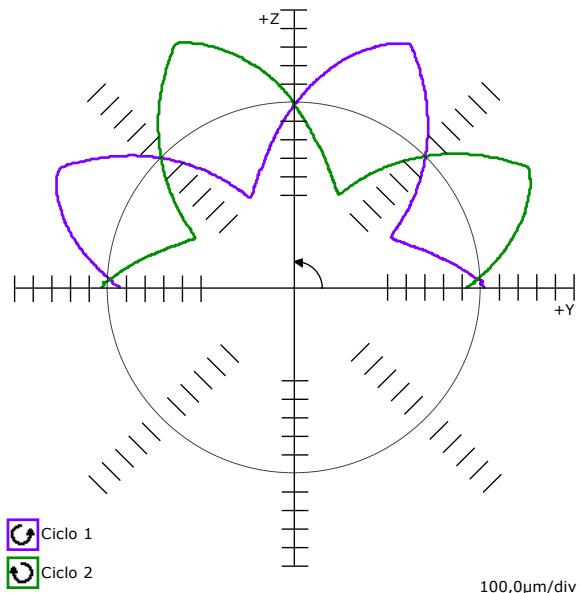


Figura 4.23: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano YZ y con avance 1000mm/min

## Plano YZ – Ensayo 2.

ISO 230-4:2005(E)

**REISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
YZ 180grad 300mm 20150429-162616 (1) F100**

Operario: Jaguilar  
Fecha: 2015-abr-29 17:14:38

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	183,3µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	300,0000mm
Avance	100,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario Horario
Plano bajo ensayo	YZ
Posición del ensayo	0°
Ángulo de inicio	180°
Ángulo final	

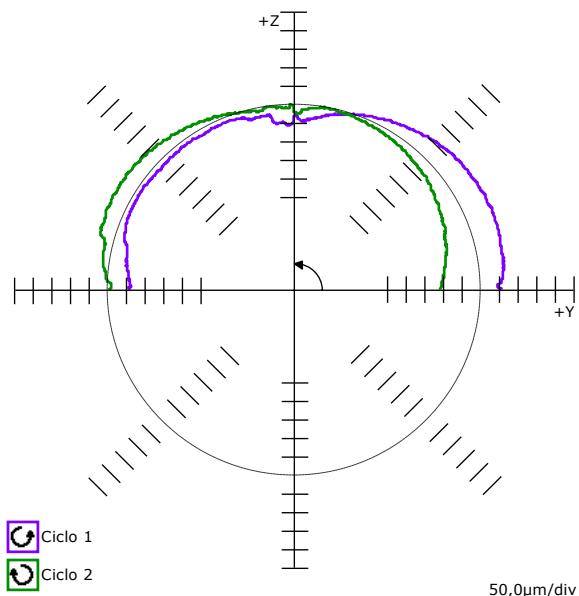


Figura 4.24: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano YZ y con avance 100mm/min

## Plano ZX - Ensayo 1.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
ZX 180grad 300mm 20150422-182227(1)F1000**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-abr-22 18:22:27

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	975,6µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	300,0000mm
Avance	1000,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario Horario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	270°
Ángulo de inicio	90°
Ángulo final	

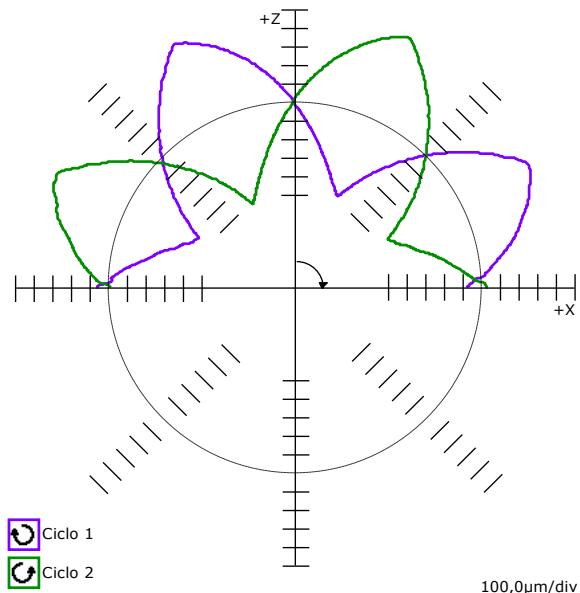


Figura 4.25: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano ZX y con avance 1000mm/min

## Plano ZX - Ensayo 2.

ISO 230-4:2005(E)

**RENISHAW**

**Desviación circular bidireccional  
ZX 180grad 300mm 20150422-185302 (1) F100**

Operario: Jagular  
Fecha: 2015-abr-22 18:53:02

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

<b>Desviación circular bidireccional</b>	
Valor	123,0µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	300,0000mm
Avance	100,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario Horario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	270°
Ángulo de inicio	90°
Ángulo final	

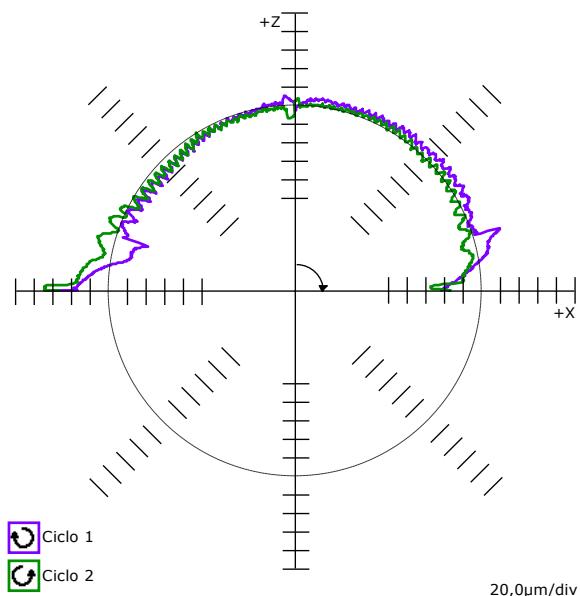


Figura 4.26: Diagnóstico fresadora ANAYAK en el plano ZX y con avance 100mm/min

#### **4.2.3. Conclusiones del ensayo.**

Se consideran grandes velocidades de avance o avance elevado los ensayos realizados a 1000mm/min y 3000mm/min, y bajas velocidades de avance o bajo avance el ensayo realizado a 100mm/min.

La diferencia entre la consigna de posición y la posición real se conoce como error de seguimiento. Este error de seguimiento, aumenta de manera lineal desde un avance de 100 mm/min hasta un avance de 1000 mm/min, a partir del cual aumenta de manera exponencial, llegando a su máximo valor para un avance de 3000 mm/min y manteniéndose para avances mayores. Ésta diferencia de posiciones, llega a un control de posición, que gracias a un control numérico básico convierte la posición de cada eje en una señal de velocidad que llega al regulador, ejecutando el movimiento en cada eje. Como se observa en los ensayos a gran avance, la velocidad de avance en los ejes difiere de la programada a causa del error de seguimiento presente.

El control de la máquina utiliza la compensación de holgura para subsanar los errores generados por el juego en el accionamiento. La capacidad del control para corregir el efecto de este juego depende de la velocidad de avance, del radio de ensayo y del tiempo de respuesta del servo. A pesar de que la holgura no depende de la velocidad de avance, se observa que los valores de los diferentes ensayos varían, incluso en el signo, debido a la compensación de holgura, que a veces resulta excesiva

Los problemas residentes en las guías, como la inclinación de las mismas o el juego entre ellas, son los principales responsables de la holgura, error de tipo axial, y el juego lateral, error de tipo tangencial, en los ejes.

El juego lateral no se ve afectado por la velocidad de avance de la máquina pero sí lo hace con el sentido de giro, lo que provoca la variación en los resultados entre los ensayos. Se comprueba que a avances pequeños, el juego lateral del eje Y es prácticamente despreciable, adquiriendo mayor importancia el juego en el eje X. Sin embargo, a grandes avances se observa que el juego lateral en el eje Y es uno de los principales errores que afectan al círculo óptimo, siendo los valores del juego lateral en el eje X mínimos. Con esta comparación se concluye que el eje Y se ve más afectado para velocidades de avance elevadas y le afectan más los errores servo-dinámicos. Sin embargo, al eje X le afectan más los errores geométricos y las velocidades de avance bajas.

La deformación de las guías y su desalineación son las responsables de la falta de rectitud, que a su vez es responsable de la falta de perpendicularidad de los ejes, ya que el ángulo entre ellos supera los 90 grados, y de la descompensación de escalado, ya que aunque esta no varía ni con el sentido de giro ni con el avance, si le afecta el error angular al que puede estar sometido la máquina, provocando el cabeceo de los ejes y un sobrerrecorrido de un eje sobre otro. A avances elevados, el eje X es el que realiza un sobrerrecorrido sobre el eje Y, y a bajos avances es el eje Y el que realiza un sobrerrecorrido sobre el eje X.

La intensidad de la distorsión que produce el desajuste del servo, aumenta con el avance, y es provocado por una descompensación de las ganancias del bucle del servo. Este desajuste hace que un eje adelante al otro, siendo el eje adelantado el que tiene la ganancia del bucle más alta. Esta falta de regulación del servo provoca un tiempo de

respuesta del servo inadecuado, lo que significa que la máquina no puede compensar la holgura a tiempo, haciendo que el eje se detenga mientras se compensa el espacio provocado por la holgura y provocando los picos de inversión. Los picos en la inversión del eje Y adquieren mayor importancia para velocidades de avance grandes, y los picos en la inversión del eje X son más relevantes para aplicaciones de bajo avance.

Como se ha mostrado la realización de ensayos a una baja velocidad de avance, refleja mejor errores de tipo geométricos, como la descompensación de escalado, cuadratura, rectitud, error cíclico y paso cíclico; y la realización de ensayos a alto avance muestra mejor los errores servo-dinámicos, como error de seguimiento, desajustes del servo y picos en la inversión.

#### **4.3. Torno PINACHO.**

Los ensayos realizados en el torno PINACHO han sido para un radio de trayectoria nominal igual a 100mm. Al ser una MH de dos ejes, sólo se ha podido realizar el ensayo en el plano ZX.

En la Tabla 8 se incluyen los resultados obtenidos para el error de seguimiento (mm) en los diferentes ensayos, observando que es directamente proporcional al avance.

PINACHO		F100	F1000
Plano ZX	Eje X	0,113	1,120
	Eje Z	0,033	0,303

**Tabla 8:** Error de seguimiento (mm) en torno PINACHO

#### **Plano ZX, Ensayo 1.**

El ensayo (Figura 4.27) realizado a velocidad de avance 1000mm/min se llevó a cabo diez veces para comprobar la repetibilidad de los datos. A esta velocidad de avance, el principal error y por tanto el que más influencia tiene, es el error de seguimiento.

**Desviación circular bidireccional  
T\_ZX 180grad 100mm 20150506-160130 (1) F1000**

Operario: Jaguilar  
Fecha: 2015-may-06 16:01:30

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

**Desviación circular bidireccional**Valor 1088,4 $\mu$ m**Parámetros del Ensayo**

Radio	100,0000mm
Avance	1000,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	0°
Ángulo de inicio	180°
Ángulo final	

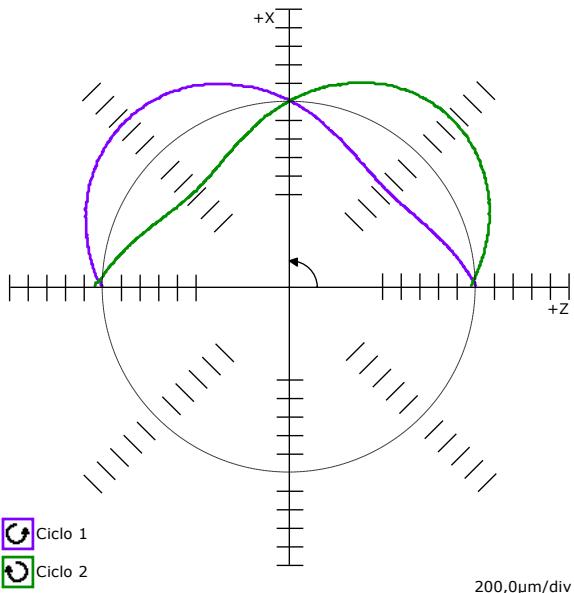


Figura 4.27: Diagnóstico torno PINACHO en el plano ZX y con avance 1000mm/min

**Plano ZX, Ensayo 2.**

El ensayo (Figura 4.28) realizado a velocidad de avance 100mm/min se efectuó dos veces . Al ser un ensayo de 180 grados, el software no proporciona un diagnóstico completo, por lo que hay que realizar la interpretación de los gráficos de la desviación circular en sentido antihorario (Figura 4.29) y horario (Figura 4.33) por separado [8]

**Desviación circular bidireccional  
T\_ZX 180grad 100mm 20150506-162919 (1) F100**

Operario: Jaguilar  
Fecha: 2015-may-06 16:29:19

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

**Desviación circular bidireccional**Valor 126,6 $\mu$ m**Parámetros del Ensayo**

Radio	100,0000mm
Avance	100,0mm/min
Secuencia ciclos	Antihorario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	0°
Ángulo de inicio	180°
Ángulo final	

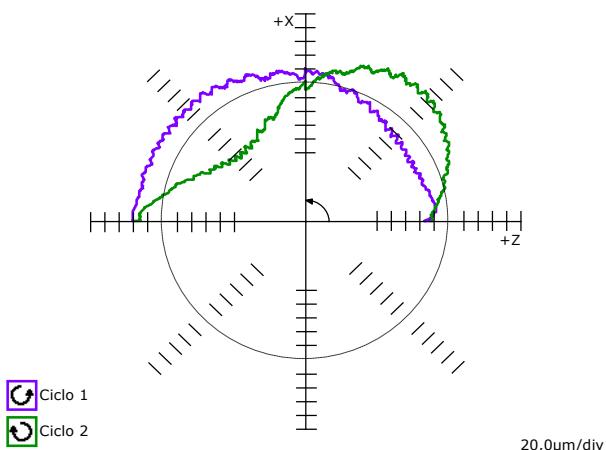


Figura 4.28: Diagnóstico torno PINACHO en el plano ZX y con avance 100mm/min

**Desviación circular****T\_ZX 180grad 100mm 20150506-162919 (1) F100**

Operario: Jaguilar

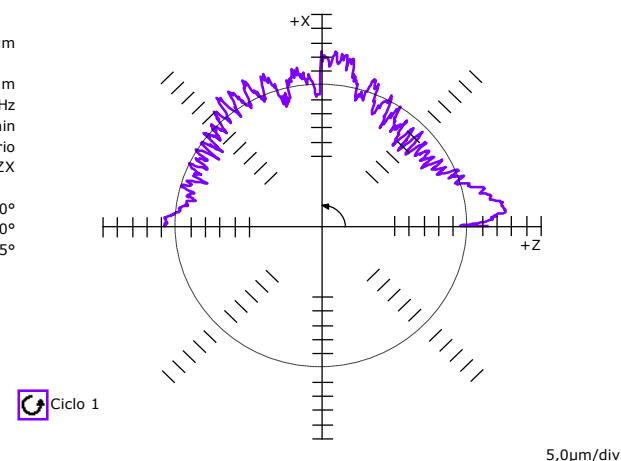
Fecha: 2015-may-06 16:29:19

Máquina: Chequeo rápido

QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

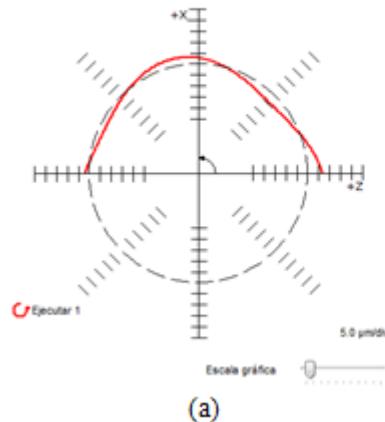
**Desviación circular (antihorario)**

Valor	25,9µm
<b>Parámetros del Ensayo</b>	
Radio	100,0000mm
Número de datos	3,968Hz
Avance	100,0mm/min
Sentido de giro	Antihorario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	0°
Ángulo final	180°
Ángulo de sobrerecorrido	5°

**Figura 4.29:** Desviación circular (antihorario) torno PINACHO en el plano ZX y con avance 100mm/min

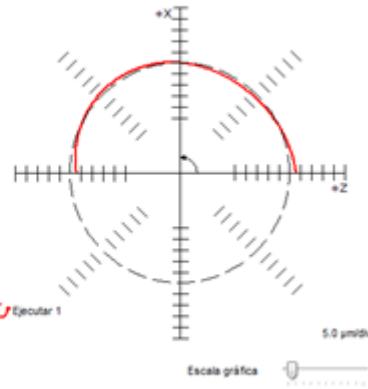
Los errores geométricos principales que se pueden observar en la Figura 4.29 son una falta de rectitud (Figura 4.30, a), tanto en el eje X como en el eje Z; error de cuadratura (Figura 4.30, b) que conlleva que el ángulo entre los ejes X y Z sea mayor de 90 grados, descompensación de escalado positiva (Figura 4.30, c) que provoca que el eje Z realice un sobrerecorrido en el eje X. El principal error de ejecución es la holgura (Figura 4.30, c) en ambos ejes.

