

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Elaboración de procedimientos de calibración de
Máquinas Herramientas y de los patrones utilizados
para dichas calibraciones

Autor: Richard Quishpe Flores

Tutor: Jaime Domínguez Abascal

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Elaboración de procedimientos de calibración de Máquinas Herramientas y de los patrones utilizados para dichas calibraciones

Autor:

Richard Quishpe Flores

Tutor:

Jaime Domínguez Abascal

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Elaboración de procedimientos de calibración de Máquinas Herramientas y de los patrones utilizados para dichas calibraciones

Autor: Richard Quishpe Flores

Tutor: Jaime Domínguez Abascal

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer a mis tutores, Jaime Domínguez Abascal, por parte de la universidad de Sevilla y Francisco González Gómez, por parte de Centro Andaluz de Metrología. Por su paciencia y apoyo en la elaboración del presente trabajo fin de grado.

También agradecer al Centro Andaluz de Metrología el haberme dado la posibilidad de elaborar este estudio y prestarme todos los instrumentos necesarios para su ejecución.

Por último, quiero agradecer a mi familia y mi pareja por su constante apoyo y ánimo a lo largo de toda mi carrera universitaria. El camino puede ser largo y tedioso, pero con el entorno adecuado se consigue cualquier meta.

El presente trabajo está destinado a presentar diversos procedimientos de calibración geométrica para distintas máquinas herramienta según sus finalidades, en colaboración con el Centro Andaluz de Metrología. Para ello se realiza el estudio de las máquinas herramientas expuestas y sus requerimientos para ver qué medidas y ensayos son los óptimos para su puesta a punto.

Se comienza presentando las distintas máquinas herramientas que hay en el mercado. Existe una gran variedad de máquinas herramienta las cuales se pueden clasificar por diversos aspectos como su finalidad, su modo de trabajo, su estructura, etc. También se profundizará en los errores que se pueden encontrar en dichas máquinas y sus procedencias. El análisis de estos errores permitirá entender mejor el comportamiento de las máquinas herramientas, para concretar calibraciones periódicas para así poder prever distintos fallos.

A continuación, se analizarán en un estudio según varias normas internacionales para ver las calibraciones que existen para poner la máquina herramienta a punto. Se menciona las principales mediciones que se realizan debido a su alto requerimiento en las máquinas herramientas. Como se verá en este texto dichas mediciones se clasifican por la naturaleza del movimiento de la parte que interesa. Relacionado con este punto también se expone los distintos instrumentos de calibración que existen en el mercado, desde los más sofisticados hasta los más simples. Cada uno con su mecánica de calibración y sus ventajas y desventajas. Dependiendo de la medición y de la máquina herramienta a calibrar, el operario deberá de tener en cuenta todas las características de estas herramientas para decantarse por una de ellas.

La incertidumbre de medida es un detalle fundamental para tener en cuenta en todas las mediciones. Como se explicará más adelante, este aspecto siempre va ligado a cualquier medición que se realice y se deberá de tener en cuenta en los cálculos para su presentación final. Por ello cualquier medición que se realice nunca es exacta al cien por cien y esto es debido a que varios aspectos influyen en el proceso de medición variando el resultado final.

Se expone la manera que tiene un laboratorio de calibración para tomar los datos, los cálculos posteriores y su presentación final. Toda esta información va recogida en un documento denominado Certificado de calibración. Este documento deberá de contener cierta información acerca del procedimiento de calibración, información de la máquina, condiciones ambientales, etc.

Por último, se presenta las máquinas herramientas seleccionadas a modo de ejemplo y los ensayos que se pueden realizar en ellas. Se hará una comparativa donde se refleje los diferentes ensayos que se pueden realizar en cada una de las máquinas herramientas seleccionadas según la medición que se requiera.

Con ello quedara recogida toda la información necesaria para poder realizar un procedimiento de calibración de una máquina herramienta con las mismas características a las expuestas en este trabajo.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Objeto del trabajo de fin de grado</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	1
2 MÁQUINAS HERRAMIENTA	3
2.1 <i>Máquinas herramienta</i>	3
2.2 <i>Tipos de máquinas herramienta</i>	3
2.3 <i>Errores en las maquinas herramienta</i>	3
2.4 <i>Errores geométricos</i>	5
2.4.1 Ejes lineales	5
2.4.2 Ejes de rotación	6
2.4.3 Paralelismo y perpendicularidad	10
2.4.4 Varios ejes o pruebas cinemáticas	13
3 INSTRUMENTOS DE CALIBRACIÓN	15
3.1 <i>Finalidad de los instrumentos de medición</i>	15
3.2 <i>Instrumentos de calibración para maquinas herramientas</i>	15
3.2.1 Sensores de desplazamiento lineal	15
3.2.2 Microscopio e hilo tenso	16
3.2.3 Telescopio de alineamiento	16
3.2.4 Instrumentos con tecnología láser	17
3.2.5 Instrumentos tradicionales	18
3.2.6 Autocolimador	19
3.2.7 Ball-bar	19
3.2.8 Mesa de indexación de referencia	21
3.2.9 Encoder rotativo de referencia	21
4 ENSAYOS	11
4.1 <i>Presentación</i>	11
4.2 <i>Condiciones previas al ensayo</i>	11
4.2.1 Prueba de histéresis de montaje	11
4.2.2 Prueba de estabilidad	12
4.3 <i>Tipos de ensayo según el error a medir</i>	12
4.3.1 Rectitud	12
4.3.2 Movimiento de posicionamiento lineal	15
4.3.3 Movimientos angulares	16
4.3.4 Movimiento angular de posicionamiento	19
4.3.5 Paralelismo de los ejes de movimiento	21
4.3.6 Coaxialidad entre líneas medias de ejes	25