**RENISHAW**  
apply innovation™



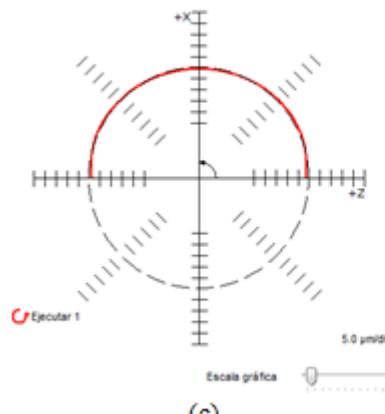
(a)

**RENISHAW**  
apply innovation™



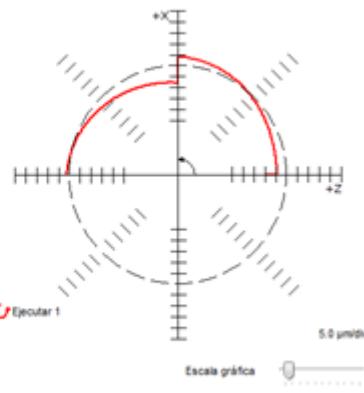
(b)

**RENISHAW**  
apply innovation™



(c)

**RENISHAW**  
apply innovation™

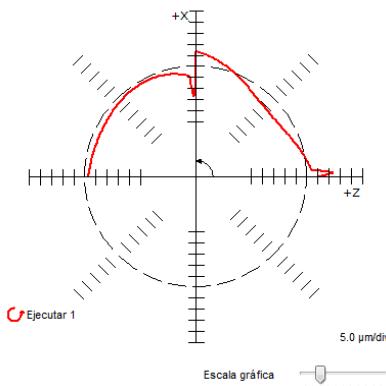


(d)

**Figura 4.30:** (a) Simulación del error de rectitud; (b) Simulación del error de cuadratura; (c) Simulación de la descompensación de escalado; (d) Simulación de la holgura.

La superposición de todos los errores anteriormente citados, añadiendo picos en inversión de ambos ejes (Figura 4.31) nos da como resultado los principales errores que afectan a la MH en sentido antihorario. Añadiendo vibración de la máquina, errores cíclicos en ambos ejes y la regulación del servo obtendríamos un gráfico (Figura 4.32, a) bastante aproximado al observado en la Figura 4.32, (b)

**RENISHAW**  
apply innovation™



**Figura 4.31:** Simulación de la superposición de los errores citados más los picos en la inversión

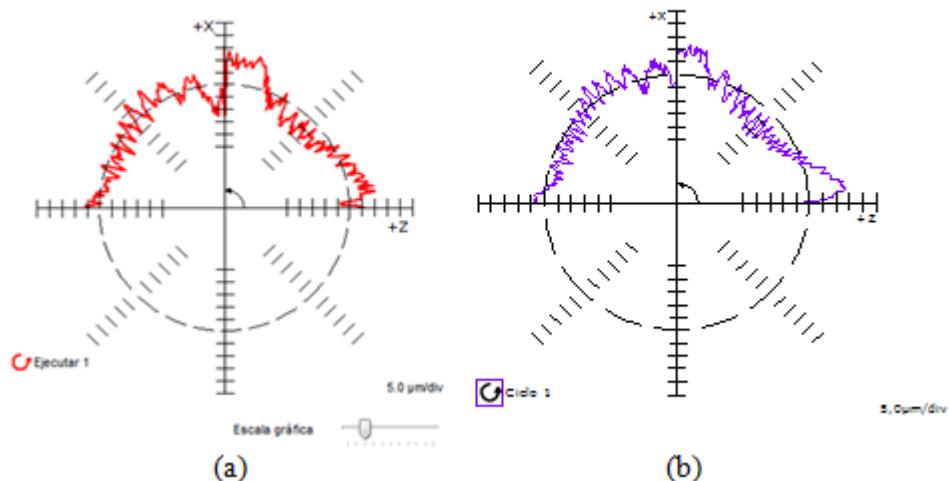


Figura 4.32: (a) Simulación de todos los errores; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008

Para el ensayo obtenido en sentido horario (Figura 4.33), se realiza el mismo procedimiento para obtener los principales errores.

**ISO 230-4:2005(E)**

**Desviación circular**

**T\_ZX 180grad 100mm 20150506-162919 (1) F100**

Operario: Jaguilar  
Fecha: 2015-may-06 16:29:19

Máquina: Chequeo rápido  
QC10: H15774, Última calibración: 2015-03-24

**Desviación circular (horario)**

Valor 129,3μm

**Parámetros del Ensayo**

Radio	100,0000mm
Número de datos	3,968Hz
Avance	100,0mm/min
Sentido de giro	Horario
Plano bajo ensayo	ZX
Posición del ensayo	
Ángulo de inicio	0°
Ángulo final	180°
Ángulo de sobrerecorrido	5°

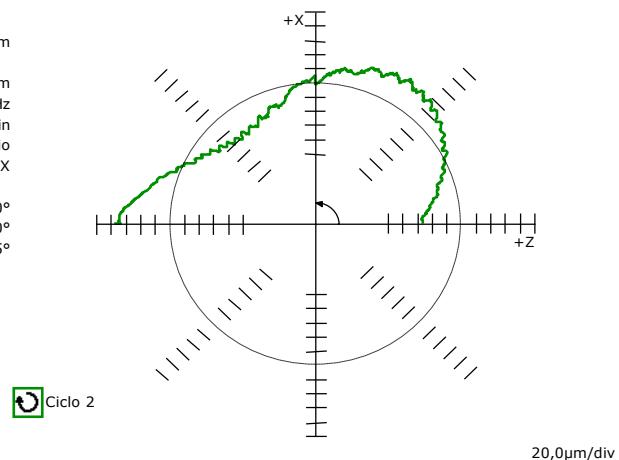
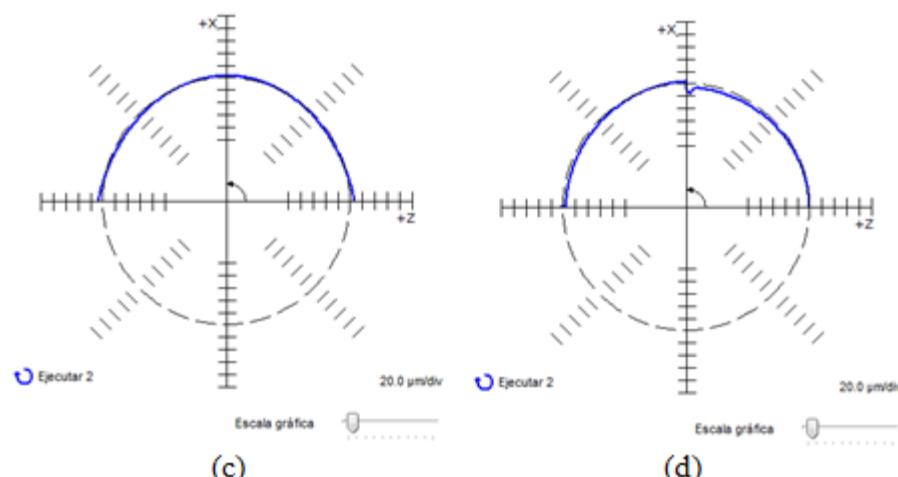
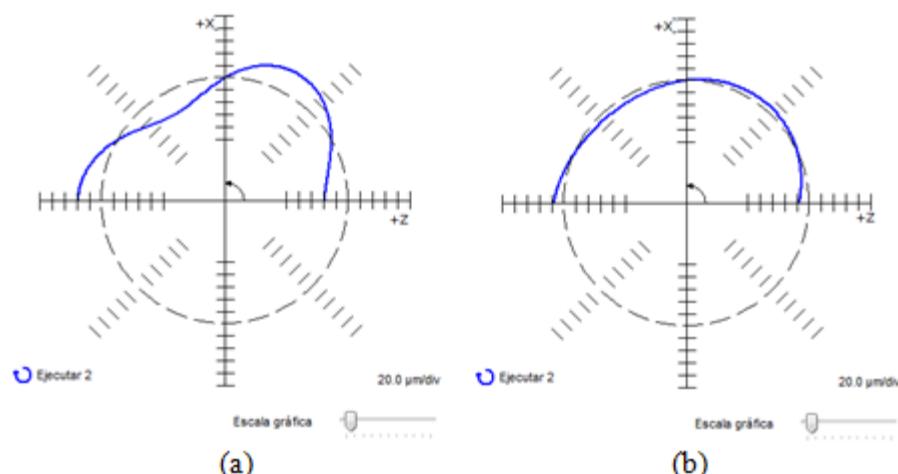


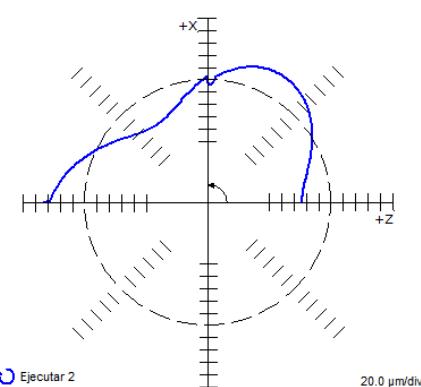
Figura 4.33: Desviación circular (horario) torno PINACHO en el plano ZX y con avance 100mm/min

Los errores geométricos principales que se pueden observar son una falta de rectitud (Figura 4.34, a) en el eje X, error de cuadratura (Figura 4.34, b) que conlleva que el ángulo entre los ejes X y Z sea mayor de 90 grados, descompensación de escalado negativa (Figura 4.34, c) que provoca que el eje X realice un sobrerecorrido en el eje Z. Los errores dinámicos y de ejecución (Figura 4.34,d) que se observan son holgura en ambos ejes, juego lateral igual en eje Z y desigual en eje X, picos en la inversión con valor negativo tanto del eje X como en el Z.

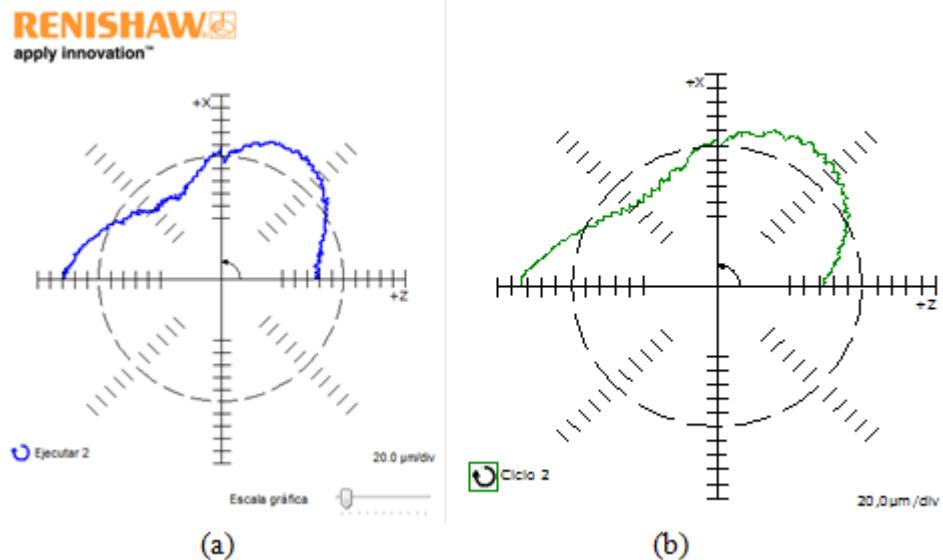


**Figura 4.34:** (a) Simulación del error de rectitud; (b) Simulación del error de cuadratura; (c) Simulación de la descompensación de escalado; (d) Superposición de la holgura, juego lateral y picos en la inversión.

Se realiza la superposición de todos los errores anteriores (Figura 4.35) y, añadiendo vibraciones de la máquina y errores cíclicos, se obtiene un gráfico (Figura 4.36, a) bastante aproximado al de la figura Figura 4.36 (b).



**Figura 4.35:** Simulación de la superposición de los errores citados



**Figura 4.36:** (a) Simulación de todos los errores; (b) Gráfico obtenido según UNE-ISO 230 -4:2008

## **Repetibilidad de los datos.**

Para comprobar la precisión de los datos obtenidos, se analiza la desviación circular bidireccional del ensayo a avance 1000mm/min. Los resultados del ensayo repetido diez veces, se pueden observar en la Tabla IV. 17 incluida en el Anexo IV.

Se obtiene un rango igual a 3,1  $\mu\text{m}$  con una desviación estándar de 1,11  $\mu\text{m}$ . Los errores del instrumento se estiman en  $\pm 1 \mu\text{m}$  por lo que la variabilidad observada al repetir el ensayo en las mismas condiciones no se debe al instrumento, sino a aspectos dinámicos de la maquina y a variaciones a corto plazo de repetibilidad de la propia máquina.

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones.

### 5.1. Trabajo realizado.

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se han relatado los diferentes tipos de errores que acaecen a una MH, explicando su influencia al mecanizar una pieza, su posible origen y una serie de mejoras a realizar para subsanarlos.

Con ayuda del conocido y eficaz sistema Ballbar, se han llevado a cabo diferentes ensayos en los que para una misma máquina, manteniendo el radio de la trayectoria nominal, se han variado parámetros como la velocidad de avance, arco y plano de ensayo. Para estos ensayos, ha sido necesario un estudio previo de las MH y su cuadro de mando, y la creación de los programas CNC que han determinado la trayectoria circular que ha realizado del Ballbar.

Los ensayos realizados a avances grandes han permitido diagnosticar la influencia que tiene el error de seguimiento en la distorsión del trazado del Ballbar. Los ensayos a bajas velocidades de avance han evidenciado la magnitud de los errores geométricos.

Gracias a la repetición, bajo las mismas condiciones, del ensayo en la fresadora ANAYAK en plano XY y avance 1000mm/min y el ensayo en el torno PINACHO en plano ZX y avance 1000mm/min, se ha comprobado que el Ballbar proporciona unos datos fiables con elevada repetibilidad, teniendo menor rango de variación y menor desviación en el torno que en la fresadora.

Dejando a un lado errores de tipo humano o del sistema de medición, tras el análisis de las tres MH, se llega a la conclusión de que las posibles fuentes de errores en la fresadora KONDIA son la deformación de los ejes de la máquina y los husillos de los ejes, que pueden estar dañados o recalentados debido a un fallo de cabeceo; en la fresadora ANAYAK el tiempo de respuesta del servo, la existencia de deformaciones en los ejes y anomalías en los husillos; en el torno PINACHO deformación de las guías, errores angulares y cabeceo de los ejes. Respecto al error de seguimiento, se observan mayores valores para la fresadora ANAYAK que aumentan de manera exponencial y no lineal como en las otras dos máquinas.

La principal ventaja de este sistema de medición con respecto a otros existentes, es la elaboración de manera rápida de un diagnóstico completo, incluyendo todos los errores que afectan a la máquina, su magnitud y porcentaje de influencia en la

circularidad. Por otro lado, la desventaja observada es la falta de detección del error de seguimiento, y por tanto, su influencia en el resto de errores.

Para finalizar, se llega a la conclusión de que la verificación geométrica de una MH es realmente necesaria para evaluar la influencia de los errores presentes en su comportamiento.

### **5.2. Líneas de trabajo futuro.**

Este TFG puede servir como base a trabajos futuros que no han podido llevarse a cabo debido al tiempo que se necesitaría para su estudio:

- Obtener otros métodos de verificación de errores en MH que incluyan la detección del error de seguimiento y que valoren su influencia en el resto de errores detectados.
- Realizar ensayos calibrando previamente la longitud del Ballbar para poder obtener resultados de la desviación radial bidireccional.
- Comprobar la influencia del radio, realizando ensayos con diferentes diámetros de trayectoria nominal, en los errores obtenidos para una velocidad de avance fija y una misma MH.
- Analizar del juego presente en cada uno de los ejes de las MH estudiadas, determinar su posible origen, su influencia en otros errores y buscar posibles soluciones.

## Anexo I

### Software Renishaw Ballbar QC 20.

Para la toma de datos se ha usado el Software Renishaw Ballbar QC 20. Este software ofrece cuatro modos de trabajo que se introducen a continuación:

- *Comprobación rápida*, se pueden definir de manera fácil y rápida los ensayos de Ballbar, ejecutarlos y revisar los resultados.
- *Operario*, permite ejecutar ensayos predefinidos de Ballbar en cada MH. Los resultados se almacenan y pueden revisarse de forma individual o como parte de un análisis del historial, que muestra las variaciones de rendimiento de la máquina entre los ensayos.
- *Avanzado*, es el modo de utilización más completo del software de Ballbar y debe ser utilizado por operadores expertos. En este modo puede definir un ensayo, revisar los resultados, almacenar los ensayos como plantillas para usarlas en el modo Operario y definir las carpetas de máquina donde se almacenan las plantillas de ensayos y los resultados.
- *Configuración*, permite añadir, editar y eliminar del sistema un Ballbar o un calibrador.