4.3.7	Perpendicularidad de los ejes del movimiento	27
4.3.8	Prueba trayectoria circular generadas por dos o tres ejes lineales	32
4.3.9	Ensayo de planitud	35
4.3.10	Otros ensayos	37
4.4.	<i>Incertidumbre</i>	40
4.4.1.	Introducción	40
4.4.2.	Fuentes de incertidumbre	40
4.4.3.	Cálculo de la incertidumbre	41
4.4.4.	Evaluación de la incertidumbre de las estimaciones de entrada	41
4.4.5.	Cálculo de la incertidumbre de la estimación de salida	43
4.4.6.	Incertidumbre expandida	44
4.5.	<i>Certificado de Calibración</i>	44
4.6.	<i>Toma de Datos</i>	45
5	CONCLUSIÓN	46
ANEXO I	PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	49
A.1	<i>Características del equipo</i>	49
A.2	<i>Objeto</i>	49
A.3	<i>Breve descripción</i>	49
A.4	<i>Campo de aplicación</i>	50
A.5	<i>Notas preliminares</i>	50
A.5.1	Prueba de histéresis de montaje	50
A.5.2	Prueba de estabilidad ¿SABEN ALGO DE ESTA PRUEBA EN EL CAM?	51
A.6	<i>Procedimiento</i>	51
A.6.1	Rectitud	51
A.6.2	MOVIMIENTO DE POSICIONAMIENTO LINEAL	62
A.6.3	Movimientos angulares	70
A.6.4	Movimientos angular de posicionamiento	77
A.6.5	Paralelismo de los ejes de movimiento	83
A.6.5.1	Paralelismo entre dos ejes de movimiento lineal	83
A.6.5.2	Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje fijo	87
A.6.5.3	Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje de revolución	88
A.6.5.4	Paralelismo entre dos ejes de giro	90
A.6.6	Coaxialidad entre líneas medias de ejes	91
A.6.7	Perpendicularidad de los ejes del movimiento	92
A.6.8	ENSAYO DE PLANITUD	108
A.6.9	Prueba trayectoria circular generadas por dos o tres ejes lineales	116
A.6.10	Toma de datos	121
A.7	<i>Modelo de calibración</i>	136
A.8	<i>Cálculo de incertidumbre</i>	136
A.9	<i>Documentación de referencia</i>	138
ANEXO II	EJEMPLO CALIBRACIÓN	139
A.1	<i>Ensayo de Rectitud</i>	139
A.2	<i>Ensayo de posicionamiento angular</i>	144
Referencias		148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de mediciones necesarias para una máquina de tres ejes	46
Tabla 2. Número de mediciones necesarias para una máquina herramienta de cinco ejes.	46
Tabla 3. Ensayos en diferentes máquinas herramientas	47
Tabla 4. Herramientas en los distintos ensayos	48
Tabla 5. Estado de luz led del Ball-Bar	117
Tabla 6. Tabla de toma de datos manual	135
Tabla 7. Resumen cálculo de incertidumbre	137
Tabla 8. Características máquina Gantry	139
Tabla 9. Resumen cálculo incertidumbre para Gantry	143
Tabla 10. Posiciones para ensayo angular	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Errores en los ejes lineales	6
Figura 2 Error de movimiento de un eje de rotación	7
Figura 3 Errores radial, axial y de oscilación de los ejes de rotación	8
Figura 4 Error de desplazamiento de un eje de rotación	9
Figura 5 Error de desplazamiento de un eje de rotación con respecto a un punto dado	10
Figura 6 Paralelismo entre los ejes Z y W en el plano XZ.	11
Figura 7 Error de paralelismo entre los ejes C y C1 en el plano YZ	12
Figura 8 Perpendicularidad entre los ejes X y Z.	13
Figura 9 Desviación circular en trayectoria circular	14
Figura 10 Error de planitud	14
Figura 11 Palpador neumático	16
Figura 12 Reloj comparador	16
Figura 13 Telescopio electrónico de alineamiento	17
Figura 14 Láser Tracker	17
Figura 15 Esquema láser XL-80	18
Figura 16 Instrumentos tradicionales	19
Figura 17 Autocolimador	19
Figura 18 Ball Bar	20
Figura 19 Trazos del Ball bar con su error asociado	20
Figura 20 Mesa de indexación de referencia	21
Figura 21 Encoder rotativo de referencia	21
Figura 22 Montaje del sensor de desplazamiento y regla	13
Figura 23 Montaje del microscopio e hilo tenso.	14
Figura 24 Montaje del telescopio de alineamiento	14
Figura 25 Montaje del láser interferómetro de rectitud	15
Figura 26 Montaje del interferómetro láser de posicionamiento	16
Figura 27 Montaje del nivel de precisión	17
Figura 28 Montaje del autocolimador	17
Figura 29 Montaje del interferómetro láser angular	18
Figura 30 Montaje para el método de mediciones diferenciales	19
Figura 31 Montaje del autocolimador y polígono de referencia	20
Figura 32 Montaje interferómetro y mesa de indexación	21
Figura 33 Montaje sensor de desplazamiento	22
Figura 34 Montaje de sensor de desplazamiento y mandrino	22
Figura 35 Montaje interferómetro de rectitud	23
Figura 36 Montaje mandrino y sensor de desplazamiento	23

Figura 37 Montaje esfera patrón y sensor de desplazamiento	24
Figura 38 Montaje del mandrino y los sensores de desplazamiento	25
Figura 39 Montaje para el cálculo de la flexión de los soportes	26
Figura 40 Montaje de los relojes comparadores para eliminar el error axial	27
Figura 41 Montaje escuadra patrón y sensor de desplazamiento	28
Figura 42 Montaje de la regla patrón y mesa de referencia indexable	29
Figura 43 Tipos de montajes del láser según la posición de la escuadra óptica	30
Figura 44 Análisis y representación de los datos	31
Figura 45 Montaje de la regla sobre el componente giratorio	32
Figura 46 Montaje mandrino y sensor de desplazamiento sobre los ejes de giro	32
Figura 47 Representación de los resultados del ensayo de circularidad	33
Figura 48 Montaje del sensor de desplazamiento	33
Figura 49 Montaje sensores de desplazamiento y patrón circular	34
Figura 50 Montaje Ball-bar	34
Figura 51 Montaje escala digital bidimensional	35
Figura 52 Montaje de placa y sensor de referencia	36
Figura 53 Montaje del láser y sus ópticas	37
Figura 54 Presentación de los resultados	37
Figura 55 Montaje del Ball-bar para medición cónica	38
Figura 56 Montaje en el caso de líneas medias perpendiculares	39
Figura 57 Montaje en el caso de líneas medias no perpendiculares	39
Figura 58 Diferentes tipos de distribuciones conociendo sus límites $\pm a$	43
Figura 59. Formato tabla incertidumbre	44

ANEXO I

Figura AI. 1 Ensayo de rectitud con regla y comparador	52
Figura AI. 2 Ensayo de rectitud con interferómetro láser (opción 1)	53
Figura AI. 3 Ensayo de rectitud con interferómetro láser (opción 2)	54
Figura AI. 4 Ensayo de rectitud (eje vertical) con interferómetro láser (opción 1)	55
Figura AI. 5 Ensayo de rectitud (eje vertical) con interferómetro láser (opción 2)	55
Figura AI. 6 Obturador del cabezal láser con haz reducido	56
Figura AI. 7 Interferómetro de rectitud (posición 1)	56
Figura AI. 8 Interferómetro de rectitud (posición 2)	56
Figura AI. 9 Reflector de rectitud	57
Figura AI. 10 Obturador del cabezal láser	57
Figura AI. 11 Diferentes casos de desalineación en el objetivo del obturador	57
Figura AI. 12 Obturador del cabezal láser con haz completo	58
Figura AI. 13 Interferómetro de rectitud	58
Figura AI. 14 Obturador del cabezal láser con haz reducido	58

Figura AI. 15 Espejo giratorio	59
Figura AI. 16 Retroreflector de gran tamaño	59
Figura AI. 17 Espejo giratorio	59
Figura AI. 18 Recorrido haz de láser	60
Figura AI. 19 Desalineación del objetivo del obturador	60
Figura AI. 20 Obturador del cabezal láser con haz reducido	61
Figura AI. 21 Criterio de signos para el ensayo de rectitud	62
Figura AI. 22 Ensayo de posicionamiento lineal	63
Figura AI. 23 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 1)	64
Figura AI. 24 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 2)	64
Figura AI. 25 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 3)	64
Figura AI. 26 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 4)	65
Figura AI. 27 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 5)	65
Figura AI. 28 Reflector lineal	66
Figura AI. 29 Reflector lineal	66
Figura AI. 30 Obturador del cabezal láser	66
Figura AI. 31 Montaje interferómetro lineal	67
Figura AI. 32 Interferómetro lineal con objetivo	67
Figura AI. 33 Obturador del cabezal láser	67
Figura AI. 34 Obturador del cabezal láser	68
Figura AI. 35 Ajuste de cabeceo en el obturador del cabezal láser	68
Figura AI. 36 Ajuste de altura en el obturador del cabezal láser	68
Figura AI. 37 Ajuste de ladeo en el obturador del cabezal láser	68
Figura AI. 38 Ajuste de horizontal en el obturador del cabezal láser	69
Figura AI. 39 Ajuste de intensidad en el obturador del cabezal láser	69
Figura AI. 40 Compensador ambiental y sensores de temperatura	70
Figura AI. 41 Ensayo de movimiento angular	71
Figura AI. 42 Ensayo de movimiento angular (opción 1)	72
Figura AI. 43 Ensayo de movimiento angular (opción 2)	72
Figura AI. 44 Montaje para error de ladeo (opción 1)	73
Figura AI. 45 Montaje para error de ladeo (opción 2)	73
Figura AI. 46 Montaje para error de ladeo o cabeceo en eje vertical	74
Figura AI. 47 Obturador del cabezal láser	74
Figura AI. 48 Reflector angular con objetivo	74
Figura AI. 49 Obturador del cabezal láser	75
Figura AI. 50 Montaje interferómetro angular	75
Figura AI. 51 Interferómetro angular	75
Figura AI. 52 Obturador del cabezal láser	76
Figura AI. 53 Ajuste horizontal del cabezal láser	76