Para una mejor comprensión de los diferentes modos de trabajo y a modo de aclarar las diferencias entre cada uno, se incluyen una serie de diagramas de flujo revisión de resultados del ensayo (Figura I.1) , ejecutar un ensayo Ballbar (Figura I.2), ver historial de la máquina (Figura I.3)

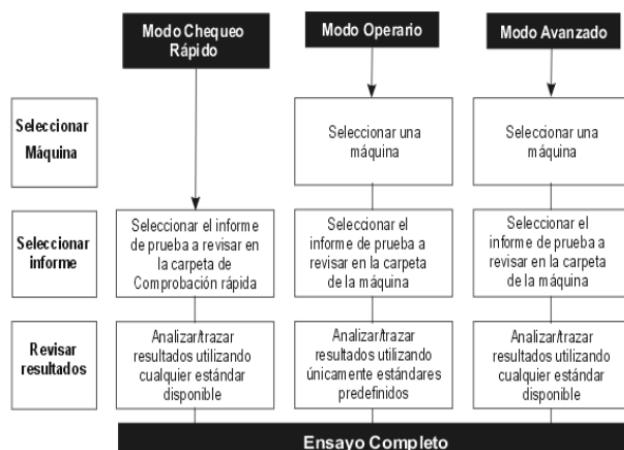
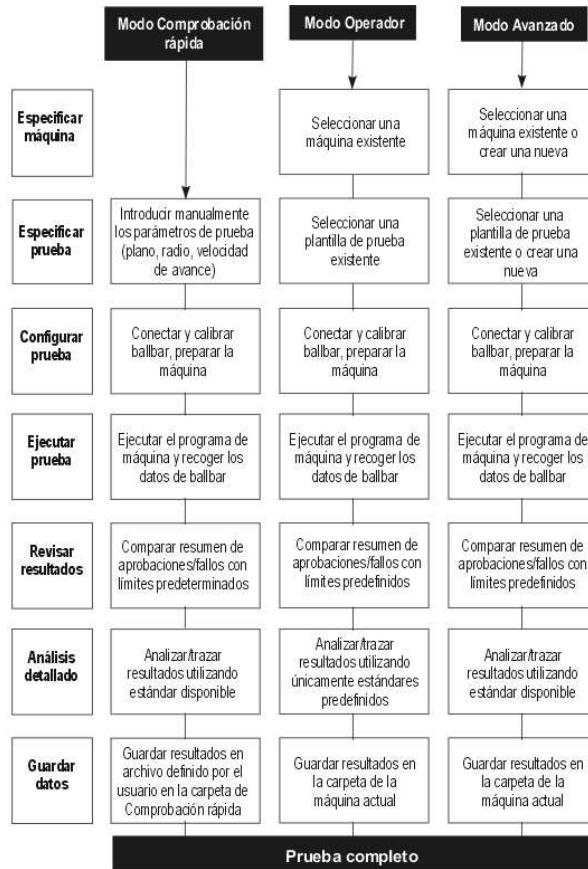
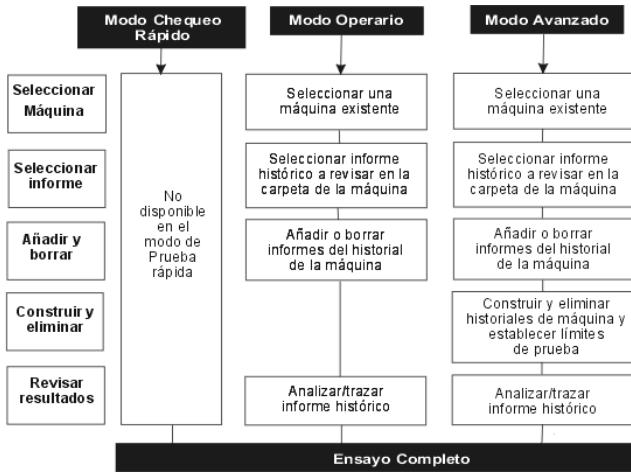


Figura I.1: Revisión de resultados del ensayo.



**Figura I.2:** Ejecutar un ensayo Ballbar



**Figura I.3:** Ver histórico de la máquina

## Modo chequeo rápido

Para la recogida de datos se ha seleccionado el modo chequeo rápido, ya que lo que interesa es la ejecución y revisión de ensayos con Ballbar y no el seguimiento de estos errores a lo largo del tiempo, por el momento.

En la opción de modo chequeo rápido (Figura I.4), el programa ofrece dos opciones, *ejecutar un ensayo ballbar*, cuyo procedimiento se detalla a continuación, y *revisar resultados*, del que se hablará más adelante.



Figura I.4: Modo chequeo rápido

La ventana Configurar ensayo 1 (Figura I.5), sirve para definir el tipo de ensayo que se va a realizar. Lo primero que se debe hacer es seleccionar el tipo de MH según el movimiento del cabezal principal. En este TFG, para las fresadoras ANAKAY y KONDIA se ha seleccionado el primer tipo, y para el torno PINACHO el tercero. Posteriormente hay que decidir el plano de ensayo, el avance al que se realizará (debe coincidir con el avance programado en el CNC), el radio del ensayo (debe coincidir con el introducido en el programa CNC).

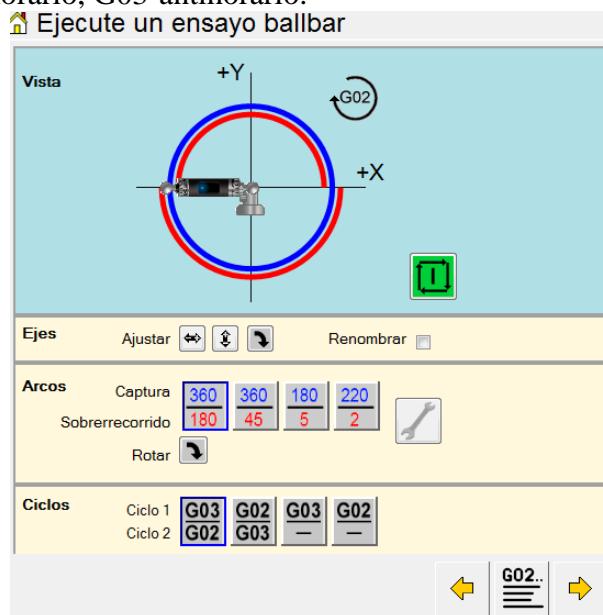
Si se necesita el calibrado de longitud Ballbar, se debe seleccionar la casilla calibrador. Si se desea incluir la expansión térmica, se debe indicar el coeficiente de expansión de máquina.



Figura I.5: Configurar ensayo 1

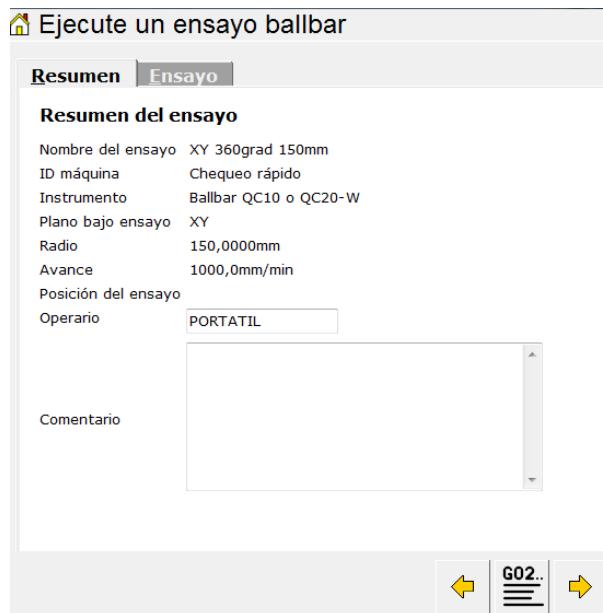
La ventana Configurar ensayo 2 (Figura I. 6), nos muestra la configuración del ensayo en curso. En los ejes, se debe seleccionar la dirección de movimiento de la herramienta relativa al soporte de trabajo .En los arcos se debe seleccionar la trayectoria de la herramienta. La captura es el arco total de ensayo, en grados, durante el que se capturarán los datos y el sobrerecorrido son los grados que ignora al principio y al final

para eliminar los efectos de aceleración y deceleración. Para finalizar, se selecciona el ciclo del ensayo, G02-horario, G03-antihorario.



**Figura I.6:** Configurar ensayo 2

La ventana Resumen del ensayo (Figura I.7), sirve para comprobar todas las especificaciones del ensayo elegido. Una vez comprobado, se coloca el Ballbar y las barras de extensión de forma que coincidan con el radio de ensayo, se prepara la máquina y el programa automático para el ensayo.



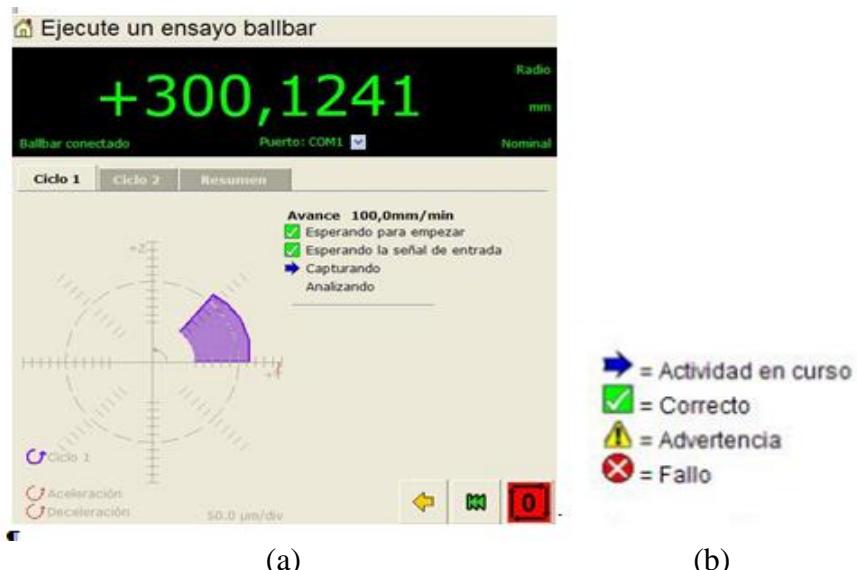
**Figura I.7:** Resumen del ensayo

Conectado el Ballbar al PC, la pantalla (Figura I.8) muestra la lectura, la longitud y el número de serie del Ballbar. Como se usa el Ballbar QC 10, se debe comprobar que el factor de escala y el número de serie son los correctos antes de continuar.



**Figura I.8:** Conexión de Ballbar

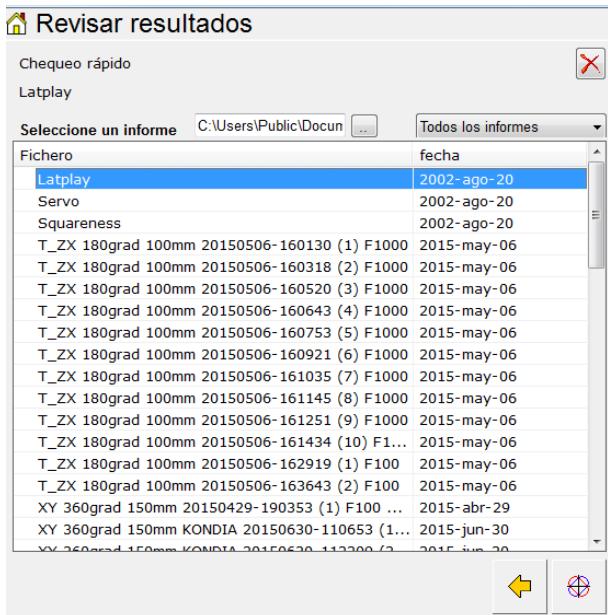
Para ejecutar el ensayo (Figura I.9, a), se aliena el husillo de la máquina con el montaje magnético del Ballbar. Se mueve la máquina hacia el punto de inicio y se coloca el Ballbar. En caso de solicitarse, especifique la temperatura de la máquina (en este TFG no ha sido necesario). Se clica el botón verde y posteriormente se inicia el CNC en la máquina. La captura de datos es automática. El progreso se muestra mediante una serie de símbolos (Figura I.9, b). Si no ha dado ningún fallo, el programa da la opción de guardar el ensayo al finalizar.



**Figura I.9:** (a) Ejecución de ensayo, (b) Símbolos de progresión del ensayo

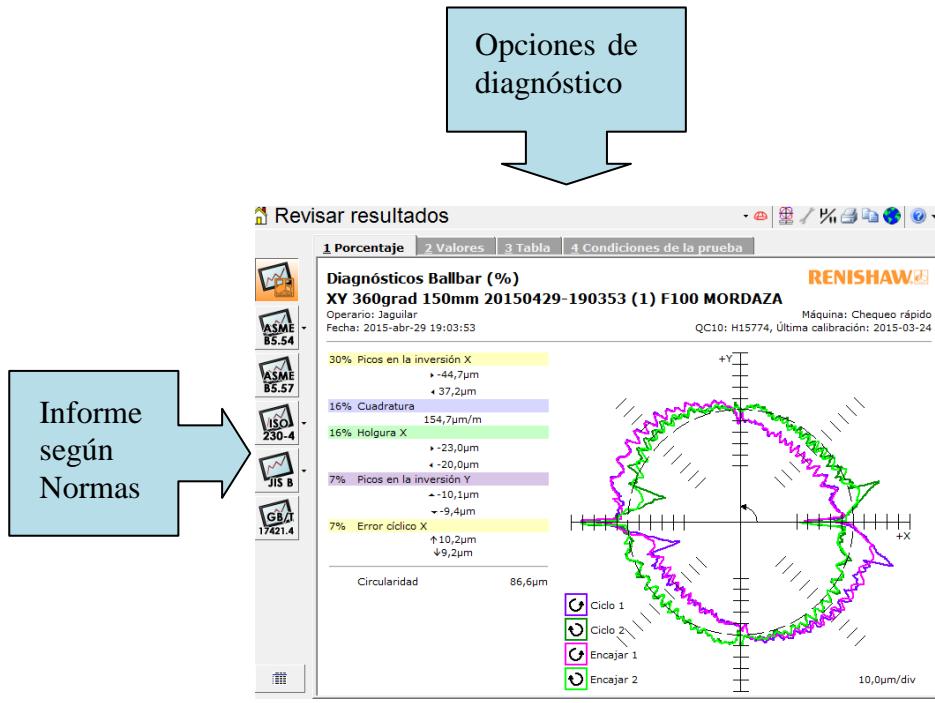
Para revisar los resultados de los ensayos obtenidos (Figura I.4), se clica en “Revisar de resultados”. La ventana Selección de un informe (Figura I.10) muestra los informes de ensayo Ballbar que existen.

Se selecciona el ensayo deseado, bien haciendo doble clic o clicando el botón inferior derecho, y aparece el diagnóstico del ensayo Ballbar (Figura I.11).



**Figura I.10:** Revisión de resultados.

El software Ballbar puede analizar automáticamente los trazados de Ballbar y diagnosticar la magnitud de los errores de máquina concretos. En el ensayo en el plano XY, proporciona cuatro opciones de diagnóstico: porcentajes, valores, tabla y condiciones de ensayo. Por otro lado, se pueden visualizar informes del ensayo según las normas ASME B5.54 [7], ASME B5.57, ISO 230-4 [8] , JIS B 6190 y GB/T 17421.4.



**Figura I.11:** Diagnóstico Ballbar

La pestaña *Porcentaje* muestra un trazado polar de los datos capturados, acompañado de un diagnóstico de los errores que muestra el trazado y su magnitud. Estos errores se muestran en valores de porcentaje. Los porcentajes indican la

proporción de los errores generales no circulares que pueden atribuirse a errores de diagnóstico. Se muestran por orden de prioridad de mayor a menor.

El trazado muestra los ciclos capturados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario, para facilitar el reconocimiento. Ambos están centrados sobre un trazado perfecto representado por un círculo de puntos. Además de los datos de Ballbar del Ciclo 1 y Ciclo 2, el trazado muestra los datos ajustados (Encajar 1 y Encajar 2) generados a partir de los resultados diagnosticados. Comparando los datos ajustados con los datos del ciclo, puede averiguar si el diagnóstico se ajusta con precisión a los datos registrados por el Ballbar. Si la coincidencia es buena, los trazados se muestran prácticamente superpuestos, lo que indica un diagnóstico correcto. Si la coincidencia no es buena indica que el diagnóstico no es correcto, debido posiblemente a errores de máquina no diagnosticados por el software.

La pestaña *Valores* (Figura I.12) muestra un trazado polar de los datos capturados, acompañado de un diagnóstico de los errores que muestra el trazado y su magnitud. Los errores se muestran como valores que indican la proporción de los errores generales no circulares que pueden atribuirse a errores de diagnóstico. Se muestran en orden fijo para simplificar la comparación de trazados.

La pestaña *Tabla* (Figura I.13) muestra una lista de todos los errores calculados durante la captura de datos. Mediante esta tabla, el usuario puede obtener sus propias conclusiones sobre los errores detectados durante la captura de datos.

La pestaña *Condiciones del ensayo* (Figura I.14) contiene una lista de todos los parámetros de ensayo, incluido un encabezado con la Fecha, la Hora, el Operario, la Máquina y el Instrumento utilizados.

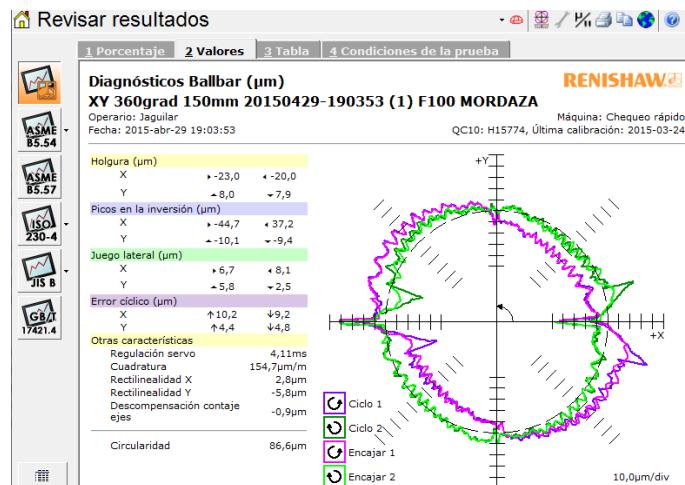


Figura I.12: Diagnóstico Ballbar, pestaña Valores

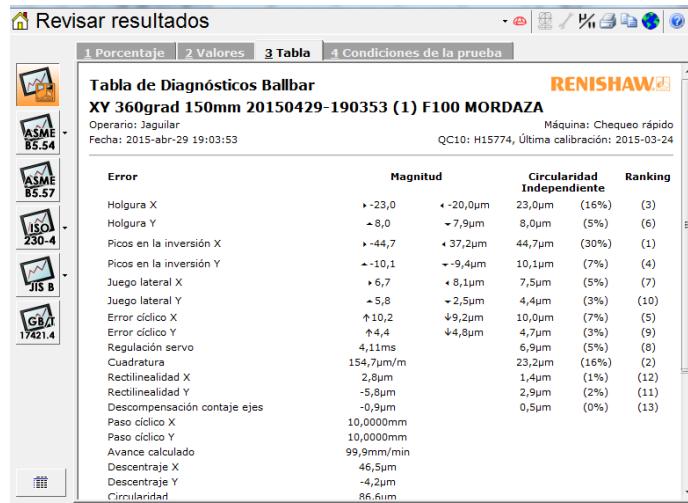


Figura I.13: Diagnóstico Ballbar, pestaña Tabla

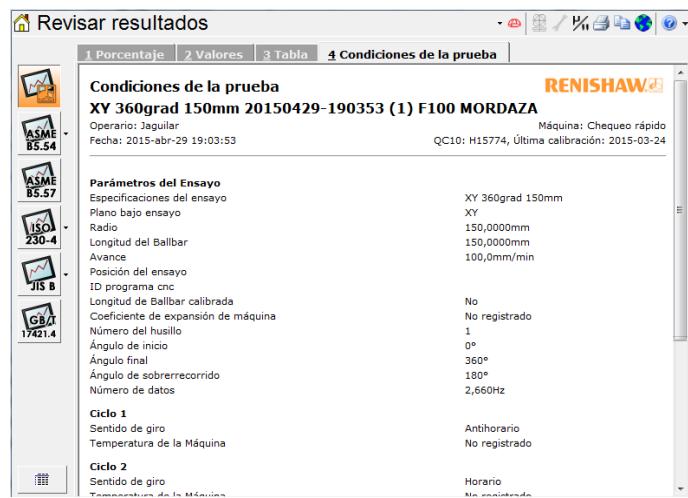


Figura I.14: Diagnóstico Ballbar, pestaña Condiciones de la prueba

Para obtener el informe del ensayo según la norma deseada, hay que hacer clic en una de las pestañas del margen derecho de la pantalla. En este TFG, se han analizado los datos según la norma UNE-ISO 230-4:2008 [8] (imagen).

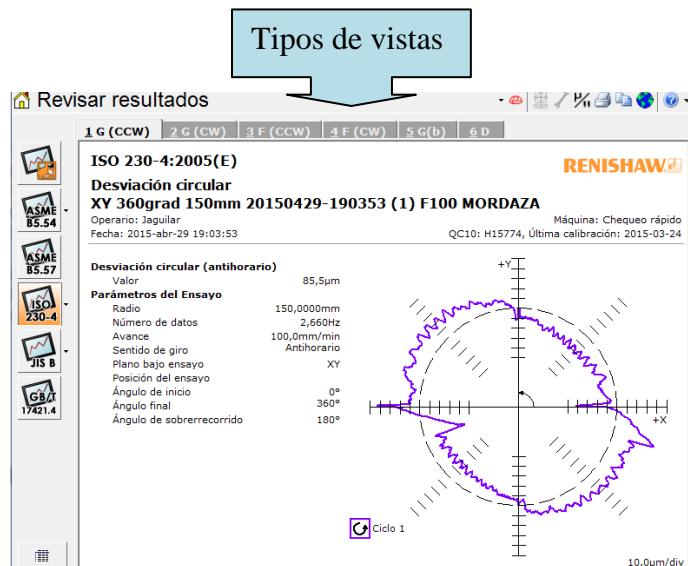


Figura I.15: Gráfico obtenido según UNE-ISO 230-4:2008

Las vistas que ofrece son: G(CCW), desviación circular antihoraria; G(CW), desviación circular horaria; F(CCW), desviación radial antihoraria; F(CW), desviación radial horaria; G(b), desviación circular bidireccional; D , desviación radial bidireccional promedio.

## Anexo II

### Errores detectados por el ballbar

El software Renishaw Ballbar QC20 puede analizar automáticamente los resultados obtenidos para ensayos de 360°. En la descripción que se incluye a continuación de cada tipo de error, se incluye:

- Una breve descripción de las características del trazado.
- Detalles de los valores de diagnóstico proporcionados por el software.
- Detalles sobre las causas de determinadas características representadas en el trazado y el efecto de éstas en la máquina.
- El tipo de acción que debe tomarse para rectificar correctamente los problemas detectados.

Los errores de trazado pueden derivarse de errores de máquina o de errores de ensayo. Los errores de máquina son errores o fallos de la máquina durante el ensayo. Los errores de ensayo son errores o fallos del Ballbar o del modo en el que se ha realizado el ensayo.

#### Errores de geometría

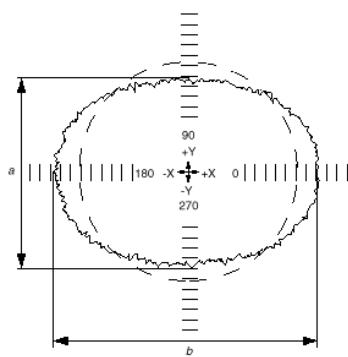
##### Descompensación de escalado.

El error de escalado es la diferencia entre las trayectorias medidas de los ejes durante el ensayo. Por ejemplo, si la máquina está realizando un círculo en el plano XY; los ejes X e Y deben moverse por encima exactamente a la misma distancia. De no ser así, la diferencia de sus movimientos genera el error de descompensación.

Cabe destacar que al realizar ensayos de arco parcial no se muestra el error de escalado ó descompensación de escalado.

##### **Trazado**

El trazado (Figura II. 1) tiene forma ovalada, distorsionada sobre el eje 0° o 90°. El eje de distorsión no se ve afectado por la dirección de la captura de datos, es decir, en sentido horario o antihorario. Normalmente, la intensidad de la distorsión generada por el error de escalado no se ve afectada por la velocidad de avance de la máquina.



**Figura II. 1:** Trazado de la descompensación de escalado

### Valores de diagnóstico

Los valores de diagnóstico especificados por el error de escalado dependen de si se ha utilizado o no un Ballbar calibrado para la captura de datos. Si se ha utilizado un Ballbar sin calibrar, como en este TFG, el error de escalado sólo puede especificarse como un valor de descompensación entre los ejes X e Y.

La descompensación de escalado se expresa en micrómetros. Se calcula obteniendo el diámetro del eje X a partir del diámetro del eje Y, como se mide en el trazado. Si el valor especificado para descompensación de escalado es positivo, entonces el eje X realiza un sobrerrecorrido en el eje Y. Si el valor es negativo, entonces el eje Y realiza un sobrerrecorrido en el eje X.

### Causa

Si uno de los ejes de la máquina está realizando un sobrerrecorrido o un recorrido corto entre sí, puede deberse a varios motivos:

- Si se utilizan parámetros de compensación de errores lineales, pueden estar configurados incorrectamente.
- La regla de cinta del eje puede estar muy tensa o muy floja.
- El eje del husillo puede estar dañado o recalentado debido a un fallo de cabeceo.

Otros motivos pueden ser que la máquina esté sometida a un error angular que hace que los ejes X o Y cabeceen, saliéndose del plano del ensayo durante el avance, ó que las guías del eje no estén rectas o no tengan la rigidez suficiente.

### Efecto

El efecto de cualquier tipo de descompensación de escalado es la presencia de errores dimensionales en las piezas mecanizadas.

### Medida a tomar

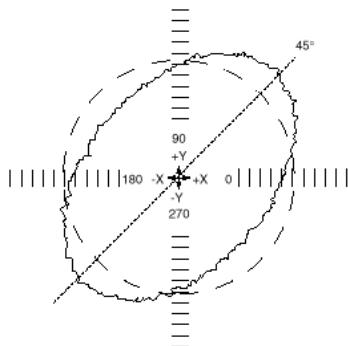
Es necesario establecer una serie de medidas a tomar para corregir este error:

- Verificar que los valores de compensación de errores lineales están configurados correctamente.
- Comprobar la tensión de las reglas de cinta de los ejes.
- Comprobar que el husillo está en perfecto estado y no se ha recalentado.
- Asegurar la rectitud de las guías de la máquina.

## **Cuadratura**

### **Trazado**

El trazado (Figura II. 2) tiene forma ovalada, distorsionada en la diagonal a  $45^\circ$  o  $135^\circ$ . El eje de distorsión es el mismo para ambos sentidos (horario y antihorario). La intensidad de la distorsión no se ve afectada por la velocidad de avance.



**Figura II. 2:** Trazado de la cuadratura

### **Valores de diagnóstico**

La cuadratura se expresa en  $\mu\text{m}/\text{m}$ , aunque el software permite el uso de otras unidades, como arcosegundos, grados, micrómetros/pies, micrómetros/milímetro.

Un error de cuadratura positivo indica que el ángulo entre los dos ejes positivos es superior a  $90^\circ$ . Un error de cuadratura negativo indica que el ángulo entre los dos ejes positivos es inferior a  $90^\circ$ .

### **Causa**

El error de cuadratura se produce cuando los ejes X e Y de la máquina no están a  $90^\circ$  entre sí. Los ejes pueden haberse deformado localmente, pero también puede tratarse de una mala alineación general en la máquina. Los ejes de la máquina pueden deformarse por su propio peso y desalinearse en determinadas posiciones. Las guías de la máquina pueden estar desgastadas en exceso, lo que genera juego en el movimiento de los ejes.

### **Efecto**

El error de cuadratura tiene un efecto directo sobre la precisión de posicionamiento así como de la capacidad de interpolación de una máquina.

### **Medida a tomar**

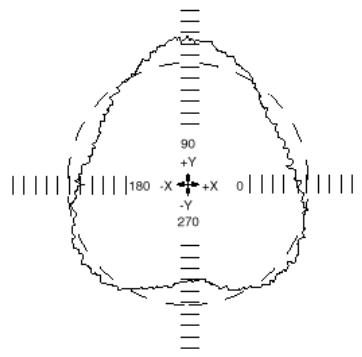
Repetir el ensayo en distintas posiciones de la máquina para averiguar si el error de cuadratura está localizado en un área de la máquina o si afecta a su totalidad. Si el error es local, la solución es buscar una zona de la máquina no afectada por el error de cuadratura para mecanizar las caras. Si el error de cuadratura afecta a toda la máquina, habrá que alinear los ejes de la máquina, y si las guías están gastadas se deberán sustituir.

## **Rectitud**

### **Trazado**

El trazado (Figura II. 3) muestra tres salientes definidos en su forma general. Éstos no se ven afectados por la velocidad de avance o la dirección, pero pueden cambiar según la zona de la mesa de la máquina donde se realiza el ensayo.

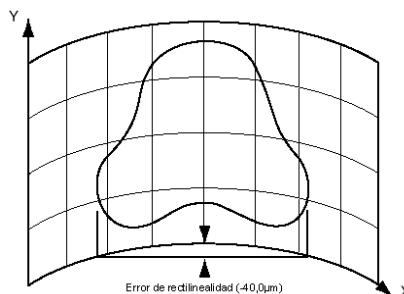
Cabe destacar que al realizar ensayos de arco parcial, no se muestran los errores de rectitud.



**Figura II. 3:** Trazado de la rectitud

### **Valores de diagnóstico**

La rectitud se expresa en micrómetros tanto en el eje X como en el eje Y. El software la valora comprobando la diferencia que existe entre el arco pico a valle del eje sobre la longitud equivalente al diámetro del ensayo de Ballbar (Figura II. 4).



**Figura II. 4:** Ejemplo de error de rectitud en el eje X

### **Causa**

El error de rectitud es provocado por una falta de rectitud en las guías de la máquina. Las guías pueden haberse deformado localmente, pero también puede tratarse de una mala alineación general en la máquina.

### **Efecto**

El error de rectitud tiene como efecto una falta de precisión en las piezas mecanizadas y la capacidad de contorneado de una máquina.

### **Medida a tomar**

Comprobar si hay suciedad o desgaste en la copa de herramienta o si se han aflojado las juntas del Ballbar. En caso afirmativo, es probable que la máquina no tenga errores de rectitud, y que se trate de un error de ensayo Trilobular. En caso negativo, para solucionar el error de rectitud habrá que ajustar, reparar o sustituir las guías de la máquina.

## Error cílico

### Trazado

El trazado tiene un error cílico sinusoidal, cuya frecuencia y amplitud varían alrededor del trazado. En este trazado (Figura II. 5), el error cílico se muestra sólo en el eje Y.

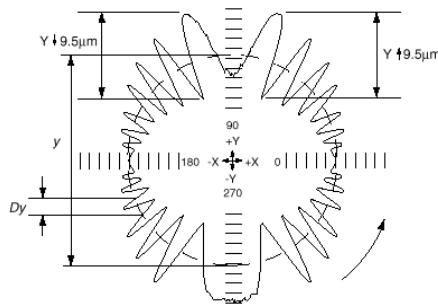


Figura II. 5: Trazado de error cílico en el eje Y

### Valores de diagnóstico

El error cílico se expresa en micrómetros. Tanto en el eje X como en el eje Y se expresa el valor con dos cifras, la primera ( $\uparrow$ ) indica movimiento de avance e incrementa su posición positivamente; la segunda ( $\downarrow$ ) indica movimiento de retroceso y reduce su posición positivamente

Esta técnica de medición es necesaria, ya que un error cílico no siempre afecta a todo el trazado, por tanto, es necesario especificar su ubicación en el mismo.

Un diagnóstico correcto del error depende de la velocidad de avance, principalmente cuando el fallo está en el contrapeso. Si puede identificar un elemento de error de velocidad en un diagnóstico de errores cílicos, entonces el diagnóstico puede ser incorrecto.

### Causa

Que el husillo de un eje tenga un problema de error cílico, puede deberse a varios motivos:

- La rosca del husillo del eje está 'mareada' y mueve el eje de forma sinusoidal en vez de a un ritmo uniforme.
- Las juntas del encoder pueden ser excéntricas.
- Las juntas del husillo pueden ser excéntricas.
- Resolvers o Inductosyns estén mal ajustados.

Si la causa es el husillo del eje, no se ve afectada la dirección del trazado. Los trazados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario serán similares, si no idénticos.

Si el error cílico se produce en el eje vertical en una dirección sólo cuando el eje está subiendo o bajando, es probable que se trate de un fallo del mecanismo de contrapeso de la máquina. Si la causa es un contrapeso defectuoso, se verá afectada la dirección del trazado, por consiguiente, los trazados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario serán distintos. Normalmente, el contrapeso produce un error cílico cuando la máquina se mueve de abajo arriba. A continuación se muestran los trazados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario de un error cílico provocado por un fallo del contrapeso.

El problema de contrapeso se muestra claramente, ya que sólo una mitad de cada trazado exhibe un error cílico.

### Efecto

El efecto de cualquier tipo de error cíclico es la presencia de errores dimensionales en las piezas mecanizadas.

### Medida a tomar

Si la causa del error cíclico es el husillo, ajustar el montaje del husillo o el encoder para corregir el error.

Si la causa del error cíclico es el mecanismo de contrapeso de la máquina, ajustar el mecanismo de contrapeso para corregir el error.

## Errores de ejecución

### Holgura

#### Trazado

El trazado (Figura II. 6) muestra uno o varios pasos hacia afuera partiendo de un eje. Normalmente, el tamaño de un paso no se ve afectado por la velocidad de avance de la máquina.

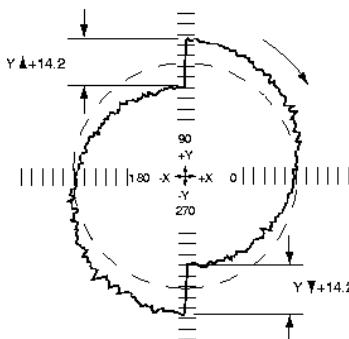


Figura II. 6: Trazado con holgura positiva en eje Y

#### Valores de diagnóstico

La holgura es un tipo de error radial y se expresa en micrómetros con dos valores para cada eje, un valor corresponde a la dirección positiva del eje, y el otro a la dirección negativa.

En caso de que el valor sea positivo, el trazado presenta holgura positiva o una pérdida de moción. Si el valor es negativo, el trazado presenta holgura negativa o una pérdida de moción.

### Causa

Existen tres causas posibles para este tipo de error:

- El sistema motor de la máquina tiene juego. Esto se debe a una flotación de los cojinetes del husillo de avance o a una tuerca gastada.
- Las guías de la máquina tienen juego y provocan una parada al cambiar la dirección de la máquina.
- El husillo está rebobinado debido a un exceso de tensión, fallo que da como resultado un error de holgura desigual. Este tipo de holgura es habitual en ensayos con movimiento vertical, debido a los efectos del contrapeso.

### Efecto

Una máquina con holgura positiva, muestra un plano corto en la trayectoria del mecanizado interpolado circular. Si la holgura es negativa, la máquina muestra un salto hacia adentro en la trayectoria del mecanizado interpolado circular.

En caso de que presente holgura desigual, las piezas son mecanizadas con poca precisión y presentan cambios de magnitud en función de la posición sobre el eje.

### Medida a tomar

Eliminar el juego del sistema motor y las guías de la máquina, o usar un controlador de compensación de holgura para subsanar los errores generados por el juego en el accionamiento. La capacidad del control para corregir el efecto de este juego depende del tiempo de respuesta del servo, el avance y el radio del ensayo.

### Juego lateral

#### Trazado

El trazado (Figura II. 7) representa la forma de un melocotón o una piedra simétrica. Este trazado no se ve afectado por la velocidad de avance de la máquina, sin embargo, sí lo hace por el sentido de giro. Cuando se muestran simultáneamente los gráficos de los sentidos horario y antihorario, aparece uno dentro del otro.

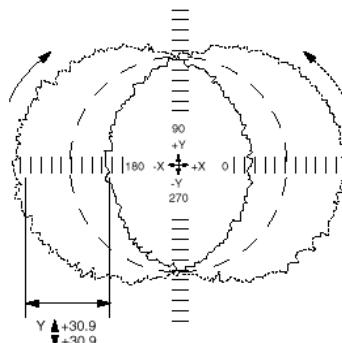


Figura II. 7: Trazado con juego lateral positivo en el eje Y

#### Valores de diagnóstico

El juego lateral es un error tangencial y se expresa en micrómetros con dos valores para cada eje, un valor corresponde a la dirección positiva del eje, y el otro a la dirección negativa. Si en un mismo eje, ambos valores son iguales, el trazado presenta un juego lateral igual, pero si el valor difiere el trazado presenta un juego lateral desigual.