Figura AI. 54 Ajuste vertical del cabezal láser	76
Figura AI. 55 Obturador del cabezal láser con haz completo	77
Figura AI. 56 Ensayo de posicionamiento angular	78
Figura AI. 57 Posición bloqueado/desbloqueado del indexador	79
Figura AI. 58 Montaje del indexador (opción 1)	79
Figura AI. 59 Montaje del indexador (opción 2)	80
Figura AI. 60 Ventana de selección de rango en el software	80
Figura AI. 61 Rangos según intervalos de medición	81
Figura AI. 62 Recorrido unidireccional	81
Figura AI. 63 Recorrido bidireccional	81
Figura AI. 64 Secuencia alternativa (opción 1)	81
Figura AI. 65 Secuencia alternativa (opción 2)	82
Figura AI. 66 Ventana del software para mover el indexador a posición de referencia	82
Figura AI. 67 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento	84
Figura AI. 68 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 1)	85
Figura AI. 69 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 2)	85
Figura AI. 70 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 2)	86
Figura AI. 71 Criterio de signos (opción 1)	86
Figura AI. 72 Criterio de signos (opción 2)	87
Figura AI. 73 Ventana del software para definir las propiedades	87
Figura AI. 74 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino	88
Figura AI. 75 Ensayo de paralelismo con láser de rectitud	89
Figura AI. 76 Criterio de signos	89
Figura AI. 77 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino	90
Figura AI. 78 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino	91
Figura AI. 79 Ensayo de coaxialidad con sensor de desplazamiento y mandrino	91
Figura AI. 80 Montaje opcional para el ensayo de coaxialidad	92
Figura AI. 81 Ensayo de perpendicularidad con sensor de desplazamiento y escuadra patrón	93
Figura AI. 82 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 1)	94
Figura AI. 83 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 2)	95
Figura AI. 84 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 3)	96
Figura AI. 85 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 4)	97
Figura AI. 86 Ajuste de la escuadra óptica	98
Figura AI. 87 Montaje reflector de rectitud	98
Figura AI. 88 Interferómetro de rectitud	98
Figura AI. 89 Interferómetro de rectitud	99
Figura AI. 90 Reflector de rectitud	99
Figura AI. 91 Obturador del cabezal láser	99
Figura AI. 92 Haz completo en el obturador del cabezal láser	100

Figura AI. 93 Criterio de signos	100
Figura AI. 94 Criterio de signos	101
Figura AI. 95 Interferómetro de rectitud	101
Figura AI. 96 Haz reducido en el obturador del cabezal láser	101
Figura AI. 97 Montaje espejo vertical	102
Figura AI. 98 Ajuste espejo vertical	102
Figura AI. 99 Montaje interferómetro de rectitud	103
Figura AI. 100 Ajuste interferómetro de rectitud	103
Figura AI. 101 Ajuste espejo vertical	104
Figura AI. 102 Haz de láser sobre Escuadra óptica	104
Figura AI. 103 Haz de láser sobre reflector de rectitud	105
Figura AI. 104 Haz de láser sobre interferómetro de rectitud	105
Figura AI. 105 Haz de láser sobre obturador del cabezal láser	105
Figura AI. 106 Haz de láser sobre reflector de rectitud	106
Figura AI. 107 Haz de láser sobre interferómetro de rectitud	107
Figura AI. 108 Perpendicularidad entre dos ejes de revolución	108
Figura AI. 109 Ensayo de planitud con sensor de desplazamiento y superficie de referencia	108
Figura AI. 110 Ensayo de planitud con interferómetro láser	109
Figura AI. 111 Mapa de resultados	109
Figura AI. 112 Montaje para ensayo de planitud	110
Figura AI. 113 Método Moody	110
Figura AI. 114 Método de cuadrículas	111
Figura AI. 115 Montaje interferómetro y reflector angular	112
Figura AI. 116 Haz de láser sobre espejo giratorio	112
Figura AI. 117 Ajuste del reflector angular	113
Figura AI. 118 Colocación reflector angular con respecto al interferómetro angular	113
Figura AI. 119 Montaje interferómetro y reflector angular	114
Figura AI. 120 Montaje espejos giratorios	114
Figura AI. 121 Haz de láser sobre espejo giratorio	115
Figura AI. 122 Ajuste interferómetro angular	115
Figura AI. 123 Haz de láser sobre el obturador del cabezal láser	115
Figura AI. 124 Prueba circular con Ball-bar	117
Figura AI. 125 Ball-bar	117
Figura AI. 126 Montaje copa magnética	118
Figura AI. 127 Montaje copa magnética sobre husillo	118
Figura AI. 128 Montaje bola de reglaje y copa del montaje central	119
Figura AI. 129 Calibrador	119
Figura AI. 130 Ventana configuración de ensayo	120
Figura AI. 131 Ventana configuración de ensayo	120