#### Causa

La causa principal del juego lateral es el juego o la inclinación de las guías de la máquina. Esto permite que los ejes de la máquina se muevan con los ángulos correctos hacia las guías durante el retroceso. Debe contrastarse con el paso de holgura, que también es causado por el juego, pero en línea con el eje.

#### Efecto

La consecuencia del juego lateral es la obtención de piezas con agujeros interpolados no circulares. Por otro lado, la máquina presenta errores de posicionamiento general en los ejes afectados por el juego lateral.

### **Medida a tomar**

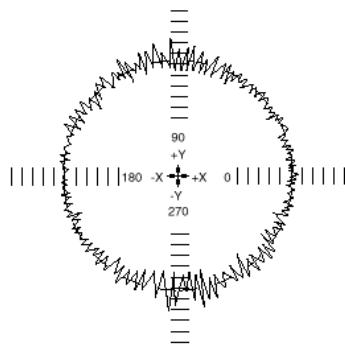
Revisar y ajustar (o cambiar) las guías de la máquina para eliminar cualquier juego o inclinación.

## **Errores dinámicos**

### **Vibración de la máquina**

#### **Trazado**

El trazado (Figura II. 8) presenta interferencias o distibución irregular. El aumento de las interferencias llega a su nivel máximo cuando la dirección de la vibración está alineada con el Ballbar durante la captura de datos. La amplitud varía alrededor del círculo. Al variar la velocidad, se altera la frecuencia cíclica en un trazado de vibración de la máquina, pero no cambia la frecuencia real en ciclos por segundo.



**Figura II. 8:** Trazado de vibración de la máquina

La vibración de la máquina no es valorada por el software.

#### **Causa**

La vibración puede ser provocada por la propia máquina (por el tren de transmisión, una función del bucle del servo o unos rodillos dañados), o ser inducida por el entorno (vibraciones del suelo).

#### **Efecto**

El principal efecto de la vibración de la máquina es un acabado imperfecto de las piezas mecanizadas. La amplitud de la vibración de la máquina determina la baja calidad del acabado.

### **Medida a tomar**

Repetir los ensayos con la bomba de refrigerante desconectada para localizar el origen exacto de la vibración. Una vez identificado el origen de la vibración, tomar las medidas necesarias para corregir el problema, entre las que puede ser necesario sustituir componentes de la máquina.

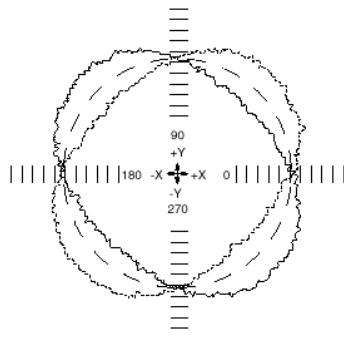
Realizar el ensayo con un interferómetro láser Renishaw y un software dinámico para evaluar el alcance de las vibraciones con más precisión.

### **Desajuste de servo**

#### **Trazado**

El trazado (Figura II. 9) tiene forma ovalada distorsionada en la diagonal a  $45^\circ$  o  $135^\circ$ . El eje de distorsión del trazado cambia al realizar ensayos en sentido horario y

antihorario. La intensidad de la distorsión aumenta a medida que aumenta la velocidad de avance.



**Figura II. 9:** Trazado del desajuste del servo

### Valores de diagnóstico

El desajuste del servo se expresa en milisegundos. Este valor es el tiempo en milisegundos en el que uno de los ejes de la máquina supera al otro. El valor puede ser positivo o negativo, dependiendo de los ejes del ensayo, y puede interpretarse como muestra la Figura II. 10.

Planos probados	Valor proporcionado por el software	Eje adelantado
XY	+ve	Y delante de X
XY	-ve	X delante de Y
ZX	+ve	X delante de Z
ZX	-ve	Z delante de X
YZ	+ve	Z delante de Y
YZ	-ve	Y delante de Z

**Figura II. 10:** Interpretación de los valores del desajuste del servo.

### Causa

El desajuste del servo se produce cuando las ganancias del bucle del servo están descompensadas. Este desajuste hace que un eje adelante al otro generando un trazado con forma oval. El eje adelantado es el que tiene la ganancia de bucle más alta.

### Efecto

El efecto del desajuste del servo es la no redondez los círculos interpolados. En general, cuanta más alta sea la velocidad de avance, más ovalado será el círculo interpolado.

### Medida a tomar

Compensar las ganancias del bucle de los servos de los ejes ajustando el control de la máquina. Aumentar la ganancia del eje retrasando o reducir la ganancia del eje adelantado.

Aplicar velocidades de avance bajas para interpolar arcos y círculos de precisión, ya que los efectos del desajuste del servo son menores a baja velocidad.

## Picos en la inversión

### Trazado

El trazado (Figura II. 11) presenta un pico corto que empieza en un eje. La amplitud del pico varía con la velocidad de avance de la máquina.

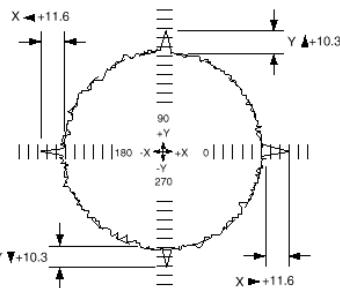


Figura II. 11: Trazado de picos en la inversión

### Valores de diagnóstico

Los picos de inversión se expresan en micrómetros, con dos valores para cada eje, un valor corresponde a la dirección positiva del eje, y el otro a la dirección negativa.

### Causa

Cuando un eje se dirige en una dirección y, a continuación, tiene que retroceder y moverse en la dirección contraria, en vez de moverse suavemente, puede hacer una ligera pausa en el punto de operación. Hay varias causas posibles:

- El motor del eje ha aplicado una fuerza excesiva sobre el eje en el punto de inversión haciendo que se bloquee ligeramente en el punto de inversión, al cambiar de dirección las fuerzas de fricción.
- El tiempo de respuesta del servo de la máquina no es adecuado en la compensación de holgura. Esto significa que la máquina no puede compensar la holgura a tiempo, haciendo que el eje se detenga mientras se compensa el espacio provocado por la holgura.
- La respuesta del servo en el punto cruzado es insuficiente y provoca un leve retraso entre el movimiento de parada del eje en una dirección y el inicio del movimiento en la otra.

### Efecto

El efecto de un pico en inversión es que la trayectoria de un mecanizado interpolado circular muestra un pequeño plano seguido de un salto de recuperación hacia adentro.

### Medida a tomar

Si el control de la máquina permite eliminar los picos, usar esta función para limitar los efectos de los picos en inversión al utilizar la máquina.

Tratar de encontrar una velocidad de avance en la máquina en la que se han minimizado los efectos de los picos en inversión realizando una serie de ensayos a distintas velocidades. Utilizar la mejor velocidad detectada para los cortes de acabado durante la interpolación circular.

## Anexo III

### Guía rápida de fresadora KONDIA B500 con control FAGOR 8055.

Esta guía rápida refleja los pasos principales que se han seguido para la toma de los datos correspondientes a este TFG, por ello se debe tomar como una guía y no como un manual específico. Se recomienda leer la guía rápida de Ballbar , incluida al final de este anexo, para familiarizarse con los nombres de cada una de las partes y para tener conocimiento de los pasos que hay que seguir para colocar correctamente todos los componentes en la máquina.

#### INICIO

Para comenzar a usar la fresadora KONDIA modelo B500, hay que seguir los siguientes pasos:

- 1) Abrir la válvula roja (Figura III. 1), situada en la pared posterior, para dar paso al aire.

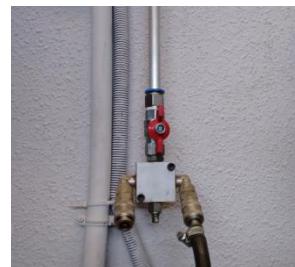


Figura III. 1: Válvula de aire

- 2) Encender la fresadora del interruptor general (Figura III. 2) para dar paso a la corriente.



Figura III. 2: Interruptor general fresadora ANAYAK

- 3) Sacar la seta (Figura III. 3).

- 4) Girar el botón de marcha (Figura III. 3).
- 5) Encender la luz (Figura III. 3).
- 6) Para introducir el portaherramientas, se pulsa el botón para abrir, se introduce el portaherramientas y se suelta el botón para cerrar (Figura III. 3).



Figura III. 3: Cuadro de mando inferior fresadora KONDIA

Una vez se ha finalizado el trabajo con la fresadora, para desconectarla hay que seguir los mismos pasos a la inversa.

### **CUADRO DE MANDO**

Antes de introducir un programa, hay que conocer el cuadro de mando con el que se va a trabajar. En este caso, la fresadora KONDIA utiliza un control FAGOR 8055 (Figura III. 4). En la mesa de trabajo se puede encontrar el manual completo de este control. No obstante, a continuación se incluye una introducción rápida de los principales teclados y comandos con los que cuenta el cuadro de mando.

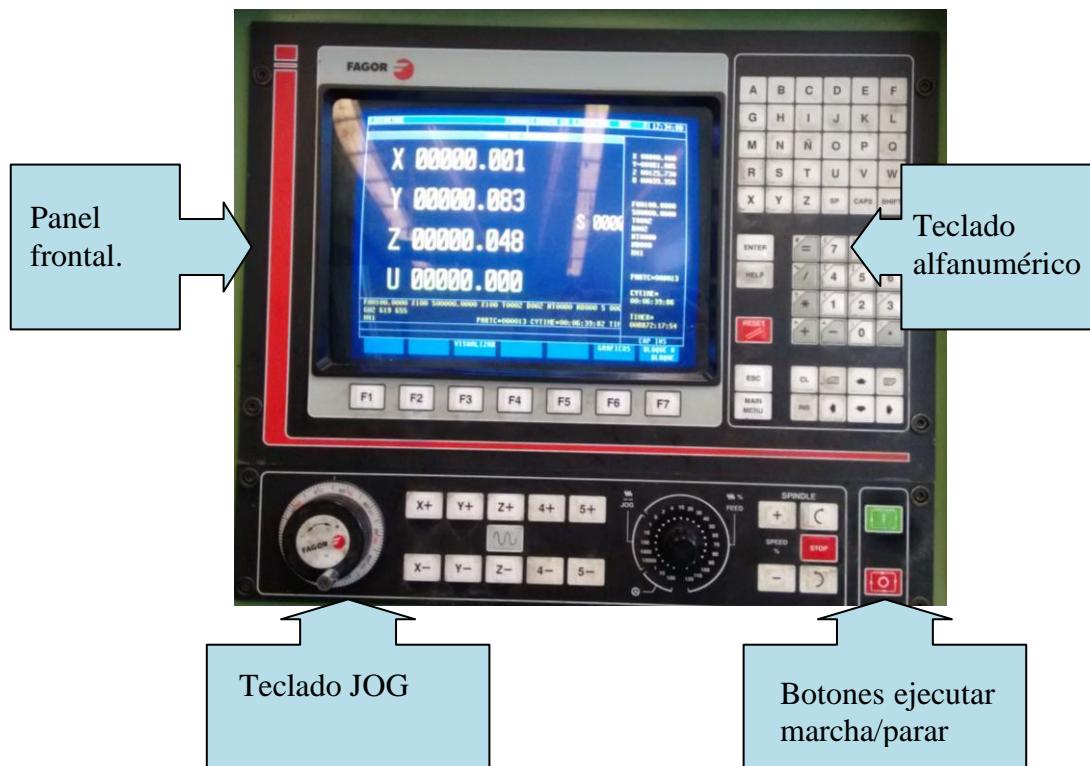


Figura III. 4: Cuadro de mando fresadora KONDIA

## TECLADO JOG

El teclado JOG está compuesto por una serie de botones, una ruleta y un volante electrónico con los que se puede desplazar los ejes de la máquina, gobernar el cabezal, modificar el avance de los ejes y la velocidad del cabezal, y comenzar y detener la ejecución.

El avance se puede controlar mediante un volante, manualmente (JOG) o automáticamente (FEED). En la ruleta del avance se pueden ver estas tres opciones. Si se selecciona la opción “Volante”, el avance se llevará a cabo mediante la acción del volante colocado a la izquierda, a una velocidad de décimas, centésimas o milésimas de milímetro. Si se desea hacerlo manualmente (JOG), se usarán los botones de los ejes X+, Y+, Z+, X-, Y-, Z-. Por último, si se desea un avance programado, habrá que colocar la ruleta en la zona FEED, seleccionando adecuadamente el porcentaje de la velocidad programada a la que se desea realizar la operación.

Se debe tener en cuenta que el botón verde, que sirve para comenzar la ejecución, también se usa como “enter” cada vez que se trabaje en la pantalla “manual”.

## PANEL FRONTAL

Desde el menú principal (Figura III. 5), y con los botones F1, F2...F7, se puede acceder a las diferentes pantallas disponibles para ejecutar un programa, simular el programa deseado, editar/crear un programa, acceder a tablas...

Para volver desde cualquier pantalla a la pantalla inicial hay que pulsar el botón “main menu” situado en el teclado alfanumérico.

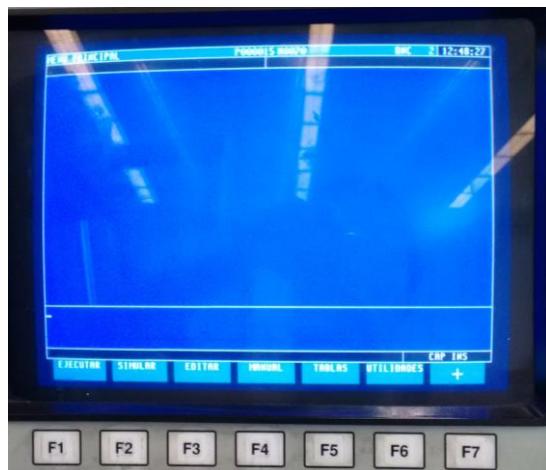


Figura III. 5: Menú principal fresadora KONDIA

## TECLADO ALFANUMÉRICO

El teclado alfanumérico se usa para introducir todos los códigos y comandos para programar el CNC; las flechas sirven para moverse a lo largo del programa o entre las diferentes opciones de las pantallas del menú; el botón “CL” sirve para borrar ; el botón “reset” sirve para resetear el programa una vez se está ejecutando. Como comando rápido para ver las coordenadas de origen de la máquina, se debe pulsar “shift” + “página” (situada encima de la flecha “derecha”).

## **ESPECIFICACIONES**

A continuación se detallan los pasos que se han seguido para la correcta ejecución de los ensayos.

### **POSICIONAMIENTO Y REFERENCIA**

Antes de colocar la base magnética del Ballbar se debe tener en cuenta la longitud del Ballbar, que será en radio del ensayo, y los límites de carrera de la mesa en el eje X ,en el eje Y y en el eje Z, que son 1400 mm, 700 mm y 600 mm respectivamente

Se fija la mordaza en la posición deseada con ayuda de la llave y se coloca el montaje central magnético (Figura III. 6).



**Figura III. 6:** Montaje central magnético de precisión.

Una vez posicionado el montaje, hay que establecer la posición de la bola de reglaje como el cero de referencia. Para llevar la máquina hasta él hay que ir jugando con el teclado JOG. Se recomienda llevar la máquina a bajas velocidades para evitar un choque con la bola.

Para guardar nuestro cero de referencia, primero tenemos que comprobar dónde tiene su cero de referencia la máquina. Para comprobalo, podemos pulsar “shift” + “página”, como se indica en párrafos anteriores, o bien ir a la ventana “MDI”, escribir G53 y pulsar el botón verde del teclado JOG. Una vez conocida esta posición, hay que ir a “main manu – tablas – orígenes” y elegir un origen. En este TFG se ha elegido el origen G55. Se selecciona el origen deseado y se modifican las coordenadas escribiendo las de nuestro cero.

### **INTRODUCIR/MODIFICAR UN PROGRAMA**

Se debe tener en cuenta que para los ensayos de circularidad, el control FAGOR 8055 usa la letra Q como comando para el ángulo.

Desde el menú principal se va a la pantalla editar (Figura III. 7). Si se desea modificar un programa existente, se introduce el número del programa y se pulsa enter. Para crear un programa nuevo, se introduce un número de programa inexistente, se pulsa F2 para introducir el nombre de programa, por ejemplo “Ballbar XY”, y se sigue la secuencia “fin de texto – editar – lenguaje CNC”. Para finalizar, se escribe el programa deseado y se guarda.

MENÚ PRINCIPAL		P000015 R0079	DNC	Z	12:48:35
PROGRAMA	COMENTARIO	TIEMPO	FECHA	HORA	ESTRUCTURA
P000001	<>	000080	16/06/15	12:22:26	-RX
P000002	<>	000180	28/05/15	10:33:12	-RX
P000003	<>	000082	28/05/15	10:43:29	-RX
P000004	<>	000311	08/06/15	18:32:31	-RX
P000005	<>	000117	16/06/15	08:50:57	-RX
P000010	<BALLBAR XY>	000171	30/06/15	10:01:12	-RX
P000011	<BALLBAR XZ>	000130	01/07/15	11:00:25	-RX
P000014	<LTF>	000435	01/07/15	11:27:13	-RX
P000015	<BALLBAR YZ>	000130	01/07/15	12:27:00	-RX
P000019	<LTF>	000402	22/06/15	08:08:04	-RX
P000020	<>	000093	22/06/15	08:14:53	-RX
P000063	<TRABORADO S.S.>	000415	05/01/15	12:50:37	-RX
P000120	<INTEGRAL >	000200	19/02/15	11:38:52	-RX
P000121	<INT J EXTRILLA>	000048	19/03/15	07:30:11	-RX
P000123	<VRH105 2>	000060	25/06/15	09:55:45	-RX
P000124	<VRH105 2>	000089	23/06/15	08:54:45	-RX
P000126	<VRH105 3>	000125	11/06/15	07:52:50	-RX
P000127	<VRH105 5>	000102	11/06/15	08:53:48	-RX
P000150	<HEF-PLM-CRT>	000145	11/03/15	12:26:51	-RX

24 programas, 063048bytes libres

EDITAR F...

CAP INS  
número

Figura III. 7: Pantalla de edición de un programa

### COMENZAR CON EL ENSAYO

El primer paso es llamar al cero de referencia que se ha creado previamente, en este caso G55 (main menu – manual – MDI – G55 – botón verde).

Si se desea ver el recorrido que seguirá el programa, existe la opción “Simulación”, accesible desde el menú principal, desde el cual se puede ver la simulación en el plano de trabajo deseado. No obstante, se recomienda realizar un ensayo en vacío antes de colocar el Ballbar.

Una vez colocado el Ballbar, se puede comenzar con la toma de datos ejecutando el programa desde el menú principal, seleccionando el programa y pulsando el botón verde para ejecutar. Durante la ejecución (Figura III. 8) se puede ver el programa, la posición actual de los ejes, la posición a la que tienen que llegar y lo que le resta para llegar a esa posición.

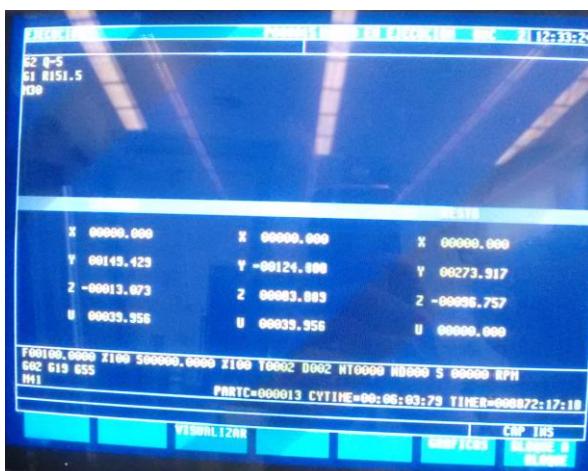


Figura III. 8: Pantalla que muestra la ejecución de un programa.

Si se desea visualizar el error de seguimiento, se puede acceder desde el menú inferior “visualizar – error de seguimiento”.

# Guía rápida de fresadora ANAYAK VH1800 con control FAGOR 8025-MS.

Esta guía rápida refleja los pasos principales que se han seguido para la toma de los datos correspondientes a este TFG, por ello se debe tomar como una guía y no como un manual específico. Se recomienda leer la guía rápida de Ballbar, incluida al final de este anexo, para familiarizarse con los nombres de cada una de las partes y para tener conocimiento de los pasos que hay que seguir para colocar correctamente todos los componentes en la máquina.

## INICIO

Para comenzar a usar la fresadora ANAYAK modelo VH1800, hay que seguir los siguientes pasos:

- 1) Encender la fresadora del interruptor general, situado en la parte derecha de la máquina, para permitir el paso de la corriente.
- 2) Sacar la seta (Figura III. 9).
- 3) Pulsar el botón de marcha general (Figura III. 9).
- 4) Introducir el portaherramientas. Para ello se debe pulsar el botón “soltar”, introducir el portaherramientas y pulsar el botón “amarra” (Figura III. 9).

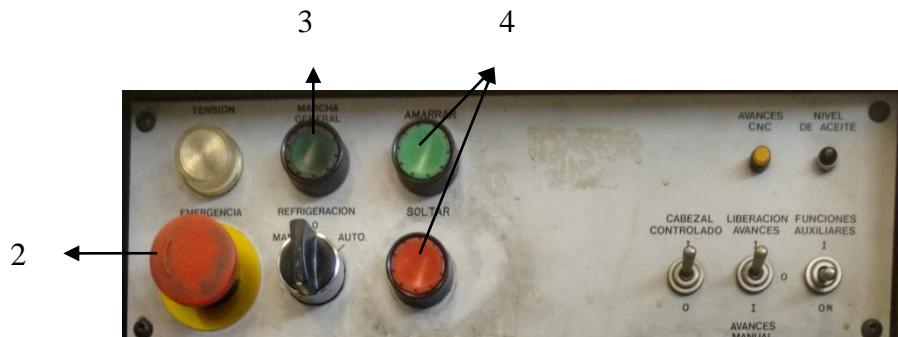


Figura III. 9: Cuadro de mando superior fresadora ANAYAK

## CUADRO DE MANDO

Antes de introducir un programa, hay que conocer el cuadro de mando con el que se va a trabajar. En este caso, la fresadora ANAYAK utiliza un control FAGOR 8025-MS (Figura III. 10). En la mesa de trabajo se puede encontrar el manual completo de este control. No obstante, a continuación se incluye una introducción rápida de los principales teclados y comandos con los que cuenta el cuadro de mando y que han sido usados en este TFG. En este caso no se hace hincapié en las funciones específicas del teclado alfanumérico y el teclado JOG, ya que son las mismas que en el control FAGOR 8055 explicado anteriormente.



**Figura III. 10:** Cuadro de mando fresadora ANAYAK

En este cuadro de mando, la diferencia principal se establece en el panel frontal, que incluye los botones “Op Mode”, cuya función es acceder al menú principal y que permite moverse entre los diferentes modos de operación; “Delete”, “Reset” y “Enter”, que poseen su función usual; “Recall”, usado para hacer llamamientos a las diferentes líneas del programa.



**Figura III. 11:** Modos de operación de la fresadora ANAYAK

Los modos de operación (Figura III. 11) con los que cuenta el control FAGOR 8025-MS y que se han usado en este TFG son el Modo Automático, para ejecutar el programa completo; el Modo Bloque a Bloque, para ejecutar el programa por líneas; Modo Vacío, para probar el programa antes de colocar al Ballbar y comprobar si hay algún error en su trayectoria; Modo Manual, para colocar el portaherramientas en la posición deseada con la ayuda del teclado JOG; Modo Editor, para introducir ó editar los programas utilizados.

## **ESPECIFICACIONES**

A continuación se detallan los pasos que se han seguido para la correcta ejecución de los ensayos.

### **POSICIONAMIENTO Y REFERENCIA**

Antes de colocar el montaje central magnético del Ballbar se debe tener en cuenta la longitud del Ballbar, que será en radio del ensayo, y los límites de carrera de la mesa en el eje X ,en el eje Y y en el eje Z, que son 1400 mm, 700 mm y 600 mm respectivamente. Una vez calculado dónde se tiene que colocar la base magnética de Ballbar (Figura III. 12) para evitar que durante el ensayo se salga de carrera, se procede a hacer cero de máquina en esa posición. Para ello, desde el menú principal, modo manual, se lleva el portaherramientas con el casquillo magnético hasta la bola de reglaje de la base usando el teclado JOG. Una vez posicionado, se escribe en el teclado numérico la secuencia: “X0 – enter – Y0 – enter – Z0 – enter”, para guardar el nuevo cero de la máquina.



**Figura III. 12:** Posicionamiento del montaje central magnético.

### **INTRODUCIR/MODIFICAR UN PROGRAMA**

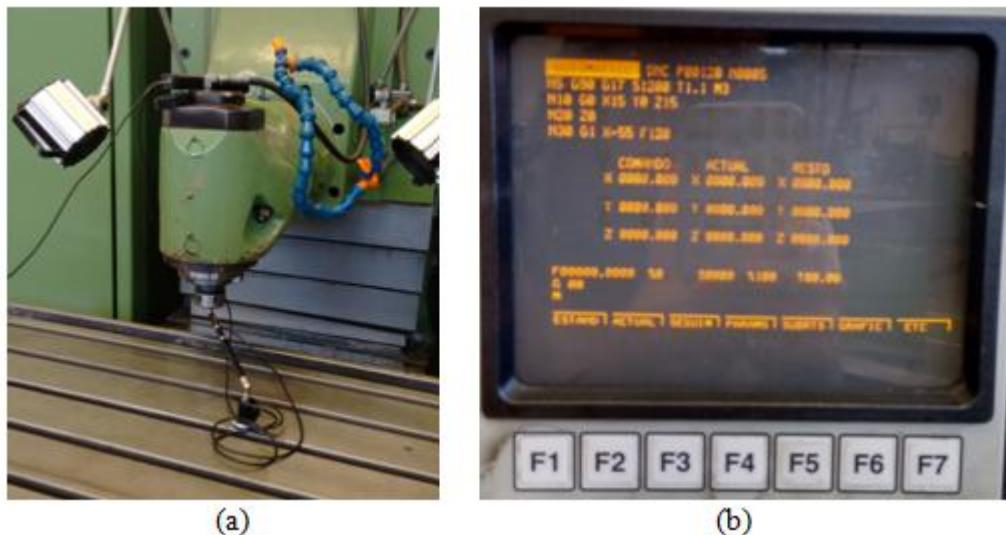
Desde el Menú principal, se accede al Modo Editar (Figura III. 13) desde el que se puede seleccionar un programa, introducir uno nuevo, crear subprogramas o renombrar algún programa existente usando los botones F1...F7. Los programas correspondientes a esta fresadora se incluyen al final de este anexo en la guía rápida de Ballbar,



**Figura III. 13:** Modo editar de la fresadora ANAYAK

## COMENZAR CON EL ENSAYO

Realizar un ensayo en vacío desde Modo Vacío para comprobar que no hay ningún error y colocar el Ballbar en la instalación (Figura III. 14, a). Si se desea comenzar con el ensayo, ir a Modo Automático (Figura III. 14, b), en el Menú principal, y seleccionar el número de programa deseado pulsado en el teclado numérico “P - número del programa – Recall”.



**Figura III. 14:** (a) Ballbar en la fresadora ANAYAK; (b) Modo automático de la fresadora ANAYAK

Para llamar a una línea específica, en este caso la primera línea que nos permite comenzar el ensayo, se introduce la secuencia “N0-Recall-Ejecutar marcha”.

Terminado el ensayo, se puede reiniciar pulsando la secuencia anterior o se procede a apagar la máquina pulsando la seta y quitando la corriente del interruptor general.

# Guía rápida de torno PINACHO S94C180 con control FAGOR 800TGI.

Esta guía rápida refleja los pasos principales que se han seguido para la toma de los datos correspondientes a este TFG, por ello se debe tomar como una guía y no como un manual específico. Se recomienda leer la guía rápida de Ballbar, incluida al final de este anexo, para familiarizarse con los nombres de cada una de las partes y para tener conocimiento de los pasos que hay que seguir para colocar correctamente todos los componentes en la máquina.

## INICIO

El torno PINACHO modelo S94C180 se pone en marcha girando el interruptor general que se encuentra en la parte trasera del torno y que permite el paso de la corriente.

## CUADRO DE MANDO

Antes de introducir un programa, hay que conocer el cuadro de mando con el que se va a trabajar. En este caso, la el torno PINACHO utiliza un control FAGOR 800TGI (Figura III. 15). En la mesa de trabajo se puede encontrar el manual completo de este control. No obstante, a continuación se incluye una introducción rápida de los principales teclados y comandos con los que cuenta el cuadro de mando y que han sido utilizados en este TFG. En este caso no se hace hincapié en las funciones específicas del teclado alfanumérico y el teclado JOG, ya que son las mismas que en el control FAGOR 8025MS explicado anteriormente. En este control, los volantes electrónicos para el control del avance se sitúan en el lado frontal del control (Figura III. 16).

La única diferencia con respecto a los controles anteriores es la presencia de un teclado CNC que incluye las principales operaciones que se usan en la programación del mecanizado de piezas.

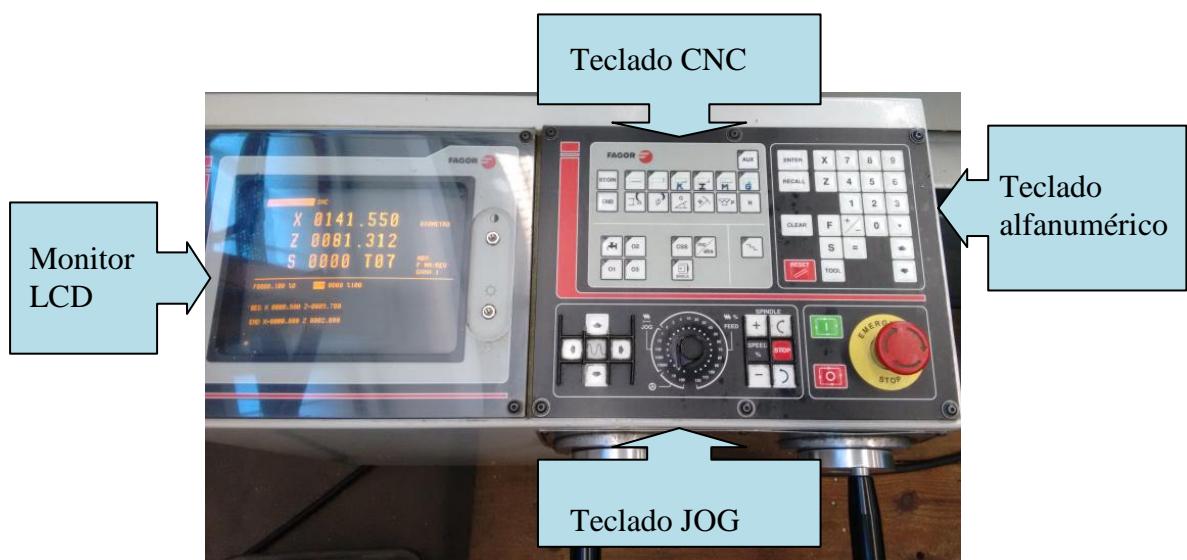


Figura III. 15: Cuadro de mando de torno PINACHO:



**Figura III. 16:** Volantes electrónicos del torno PINACHO

En este control, se accede al menú principal (Figura III. 17) pulsando el botón AUX que se encuentra en el teclado CNC. Desde este menú, se puede cambiar el sistema métrico, seleccionar un tipo de herramienta o configurar una nueva y acceder a los Modos Auxiliares para introducir o editar programas.



**Figura III. 17:** Menú principal de torno PINACHO

## ESPECIFICACIONES

A continuación se detallan los pasos que se han seguido para la correcta ejecución de los ensayos.

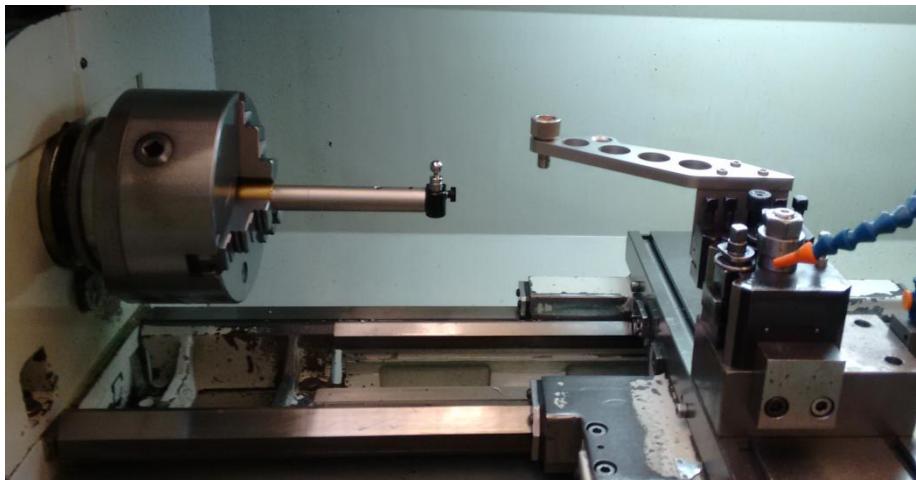
En este ensayo, se debe utilizar un kit adaptador para tornos que posee la casa Renishaw. Este kit incluye un brazo adaptador para tornos, una barra cilíndrica para el husillo, un adaptador esférico con copa central magnética y un tornillo de copa con copa central magnética.

Se recomienda la ayuda de uno de los operarios del taller para colocar los diferentes elementos de este ensayo.

## POSICIONAMIENTO Y REFERENCIA

Antes de colocar la barra cilíndrica, que contiene la bola de reglaje, en el plato del husillo, se debe tener en cuenta la longitud del Ballbar, que será en radio del ensayo, el límite de carrera del eje Z, igual 1000mm, y el diámetro máximo de volteo, igual a 350mm.

Clocada la barra cilíndrica en el husillo, se procede a colocar el brazo adaptador para tornos y el tornillo de copa con copa magnética en el carro portaherramienta (Figura III. 18).

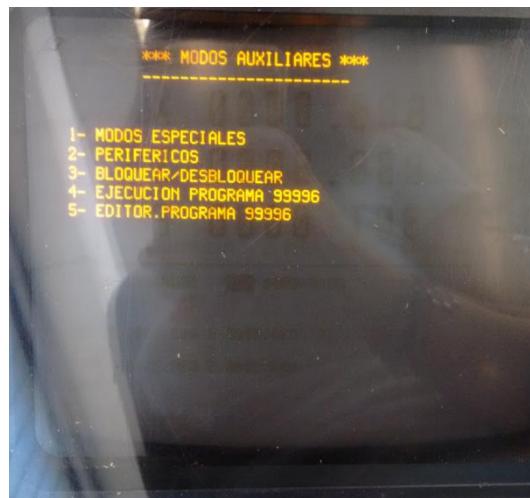


**Figura III. 18:** Elementos del kit para tornos posicionados en el torno PINACHO

Como se hace en los ensayos con las fresadoras, hay que colocar el tornillo con la copa magnética encima de la bola de reglaje y hacer cero en esa posición, lo que se consigue usando el volante electrónico del teclado JOG. Una vez posicionado, se escribe en el teclado numérico la secuencia: “X0 – enter – Y0 – enter – Z0 – enter”, para guardar el nuevo cero de la máquina

#### INTRODUCIR/MODIFICAR UN PROGRAMA

Desde el Menú Principal, se accede a los Modos Auxiliares (Figura III. 19). Una de las características de este tipo de control, es que sólo se puede almacenar un programa, el 99996. Desde este modo se puede bloquear/desbloquear el programa que se está ejecutando, ejecutar el programa o editar el programa actual.