Figura AI. 132 Ventana principal de ensayo	122
Figura AI. 133 Ventana configuración de ensayo 1	123
Figura AI. 134 Ventana configuración de ensayo 2	123
Figura AI. 135 Secuencia lineal bidireccional	124
Figura AI. 136 Secuencia de peregrinación bidireccional	125
Figura AI. 137 Secuencia de péndulo bidireccional	126
Figura AI. 138 Ventana configuración de ensayo 3	126
Figura AI. 139 Ventana configuración de ensayo 4	127
Figura AI. 140 Ventana de resultados	128
Figura AI. 141 Ventana de gráfico de resultados	129
Figura AI. 142 Tipos de análisis	130
Figura AI. 143 Ventana 1 de configuración	131
Figura AI. 144 Ventana 2 de configuración	132
Figura AI. 145 Ventana de generador de programas automáticos	132
Figura AI. 146 Ventana de resumen del ensayo	133
Figura AI. 147 Ventana 3 de configuración	133
Figura AI. 148 Ventana 3 de configuración con opción de calibración activa	134
Figura AI. 149 Ventana de configuración anterior a la toma de datos	134

ANEXO II

Figura AII. 1 Esquema máquina Gantry	139
Figura AII. 2 Esquema montaje ensayo de rectitud en plano vertical	140
Figura AII. 3 Tabla de datos ensayo de rectitud	141
Figura AII. 4 Gráfica ensayo de rectitud	142
Figura AII. 5 Recorrido bidireccional alternativo	144
Figura AII. 6 Tabla de datos ensayo de posicionamiento angular	145
Figura AII. 7 Gráfica ensayo de posicionamiento angular	145

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto del trabajo de fin de grado

Hoy en día las exigencias de calidad y bajo coste exigidas a la industria moderna hacen necesario que las tecnologías de fabricación evolucionen y creen métodos de medición más sofisticados para que las maquinas herramientas sean más productivas. Cuando en un proceso productivo se encuentra una maquina mal calibrada esto lleva a producir pérdidas de tiempo y material, lo que da como resultado el aumento del tiempo y el coste de producción. Las piezas necesitan un buen acabado dimensional para cumplir con los requisitos de los clientes, además de cumplir ciertas normas de calidad. Por todo ello, es crucial evitar los errores producidos por las maquinas herramientas.

Una de las principales características de las maquinas herramientas es su fiabilidad para realizar la función para la cual se fabricaron. Debido a esto la calibración de las maquinas herramientas se ha convertido en un proceso de obligado cumplimiento, ya sea para conseguir una fiabilidad requerida o para cumplir ciertas normas de calidad internas o externas. Como cualquier otra herramienta el paso del tiempo afecta a su rendimiento y por ello se deberá acordar una serie de calibraciones periódicas las cuales garanticen su correcto funcionamiento y alarguen su vida útil. Estos ensayos periódicos permiten conocer el estado de la máquina herramienta y realizar las correcciones oportunas a tiempo. Con todo ello además de conseguir una máquina que puede funcionar en condiciones óptimas, se ayudará a cumplir normas de seguridad, de salud de los operarios, de la calidad del medio ambiente debido a su consumo eficiente, etc.

En colaboración con el CAM (Centro Andaluz de Metrología) se estudiará las distintas maquinas herramientas del mercado y sus posibles calibraciones para su puesta a punto. Se hará un paso general por lo que conlleva un proceso de calibración, desde la elección del instrumento, el ensayo a realizar, sus condiciones previas hasta su toma de datos y presentación de los resultados. El trabajo culminará el trabajo con la elaboración de un procedimiento de calibración, donde quede reflejado todo lo estudiado durante el trabajo y pueda ser utilizado para futuras calibraciones. Para ello se ha seleccionado la máquina herramienta de puente móvil tipo Gantry para la cual se ha realizado la toma de datos, cálculo de las incertidumbres asociadas y el análisis de los resultados finales.