**Figura III. 19:** Modos auxiliares del torno PINACHO

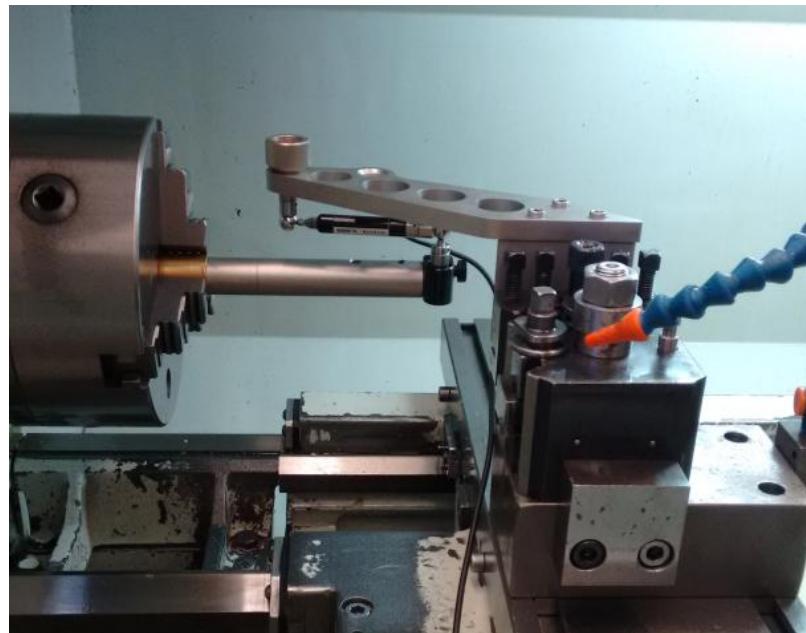
Gracias al teclado CNC que posee este control, la edición del programa se ve facilitada.

El final de este documento, se incluye en la Guía rápida de Ballbar el programa usado en este TFG para el plano XZ.

#### COMENZAR CON EL ENSAYO

Se recomienda realizar un ensayo en vacío para comprobar que no hay ningún error y colocar el Ballbar en la instalación (Figura III. 20). Si se desea comenzar con el

ensayo, ir a Modos auxiliares desde el Menú principal, y seleccionar “ejecución programa 99996”. Si se ha editado el programa ó el programa se encuentra en otra línea que no es la inicial, se debe pulsar en el teclado numérico la secuencia N0-Recall para situarse al comienzo del programa y poder comenzar con el ensayo.



**Figura III. 20:** Ballbar en el torno PINACHO

# Guía rápida de Ballbar.

## Posicionar el montaje central en la máquina

Encender la MH en la que se va a hacer el ensayo.

- 1) Colocar la copa magnética del husillo en un portaherramientas adecuado.
  - a. El portaherramientas tiene que tener una pinza adecuada para la correcta sujeción de la copa magnética.
  - b. Presionar ligeramente el portaherramientas contra la pinza para que la copa quede bien ajustada.
- 2) Colocar el portaherramientas en el husillo.
- 3) Desplazar el husillo hasta las coordenadas en las que se va a ubicar el montaje central.
  - a. La copa del husillo debe posicionarse de manera que esté a 65mm aprox. por encima del punto en la bancada de la máquina en el que se va a colocar el montaje central.
- 4) Deslizar el montaje central debajo de la copa del husillo.
  - a. Alinear visualmente el montaje central hasta que esté directamente debajo de la copa del husillo.
  - b. Se debe tener en cuenta que la alineación no ha de ser precisa, se toleran pequeñas desviaciones.
- 5) Levantar la articulación de la bola del montaje central para que se fije la bola de reglaje a la copa magnética del husillo. Se recomienda hacer este proceso con la mano y no utilizar ningún tipo de herramienta, ya que se podría lastimar alguno de los componentes.
- 6) Definir la posición actual del husillo como origen (punto cero) de los ejes de la máquina (X,Y,Z).
- 7) Desplazar el husillo hacia el punto de inicio del ensayo. Esto minimizará el peligro de colisión entre la copa magnética y el montaje central cuando el programa de piezas mueva la máquina al punto de inicio del ensayo.
  - a. Se recomienda confirmar el sentido en el que se moverá la máquina antes de ponerla en marcha para evitar dañar los elementos.

## Programas de los ensayos.

Para poder realizar los ensayos se necesita programar la trayectoria que seguirá el Ballbar. La programación CNC se debe introducir en el control de la MH, bien desde un ordenador o bien manualmente.

Cabe destacar que, aunque en este TFG se han diseñado los programas para las diferentes MH, el software Renishaw cuenta con un Generador de programas automáticos.

A continuación se incluyen programas empleados para la toma de datos en este TFG.

## **FRESADORA ANAYAK**

### ***PLANO XY***

N00 G0 X-301.5 Y0 Z0 F1000  
N10 M0  
N20 G1 X-300 Y0  
N30 G3 I300 J0  
N40 G3 I300 J0  
N50 G1 X-301.5 Y0  
N60 M0  
N70 G1 X-300 Y0  
N80 G2 I300 J0  
N90 G2 I300 J0  
N100 G1 X-301.5 Y0  
N110 M30

### ***PLANO XZ***

N0 G18  
N5 G1 Y0  
N10 G93 IO JO  
N20 G1 R301.5 A185 F1000  
N25 M0  
N30 G1 R300  
N40 G2 A-5  
N50 G1 R301.5  
N60 M0  
N70 G1 R300  
N80 G3 A185  
N90 G1 R301.5  
N100 M30

### ***PLANO YZ***

N0 G19  
N5 G1 Y0  
N10 G93 IO JO  
N20 G1 R301.5 A185 F1000 (R= radio + 1.5; F= avance)  
N25 M0  
N30 G1 R300  
N40 G2 A-5  
N50 G1 R301.5  
N60 M0  
N70 G1 R300  
N80 G3 A185  
N90 G1 R301.5  
N100 M30

## **FRESADORA KONDIA**

### ***PLANO XY***

N00 G0 X-151.5 Y0 Z0 F1000  
N10 M0  
N20 G1 X-150 Y0  
N30 G03 I150 J0  
N40 G03 I150 J0  
N50 G1 X-151.5 Y0  
N60 M0  
N70 G1 X-150 Y0  
N80 G02 I150 J0  
N90 G02 I150 J0  
N100 G1 X-151.5 Y0  
N110 M30

### ***PLANO XZ***

N0 G18  
N5 G1 Y0  
N10 G93 IO JO  
N20 G1 R511.5 Q95 F1000  
N25 M0  
N30 G1 R150  
N40 G02 Q265  
N50 G1 R151.5  
N60 M0  
N70 G1 R150  
N80 G03 Q95  
N90 G1 R151.5  
N100 M30

### ***PLANO YZ***

N0 G19  
N5 G1 Y0  
N10 G93 IO JO  
N20 G1 R151.5 Q-5 F1000  
N25 M0  
N30 G1 R150  
N40 G03 Q185  
N50 G1 R151.5  
N60 M0  
N70 G1 R150  
N80 G02 Q-5  
N90 G1 R151.5  
N100 M30

## **TORNO PINACHO**

### ***PLANO XZ***

N10 T32  
N20 G94  
N30 G93 I0 K0  
N35 G1 R101.5 A5 F1000  
N40 G1 R100 A5  
N50 G2 A175  
N60 G1 R101.5  
N65 M0  
N70 G1 R100  
N80 G3 A5  
N90 G1 R101.5  
N100 M30

Una vez se ha seleccionado el programa deseado, se ejecuta en vacío para comprobar si hay algún error.

## **Posicionar el Ballbar**

Una vez se decide el programa a ejecutar y se hace la primera prueba en vacío, hay que proceder a posicionar el Ballbar.

- 1) Elegir el radio de ensayo. El radio del Ballbar se puede modificar gracias a las barras de extensión disponibles y a la ayuda de las llaves de apriete. Éste radio debe coincidir con el radio indicado en el programa de ensayo.
- 2) Colocar el Ballbar con un extremo en la copa magnética y el otro en el montaje central magnético.
- 3) Colocar la batería del Ballbar en un apoyo magnético de la Máquina-Herramienta.
- 4) Realizar la conexión entre el Ballbar y el ordenador conectando el cable en el puerto COM.

## Anexo IV

### Tablas de resultados.

KONDIA XY R150 360º F10		
Prueba 1		
Holgura X	29,00 % → 16,40 µm ← 4,70 µm	
Juego lateral Y	1,00 % ↑ -0,60 µm ↓ 1,00 µm	
Holgura Y	15,00 % ↑ 0,30 µm ↓ 8,30 µm	
Cuadratura	16,00 % 62,20 µm/m	
Error cíclico X	4,00 % ↑ 2,30 µm ↓ 1,70 µm	
Circularidad	29,20 µm	
Juego lateral X	1,00 % → 1,10 µm ← -0,70 µm	
Picos en la inversión X	8,00 % → 4,40 µm ← 3,30 µm	
Picos en la inversión Y	2,00 % ↑ 0,10 µm ↓ 1,40 µm	
Error cíclico Y	4,00 % ↑ 2,40 µm ↓ 2,20 µm	
Otras características		
Regulación del servo	0,87 ms	
Rectitud X	-0,80 µm	
Rectitud Y	-3,60 µm	
Descompensación escalado	18,40 µm	
KONDIA XY R150 360º F10		
ISO 230-4:2005	Prueba 1	
Desviación circular		
antihorario	25,60 µm	
horario	28,90 µm	
Desv. Circ.bidireccional	30,00 µm	

Tabla IV. 1: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 10mm/min

KONDIA XY R150 360º F100			
	Media	Prueba 1	Prueba 2
<b>Holgura X</b>	29,00 % → 17,75 µm ← 5,00 µm	29,00 % 18,00 µm 5,30 µm	29,00 % 17,50 µm 4,70 µm
<b>Juego lateral Y</b>	1,00 % ↑ -0,30 µm ↓ 0,50 µm	1,00 % -0,20 µm 1,20 µm	1,00 % -0,40 µm -0,20 µm
<b>Holgura Y</b>	15,00 % ↑ 1,20 µm ↓ 9,40 µm	15,00 % 1,30 µm 9,60 µm	15,00 % 1,10 µm 9,20 µm
<b>Cuadratura</b>	14,00 % 57,85 µm/m	14,00 % 58,00 µm/m	14,00 % 57,70 µm/m
<b>Error cíclico X</b>	3,00 % ↑ 2,10 µm ↓ 1,50 µm	3,00 % 2,10 µm 1,50 µm	3,00 % 2,10 µm 1,50 µm
<b>Circularidad</b>	32,70 µm	33,20 µm	32,20 µm
<b>Juego lateral X</b>	1,50 % → -0,80 µm ← -1,50 µm	2,00 % -1,10 µm -2,50 µm	1,00 % -0,50 µm -0,50 µm
<b>Picos en la inversión X</b>	6,50 % → 4,20 µm ← 3,00 µm	6,00 % 3,80 µm 2,90 µm	7,00 % 4,60 µm 3,10 µm
<b>Picos en la inversión Y</b>	2,50 % ↑ -1,05 µm ↓ 0,80 µm	2,00 % -1,20 µm -0,40 µm	3,00 % -0,90 µm 2,00 µm
<b>Error cíclico Y</b>	4,00 % ↑ 2,30 µm ↓ 2,25 µm	4,00 % 2,30 µm 2,30 µm	4,00 % 2,30 µm 2,20 µm
<b>Otras características</b>			
Regulación del servo	-0,17 ms	-0,32 ms	-0,02 ms
Rectitud X	-1,60 µm	-1,60 µm	-1,60 µm
Rectitud Y	-3,85 µm	-3,80 µm	-3,90 µm
Descompensación escalado	21,90 µm	21,60 µm	22,20 µm
KONDIA XY R150 360º F100			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
<b>Desviación circular</b>			
antihorario	28,45 µm	28,60 µm	28,30 µm
horario	32,30 µm	31,90 µm	32,70 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	32,75 µm	33,30 µm	32,20 µm

Tabla IV. 2: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 100mm/min

KONDIA XY R150 360º F1000				
	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Holgura X</b> → ←	16,00 % 20,47 µm 7,90 µm	16,00 % 20,50 µm 8,20 µm	16,00 % 20,20 µm 7,60 µm	16,00 % 20,70 µm 7,90 µm
<b>Juego lateral Y</b> ↑ ↓	1,33 % -2,70 µm 1,80 µm	1,00 % -1,50 µm 2,50 µm	2,00 % -4,40 µm 1,10 µm	1,00 % -2,20 µm 1,80 µm
<b>Holgura Y</b> ↑ ↓	8,00 % 3,73 µm 10,17 µm	8,00 % 3,90 µm 10,50 µm	8,00 % 3,50 µm 9,80 µm	8,00 % 3,80 µm 10,20 µm
<b>Cuadratura</b>	7,00 % 58,63 µm/m	7,00 % 58,70 µm/m	7,00 % 58,10 µm/m	7,00 % 59,10 µm/m
<b>Error cíclico X</b> ↑ ↓	3,00 % 4,00 µm 3,80 µm	3,00 % 3,70 µm 3,70 µm	3,00 % 4,20 µm 4,10 µm	3,00 % 4,10 µm 3,60 µm
<b>Circularidad</b>	65,50 µm	64,40 µm	65,60 µm	66,50 µm
<b>Juego lateral X</b> → ←	0,67 % -1,20 µm -0,10 µm	1,00 % -1,60 µm -0,80 µm	0,00 % -0,30 µm 0,70 µm	1,00 % -1,70 µm -0,20 µm
<b>Picos en la inversión X</b> → ←	29,33 % 37,80 µm 22,47 µm	30,00 % 38,60 µm 24,30 µm	29,00 % 38,00 µm 20,70 µm	29,00 % 36,80 µm 22,40 µm
<b>Picos en la inversión Y</b> ↑ ↓	20,33 % 25,93 µm 24,10 µm	20,00 % 25,50 µm 26,20 µm	21,00 % 26,50 µm 24,30 µm	20,00 % 25,80 µm 21,80 µm
<b>Error cíclico Y</b> ↑ ↓	3,33 % 4,40 µm 4,20 µm	3,00 % 4,10 µm 4,50 µm	3,00 % 4,20 µm 4,10 µm	4,00 % 4,90 µm 4,00 µm
<b>Otras características</b>				
Regulación del servo	0,00 ms	-0,02 ms	0,00 ms	0,01 ms
Rectitud X	-3,07 µm	-3,20 µm	-3,10 µm	-2,90 µm
Rectitud Y	-3,23 µm	-3,40 µm	-3,20 µm	-3,10 µm
Descompensación escalado	22,23 µm	22,80 µm	21,90 µm	22,00 µm
KONDIA XY R150 360º F1000				
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Desviación circular</b> antihorario horario	62,6 µm 64,57 µm	62,20 µm 65,10 µm	62,30 µm 64,80 µm	63,30 µm 63,80 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	65,47 µm	64,30 µm	65,60 µm	66,50 µm

Tabla IV. 3: Fresadora KONDIA, plano XY y avance 1000mm/min

KONDIA YZ R150 180º F100				
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Desviación circular</b> antihorario horario	43,85 µm 41,65 µm	42,90 µm 42,80 µm	44,80 µm 40,50 µm	
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	44,25 µm	41,50 µm	47,00 µm	

Tabla IV. 4: Fresadora KONDIA, plano YZ y avance 100mm/min

KONDIA YZ R150 180º F100				
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Desviación circular</b> antihorario horario	49,00 µm 45,17 µm	47,50 µm 44,80 µm	51,00 µm 44,30 µm	48,50 µm 46,40 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	49,10 µm	48,10 µm	49,40 µm	49,80 µm

Tabla IV. 5: Fresadora KONDIA, plano YZ y avance 1000mm/min

		KONDIA ZX R150 180° F100		
ISO 230-4:2005		Media	Prueba 1	Prueba 2
Desviación circular				
antihorario	47,25 μm	47,60 μm	46,90 μm	
horario	38,35 μm	39,30 μm	37,40 μm	
Desv. Circ.bidireccional	50,85 μm	51,10 μm	50,60 μm	

Tabla IV. 6: Fresadora KONDIA, plano ZX y avance 100mm/min

		KONDIA ZX R150 180° F1000			
ISO 230-4:2005		Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Desviación circular					
antihorario	72,50 μm	70,40 μm	73,40 μm	73,70 μm	
horario	60,64 μm	60,20 μm	60,10 μm	61,61 μm	
Desv. Circ.bidireccional	71,47 μm	71,00 μm	70,70 μm	72,72 μm	