Para llevar a cabo lo comentado anteriormente, es necesario realizar un estudio de los diversos ensayos que existen en la industria para poder tener cierto conocimiento de las técnicas/métodos de calibración y aplicarlas de una manera correcta. Se tendrá en cuenta todas las normas que rigen las calibraciones de las maquinas herramientas tanto las generales como las específicas para ciertas maquinas herramientas. Junto con esto se deberá poner en conocimiento, todas las herramientas de calibración que son necesarias para realizar dichas mediciones, así como sus características. Dependiendo de sus ventajas y desventajas y la maquina sobre la cual se vaya a usar, el operario deberá de decidir cuál es la óptima para la medición que se requiera.

1.2 Objetivos

Elaborar un procedimiento de calibración para maquinas herramientas basado en la norma ISO 230-1 según diferentes tipos de ensayo. Para ello se debe analizar y comparar diferentes métodos de calibración en distintas maquinas herramientas. Una vez se exponga durante la memoria todo lo necesario para entender los diferentes ensayos, en los anexos se tiene la puesta en práctica de un ensayo con su certificado de calibración con sus medidas y cálculos para que sea representativo.

Los principales objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Analizar las diferentes MH que hay en el mercado en busca de un grupo que sea representativo según los errores existentes en ellas.
- Definir los distintos tipos de errores e incertidumbres que hay en una MH y los cálculos para la obtención de ellos.
- Describir los diferentes ensayos de calibración que se pueden realizar en las maquinas seleccionadas y los instrumentos a utilizar.
- Redacción de un procedimiento de calibración completo que pueda ser usado por cualquier operario de un centro de calibración.
- Introducción al manejo del software de Renishaw, tanto el del láser XL-80 como el de Ball-Bar QC20-W.

2 MÁQUINAS HERRAMIENTA

2.1. Máquinas herramienta

En el pasado las herramientas necesitaban de la acción humana para realizar su función, pero con el paso del tiempo y el avance tecnológico se han ido creando maquinas que incluyan estas herramientas y realicen el trabajo de una manera mecánica.

Las maquinas herramienta se han diseñado con el objetivo de modelar una pieza, normalmente metálica, mediante diferentes procesos de tratamiento del material. Debido a su gran tamaño y complejidad se tratan de máquinas estacionarias, lo que le permite aportar rigidez para soportar todo tipo de fuerzas provenientes de su operación. El amortiguamiento de las fuerzas dinámicas producto de su funcionamiento y la precisión para efectuar los movimientos son otras de las características de estas máquinas.

Las MH tienen unas funciones básicas que son: sujetar y sostener tanto la pieza de trabajo como la herramienta, proporcionar el movimiento necesario a la pieza de trabajo, a la herramienta o a ambas y regular la velocidad de corte y de avance de la herramienta y de la pieza de trabajo.

El avance tecnológico ha hecho posible que vaya creando diferentes maneras de trabajar el material inicial según los requerimientos de la pieza final. Esto ha llevado a tener en la actualidad una gran variedad de máquinas herramienta según si su procedimiento se basa en:

- Esculpir la pieza inicial dando la forma que se desee, quitando material sobrante.
- Dar la forma deseada por medio de plegado, estampado.
- Cortar un modelo a partir de una plancha por medio de herramientas de corte como chorro de agua, laser.

A pesar de la gran cantidad de máquinas herramientas que hay en el mercado se pueden distinguir entre ellas una serie de componentes comunes como la bancada, las guías y correderas, los elementos estructurales, la mesa de fijación, el cabezal porta herramienta y el motor de avance.

2.2. Tipos de máquinas herramienta

Las maquinas herramientas se han diseñado conforme los requerimientos de la sociedad, los avances tecnológicos y la alta demanda de la industria. Existen una gran cantidad de tipos de máquinas herramienta en el mercado las cual se pueden clasificar por diversos factores:

- Según el grado de automatización
- Según el grado de exactitud
- Según la posición del eje
- Según el número de órganos
- Según si son convencionales o no

Además de las mencionadas se pueden encontrar muchos más tipos de clasificaciones que atienden a otras características de las maquinas herramientas.

2.3. Errores en las máquinas herramienta

El paso del tiempo, el mal uso de las maquinas herramientas, el contacto con un ambiente hostil pueden llevar a que la máquina herramienta presente diversos errores estructurales o de operación. Esto conlleva

una pérdida de fiabilidad y también una pérdida de rendimiento ya que la máquina herramienta no está funcionando de manera óptima. Por otro lado, seguramente se tenga problemas de calidad y de exigencias con el cliente por no cumplir con los requisitos exigidos.

Conocer el estado de la máquina herramienta se convierte en una tarea fundamental para poder prevenir posibles fallos o como se ha mencionado anteriormente pérdida de fiabilidad y rendimiento. Con un control periódico se puede confirmar que esta no posee ningún fallo interno o externo y se mantiene dentro de sus límites de óptimo funcionamiento.