Tabla IV. 7: Fresadora KONDIA, plano ZX y avance 1000mm/min

		ANAYAK XY R300 360° F100		
ISO 230-4:2005		Media	Prueba 1	Prueba 2
Holgura X				
→	12,00 %	12,00 %	12,00 %	
←	-22,85 μm	-23,30 μm	-22,40 μm	
Juego lateral Y				
↑	1,00 %	1,00 %	1,00 %	
↓	0,40 μm	-0,10 μm	0,90 μm	
↓	3,05 μm	3,00 μm	3,10 μm	
Holgura Y				
↑	6,50 %	6,00 %	7,00 %	
↓	-6,30 μm	-23,30 μm	10,70 μm	
↓	-2,65 μm	-18,30 μm	13,00 μm	
Cuadratura				
↑	22,50 %	23,00 %	22,00 %	
↓	143,75 μm/m	144,70 μm/m	142,80 μm/m	
Error cíclico X				
↑	7,00 %	7,00 %	7,00 %	
↓	11,00 μm	11,20 μm	10,80 μm	
↓	13,10 μm	13,00 μm	13,20 μm	
Circularidad				
	98,35 μm	98,70 μm	98,00 μm	
Juego lateral X				
→	6,00 %	6,00 %	6,00 %	
←	9,15 μm	9,20 μm	9,10 μm	
←	12,40 μm	13,00 μm	11,80 μm	
Picos en la inversión X				
→	25,00 %	25,00 %	25,00 %	
←	-48,50 μm	-48,60 μm	-48,40 μm	
←	37,25 μm	38,00 μm	36,50 μm	
Picos en la inversión Y				
↑	8,00 %	8,00 %	8,00 %	
↓	-14,75 μm	-14,90 μm	-14,60 μm	
↓	-8,35 μm	-8,40 μm	-8,30 μm	
Error cíclico Y				
↑	2,00 %	2,00 %	2,00 %	
↓	3,80 μm	3,70 μm	3,90 μm	
↓	4,50 μm	4,40 μm	4,60 μm	
Otras características				
Regulación del servo		4,67 ms	4,65 ms	4,68 ms
Rectitud X		5,55 μm	5,50 μm	5,60 μm
Rectitud Y		3,50 μm	3,40 μm	3,60 μm
Descompensación escalado		-13,10 μm	-12,00 μm	-14,20 μm
		ANAYAK XY R300 360° F100		
ISO 230-4:2005		Media	Prueba 1	Prueba 2
Desviación circular				
antihorario	97,95 μm	98,40 μm	97,50 μm	
horario	79,1 μm	78,30 μm	79,90 μm	
Desv. Circ.bidireccional	98,65 μm	99,40 μm	97,90 μm	

Tabla IV. 8: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 100mm/min

ANAYAK XY R300 360º F1000						
	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
<b>Holgura X</b>	26,00 %	26,00 %	27,00 %	26,00 %	26,00 %	26,00 %
	→ 56,40 µm	57,20 µm	54,70 µm	57,60 µm	55,80 µm	56,90 µm
	← 160,52 µm	159,40 µm	160,30 µm	159,70 µm	160,70 µm	160,60 µm
<b>Juego lateral Y</b>	18,00 %	18,00 %	17,00 %	18,00 %	18,00 %	18,00 %
	↑ 154,59 µm	154,40 µm	169,10 µm	151,40 µm	157,80 µm	151,80 µm
	↓ -209,14 µm	-202,20 µm	-197,90 µm	-208,60 µm	-208,50 µm	-209,80 µm
<b>Holgura Y</b>	14,40 %	14,00 %	15,00 %	14,00 %	14,00 %	14,00 %
	↑ 89,39 µm	86,50 µm	87,80 µm	87,40 µm	88,40 µm	88,70 µm
	↓ 81,77 µm	80,30 µm	80,40 µm	80,90 µm	80,90 µm	82,30 µm
<b>Cuadratura</b>	7,00 % µm/ 143,64 m	7,00 % µm/ 142,50 m	7,00 % µm/ 143,30 m	7,00 % µm /m	7,00 % µm/ 144,10 m	7,00 % µm/ 145,50 m
<b>Error cíclico X</b>	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %
	↑ 44,56 µm	44,20 µm	44,50 µm	44,70 µm	44,60 µm	44,60 µm
	↓ 37,54 µm	37,40 µm	37,80 µm	37,40 µm	37,90 µm	37,70 µm
<b>Circularidad</b>	974,26 µm	975,70 µm	976,80 µm	977,20 µm	975,10 µm	974,50 µm
<b>Juego lateral X</b>	5,70 %	5,00 %	4,00 %	6,00 %	5,00 %	6,00 %
	→ 31,86 µm	29,90 µm	19,30 µm	35,80 µm	28,40 µm	33,90 µm
	← 38,95 µm	36,10 µm	26,00 µm	38,80 µm	37,00 µm	41,30 µm
<b>Picos en la inversión X</b>	6,60 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	6,00 %
	→ -24,78 µm	-24,80 µm	-24,90 µm	-24,60 µm	-24,60 µm	-24,80 µm
	← -40,45 µm	-41,00 µm	-41,00 µm	-42,60 µm	-40,10 µm	-38,70 µm
<b>Picos en la inversión Y</b>	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %
	↑ 1,38 µm	-7,90 µm	4,00 µm	4,70 µm	5,20 µm	5,50 µm
	↓ 6,20 µm	5,30 µm	5,30 µm	6,20 µm	5,90 µm	6,00 µm
<b>Error cíclico Y</b>	6,70 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %
	↑ 42,81 µm	41,60 µm	41,90 µm	41,60 µm	41,60 µm	41,70 µm
	↓ 41,28 µm	41,00 µm	41,10 µm	41,70 µm	41,40 µm	41,50 µm
<b>Otras características</b>						
Regulación del servo	0,53 ms	0,54 ms	0,60 ms	0,55 ms	0,55 ms	0,52 ms
Rectitud X	16,45 µm	13,90 µm	16,30 µm	16,20 µm	16,80 µm	16,30 µm
Rectitud Y	53,70 µm	55,10 µm	54,30 µm	54,40 µm	53,10 µm	53,50 µm
Descomp. escalado	1,13 µm	8,10 µm	6,20 µm	4,40 µm	2,70 µm	1,90 µm
ANAYAK XY R300 360º F1000						
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
<b>Desviación circular</b>						
	antihorario 913,73 µm	914,60 µm	913,00 µm	913,30 µm	913,20 µm	914,50 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	horario 975,00 µm	976,40 µm	977,40 µm	977,40 µm	975,80 µm	975,30 µm
	975,26 µm	976,70 µm	977,80 µm	978,20 µm	976,10 µm	975,50 µm

Tabla IV. 9: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 1000mm/min. Parte 1

	ANAYAK XY R300 360º F1000				
	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10
<b>Holgura X</b>	25,00 %	26,00 %	26,00 %	26,00 %	26,00 %
	→ 56,50 µm	56,80 µm	56,10 µm	56,80 µm	55,60 µm
	← 160,30 µm	160,60 µm	161,30 µm	161,10 µm	161,20 µm
<b>Juego lateral Y</b>	19,00 %	18,00 %	18,00 %	18,00 %	18,00 %
	↑ 144,50 µm	146,80 µm	160,10 µm	150,80 µm	159,20 µm
	↓ -218,20 µm	-213,30 µm	-207,00 µm	-213,00 µm	-212,90 µm
<b>Holgura Y</b>	14,00 %	14,00 %	15,00 %	15,00 %	15,00 %
	↑ 89,60 µm	90,70 µm	92,10 µm	91,40 µm	91,30 µm
	↓ 82,40 µm	81,80 µm	82,10 µm	83,20 µm	83,40 µm
<b>Cuadratura</b>	7,00 % 141,60 µm/m	7,00 % 144,10 µm/m	7,00 % 144,60 µm/m	7,00 % 142,60 µm/m	7,00 % 143,40 µm/m
<b>Error cíclico X</b>	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %	7,00 %
	↑ 44,80 µm	44,20 µm	44,60 µm	44,50 µm	44,90 µm
	↓ 37,50 µm	37,30 µm	37,70 µm	37,60 µm	37,10 µm
<b>Circularidad</b>	973,40 µm	974,70 µm	974,20 µm	970,50 µm	970,50 µm
<b>Juego lateral X</b>	7,00 %	7,00 %	5,00 %	6,00 %	6,00 %
	→ 40,30 µm	37,10 µm	26,60 µm	35,10 µm	32,20 µm
	← 48,70 µm	45,30 µm	34,70 µm	43,10 µm	38,50 µm
<b>Picos en la inversión X</b>	6,00 %	6,00 %	7,00 %	6,00 %	7,00 %
	→ -24,60 µm	-24,40 µm	-26,70 µm	-24,00 µm	-24,40 µm
	← -39,20 µm	-40,30 µm	-40,70 µm	-39,60 µm	-41,30 µm
<b>Picos en la inversión Y</b>	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %
	↑ -4,40 µm	-9,20 µm	5,10 µm	5,80 µm	5,00 µm
	↓ 6,50 µm	6,30 µm	6,40 µm	7,20 µm	6,90 µm
<b>Error cíclico Y</b>	6,00 %	6,00 %	7,00 %	6,00 %	7,00 %
	↑ 41,50 µm	42,10 µm	52,40 µm	41,60 µm	42,10 µm
	↓ 41,20 µm	41,20 µm	41,30 µm	41,00 µm	41,40 µm
<b>Otras características</b>					
Regulación del servo	0,57 ms	0,52 ms	0,56 ms	0,46 ms	0,47 ms
Rectitud X	17,30 µm	16,40 µm	18,30 µm	16,40 µm	16,60 µm
Rectitud Y	53,30 µm	54,10 µm	52,60 µm	53,50 µm	53,10 µm
Descompensación escalado	2,50 µm	-1,80 µm	-4,80 µm	-3,20 µm	-4,70 µm
	ANAYAK XY R300 360º F1000				
ISO 230-4:2005	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10
<b>Desviación circular</b>					
	antihorario 912,90 µm horario 974,00 µm	913,10 µm 975,90 µm	914,30 µm 975,20 µm	914,60 µm 971,30 µm	913,80 µm 971,30 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	974,40 µm	975,70 µm	975,20 µm	971,50 µm	971,50 µm

**Tabla IV. 10:** Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 1000mm/min. Parte 2

ANAYAK XY R300 360º F3000			
	Media	Prueba 1	Prueba 2
<b>Holgura X</b>	26,00 %	26,00 %	26,00 %
	→ -813,95 µm	→ -807,70 µm	→ -820,20 µm
<b>Juego lateral Y</b>	19,50 %	19,00 %	20,00 %
	↑ 1101,80 µm	↑ 1103,20 µm	↑ 1100,40 µm
<b>Holgura Y</b>	25,00 %	25,00 %	25,00 %
	↑ -789,55 µm	↑ -783,30 µm	↑ -795,80 µm
<b>Cuadratura</b>	1,00 %	1,00 %	1,00 %
	142,50 µm/m	142,30 µm/m	142,70 µm/m
<b>Error cílico X</b>	6,00 %	6,00 %	6,00 %
	↑ 189,50 µm	↑ 190,20 µm	↑ 188,80 µm
<b>Circularidad</b>	1580,55 µm	1580,30 µm	1580,80 µm
	↓ 39,55 µm	↓ 31,80 µm	↓ 47,30 µm
<b>Picos en la inversión X</b>	8,50 %	9,00 %	8,00 %
	→ -52,40 µm	→ -99,00 µm	→ -5,80 µm
<b>Picos en la inversión Y</b>	1,00 %	1,00 %	1,00 %
	↑ -20,65 µm	↑ -25,10 µm	↑ -16,20 µm
<b>Error cílico Y</b>	5,00 %	5,00 %	5,00 %
	↑ 158,40 µm	↑ 158,20 µm	↑ 158,60 µm
<b>Otras características</b>			
Regulación del servo	-1,38 ms	-1,40 ms	-1,35 ms
Rectitud X	6,75 µm	6,10 µm	7,40 µm
Rectitud Y	86,75 µm	88,50 µm	85,00 µm
Descompensación escalado	86,50 µm	86,70 µm	86,30 µm
ANAYAK XY R300 360º F3000			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
<b>Desviación circular</b>			
	antihorario 1550,75 µm	1549,00 µm	1552,50 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	horario 1566,7 µm	1568,20 µm	1565,20 µm
	1580,2 µm	1580,00 µm	1580,40 µm

Tabla IV. 11: Fresadora ANAYAK, plano XY y avance 3000mm/min

ANAYAK YZ R300 180º F100			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
<b>Desviación circular</b>			
	antihorario 75,95 µm	69,70 µm	82,20 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	horario 48,45 µm	48,50 µm	48,40 µm
	178,20 µm	183,30 µm	173,10 µm

Tabla IV. 12: Fresadora ANAYAK, plano YZ avance y 100mm/min

ANAYAK YZ R300 180º F1000				
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Desviación circular</b>				
	antihorario 995,00 µm	994,00 µm	997,00 µm	994,00 µm
<b>Desv. Circ.bidireccional</b>	horario 976,07 µm	977,80 µm	976,70 µm	973,70 µm
	922,13 µm	918,60 µm	926,80 µm	921,00 µm

Tabla IV. 13: Fresadora ANAYAK, plano YZ y avance 1000mm/min

ANAYAK ZX R300 180º F100			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
Desviación circular			
antihorario	109,70 $\mu\text{m}$	113,50 $\mu\text{m}$	105,90 $\mu\text{m}$
horario	110,65 $\mu\text{m}$	110,40 $\mu\text{m}$	110,90 $\mu\text{m}$
Desv. Circ.bidireccional	122,40 $\mu\text{m}$	123,00 $\mu\text{m}$	121,80 $\mu\text{m}$

Tabla IV. 14: Fresadora ANAYAK, plano ZX y avance 100mm/min

ANAYAK ZX R300 180º F1000			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
Desviación circular			
antihorario	1001,30 $\mu\text{m}$	1001,80 $\mu\text{m}$	1000,80 $\mu\text{m}$
horario	1058,85 $\mu\text{m}$	1058,60 $\mu\text{m}$	1059,10 $\mu\text{m}$
Desv. Circ.bidireccional	976,00 $\mu\text{m}$	975,60 $\mu\text{m}$	976,40 $\mu\text{m}$

Tabla IV. 15: Fresadora ANAYAK, plano ZX y avance 1000mm/min

PINACHO ZX R100 180º F100			
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2
Desviación circular			
antihorario	26,1 $\mu\text{m}$	25,90 $\mu\text{m}$	26,30 $\mu\text{m}$
horario	131,4 $\mu\text{m}$	129,30 $\mu\text{m}$	133,50 $\mu\text{m}$
Desv. Circ.bidireccional	126,9 $\mu\text{m}$	126,60 $\mu\text{m}$	127,20 $\mu\text{m}$

Tabla IV. 16: Torno PINACHO, plano ZX y avance 100

PINACHO ZX R100 180º F1000						
ISO 230-4:2005	Media	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Desviación circular						
antihorario	877,12 $\mu\text{m}$	876,80 $\mu\text{m}$	875,70 $\mu\text{m}$	878,70 $\mu\text{m}$	877,00 $\mu\text{m}$	876,70 $\mu\text{m}$
horario	995,44 $\mu\text{m}$	993,40 $\mu\text{m}$	997,90 $\mu\text{m}$	993,70 $\mu\text{m}$	995,30 $\mu\text{m}$	996,50 $\mu\text{m}$
Desv. Circ.bidireccional	1088,9 $\mu\text{m}$	1088,40 $\mu\text{m}$	1089,60 $\mu\text{m}$	1087,20 $\mu\text{m}$	1088,40 $\mu\text{m}$	1090,10 $\mu\text{m}$
ISO 230-4:2005	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10	
Desviación circular						
antihorario	878,30 $\mu\text{m}$	877,90 $\mu\text{m}$	876,50 $\mu\text{m}$	876,10 $\mu\text{m}$	877,50 $\mu\text{m}$	
horario	992,10 $\mu\text{m}$	996,90 $\mu\text{m}$	997,90 $\mu\text{m}$	996,80 $\mu\text{m}$	993,90 $\mu\text{m}$	
Desv. Circ.bidireccional	1087,10 $\mu\text{m}$	1089,90 $\mu\text{m}$	1088,30 $\mu\text{m}$	1090,20 $\mu\text{m}$	1089,80 $\mu\text{m}$	

Tabla IV. 17: Torno PINACHO, plano ZX y avance 1000

# Referencias

- [1] Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza. Asignatura *Tecnologías de Fabricación, Fundamentos de los procesos para separar material. Procesos de mecanizado.* Curso 2012-13.
- [2] David Cortés Ibañez, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza, *Ensayo, calibración de palpador autocentrante y verificación geométrica de máquina.* Septiembre 2012.
- [3] Jorge Aguado Lamana. Proyecto de Fin de Carrera del Centro Politécnico Superior de Ingeniero de la Universidad de Zaragoza. *Comparación experimental de técnicas tradicionales y novedosas de verificación geométrica de máquinas – herramienta.* Junio 2010.
- [4] Aitzol Lamikiz Mentxaka. E.T.S.I. de Bilbao. *Fabricación asistida por ordenador. Control numérico.* Curso 2010-2011.
- [5] <http://www.renishaw.es/es/sistemas-de-ballbar-telescopicos--6813>
- [6] Manual de ayuda Renishaw Ballbar QC20
- [7] Standard ASME B5.54-2005. *Methods for performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers.* Apdo 7.11 y apéndice J.
- [8] Norma UNE-ISO 230-4:2008. *Máquinas – herramienta. Código de verificación de máquinas - herramienta. Parte 4: Ensayos de circularidad para máquinas – herramienta de control numérico.*
- [9] <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/24A29E634BE9DBCF862572670080A26E>
- [10] [http://fagorautomation.com/downloads/manuales/es/man\\_8055m\\_prg.pdf](http://fagorautomation.com/downloads/manuales/es/man_8055m_prg.pdf)
- [11] [http://fagorautomation.com/downloads/manuales/es/man\\_8055mc\\_opt.pdf](http://fagorautomation.com/downloads/manuales/es/man_8055mc_opt.pdf)
- [12] Sergio Aguado Jimenez. Documento con datos sobre el juego en los diferentes ejes de la fresadora ANAYAK.
- [13] American National Standard ANSI/AFBMA Std.10. *Metal Balls.* Junio 1989.  
(disponible en <http://www.shotpeener.com/library/pdf/1988001.pdf>)