Para poder entender y evaluar los errores que aparecen en las máquinas herramientas primero hay que familiarizarse con los siguientes conceptos:

- Resolución: se trata del incremento más pequeño que se puede medir en un instrumento.
- Sensibilidad: se trata de la cantidad de señal de entrada más pequeña detectable por el instrumento de medida que termina en una señal de salida.
- Error: este término es fundamental para poder representar el nivel de exactitud que existe. El error se determina por medio de la diferencia entre el valor verdadero y el indicado en el instrumento.
- Exactitud y precisión: dos términos que suelen utilizarse como sinónimos, pero en el campo de la metrología tienen significados distintos. Cuando se tenga varios valores cercanos entre sí, se puede decir que es preciso. Por el contrario, un valor será exacto cuando más se acerque al valor verdadero.
- Gama y escala: se define gama a la diferencia entre el máximo valor y el mínimo del instrumento. Dentro de una gama se puede encontrar una o varias escalas.
- Repetibilidad: capacidad de la máquina herramienta de repetir una posición n veces. Es una característica fundamental de la máquina herramienta sobre la que influye el error de histéresis y el error de holgura.

“El cumplimiento de la exactitud requerida de fabricación y montaje de las diferentes partes de la máquina se entiende como precisión estática de la máquina-herramienta, también denominada precisión geométrica.”

Dentro del proceso de fabricación de cualquier pieza hay diversos tipos de errores que pueden ejercer efectos negativos en la producción del producto. Su origen puede darse por múltiples motivos los cuales se detalla a continuación:

- Errores debidos a problemas térmicos: este tipo de errores se atribuyen al calentamiento de los motores, de las guías, el proceso de corte, las variaciones de temperatura en el lugar de trabajo, etc.
- Errores derivados de las fuerzas que se generan durante el trabajo de la máquina: se producen por la fuerza de corte y de los distintos componentes de la máquina herramienta. A este tipo de errores también se les conoce como errores dinámicos y pueden acabar en un mal acabado superficial de la pieza final.
- Errores geométricos: este tipo de errores pueden aparecer en fase de diseño, durante el montaje o ya funcionando debido a los componentes que se montan sobre este.
- Errores cinemáticos: se definen como las inexactitudes en los desplazamientos relativos de varios elementos móviles de la máquina.
- Deformación de la pieza debido al proceso de mecanizado
- Errores en el sistema de control: proviene de los fallos que pueda dar el software utilizado, de los sistemas de cálculo, o de los distintos elementos de control de la máquina herramienta.

Todos los errores descritos anteriormente tienen un grado alto de importancia en el correcto funcionamiento de la máquina herramienta. Este documento se centrará en el estudio de los tres primeros errores debido a su relevancia sobre el resultado final. Dentro de los errores térmicos y dinámicos se puede clasificar estos dos tipos de errores:

- Error de histéresis: se produce cuando el valor real y la deseada no coincide. Este error proviene de la

fricción de la parte mecánica de la herramienta.

- Error de holgura: es el fragmento de movimiento que la máquina herramienta no detecta cuando se produce la inversión de movimiento.

Por otro lado, se encuentran los errores geométricos que influyen directamente en componentes de la máquina herramienta y hace que no se pueda obtener las piezas con cierta precisión. Al definir todos los posibles errores que se pueden encontrar en una máquina herramienta es posible conocer los posibles defectos que pueda llegar a tener y buscar una solución para obtener una alta repetibilidad y error geométrico despreciable.

2.4. Errores geométricos

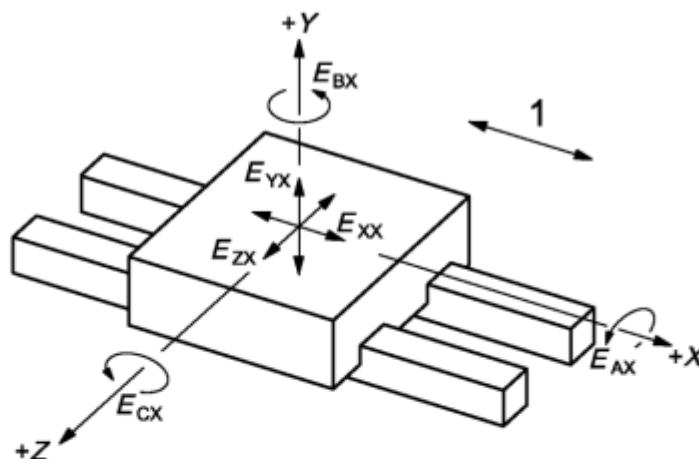
Al término del proceso de fabricación las piezas finales deben de cumplir unas ciertas tolerancias dimensionales y geométricas. Por ello es de vital importancia estudiar los errores geométricos ya que están presentes en el acabado final. Dentro de los errores geométricos se encuentran errores sistemáticos como los errores de rectitud, perpendicularidad, etc. y errores aleatorios.

2.4.1 Ejes lineales

Las máquinas herramientas se componen de elementos móviles cuya función es desplazar la herramienta de corte y la pieza. En este punto se estudia los errores que se producen en el movimiento lineal que existen en las diferentes máquinas herramientas. Dependiendo de la máquina herramienta se tendrá un número mayor o menor de ejes lineales.

La figura 1 representa esquemáticamente el carro de una máquina herramienta, el movimiento deseado y los errores que se pueden encontrar en ese desplazamiento lineal. Estos errores se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Error del movimiento lineal de posicionamiento: se refiere al error en el movimiento lineal que produce una desalineación entre la posición real final y la posición deseada. La diferencia entre estas posiciones da la desviación para la posición que interesa. En el caso de la figura 1 este error se representa como E_{XX} . La precisión lineal de posicionamiento se calcula como la mayor desviación positiva sumada al valor absoluto del mayor valor negativo de la desviación de posicionamiento.
- Error de rectitud del movimiento: se refiere al error que produce un desplazamiento en alguna o ambas direcciones perpendiculares a la dirección del movimiento lineal. Para cuantificar este error se calcula la distancia entre el punto funcional y la línea recta de referencia conveniente a su trayectoria. Según convenga se podrá realizar en una o en las dos direcciones perpendiculares al eje lineal escogido. En el caso de la figura 1 este error se representa como E_{YX} o E_{ZX} según la dirección, Y o Z, en que se mida el error. El error de rectitud será el resultado de la suma del mayor valor positivo de la desviación positiva de rectitud más el valor absoluto del mayor valor negativo de la desviación negativa.
- Error de los movimientos angulares: se refiere a los tres movimientos de rotación no deseados cuando un eje lineal describe una trayectoria recta. Para el cálculo de la desviación angular se hará uso de un instrumento de medición angular. Estos errores se definen como E_{AX} , E_{BX} o E_{CX} según en el eje en que se midan, como se aprecia en la figura 1. El error se cuantificará de una manera semejante a los métodos anteriormente descritos: suma de la mayor desviación angular positiva más el valor absoluto de la mayor desviación angular negativa obtenida durante un recorrido completo.



Leyenda

- 1 Movimiento lineal sobre el eje X
- E_{AX} Error del movimiento angular en torno al eje A (balanceo)
- E_{BX} Error del movimiento angular en torno al eje B (guiñada)
- E_{CX} Error del movimiento angular en torno al eje C (cabecceo)
- E_{XX} Error del movimiento lineal de posicionamiento sobre el eje X; Desviaciones de posicionamiento sobre el eje X
- E_{YX} Error de rectitud en la dirección del eje Y
- E_{ZX} Error de rectitud en la dirección del eje Z

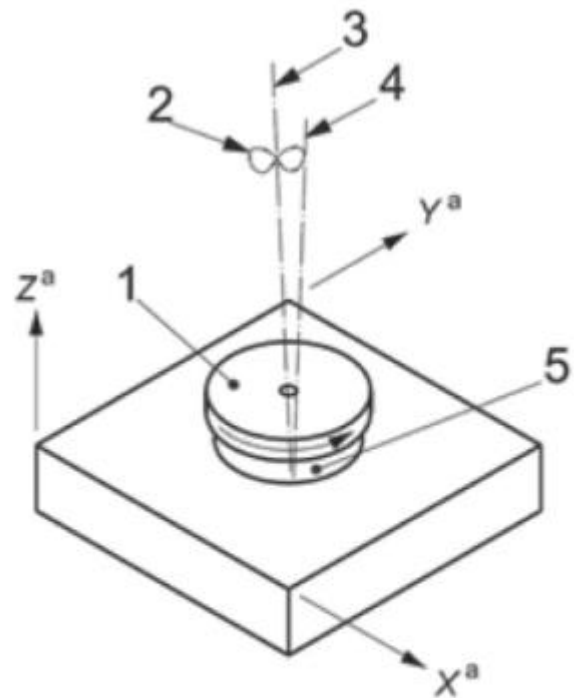
Figura 1 Errores en los ejes lineales

2.4.2 Ejes de rotación

Algunas máquinas herramienta cuentan con componentes giratorios como mesas giratorias, cabezales basculantes, mesas indexadas y cabezales giratorios. Estos elementos constan de posicionamiento discreto o continuo según como se opere. Normalmente las máquinas herramienta que operan mediante control numérico constan de un posicionamiento continuo. Por otro lado, el posicionamiento discreto es operado mediante control manual, mecánico, CNC o control lógico programable (PLC).

Relacionado con el movimiento rotario de los ejes de giro que componen la máquina herramienta se encuentran los siguientes errores:

- Error del movimiento de posicionamiento angular: es el movimiento no deseado a lo largo de la dirección de rotación que se da cuando no coincide la posición local real y la prevista. La diferencia de estas posiciones será la desviación correspondiente a cada posición que se alcance. La precisión será la suma del valor de la mayor desviación positiva más el valor absoluto de la mayor desviación negativa de posicionamiento angular.
- Error de movimiento de los ejes de rotación: son las variaciones en la posición y orientación de los ejes de rotación relacionado con su línea media en función del ángulo de rotación de los ejes giratorios. En la figura 2 se puede ver un esquemático de un eje giratorio (4) con su error de movimiento (2).

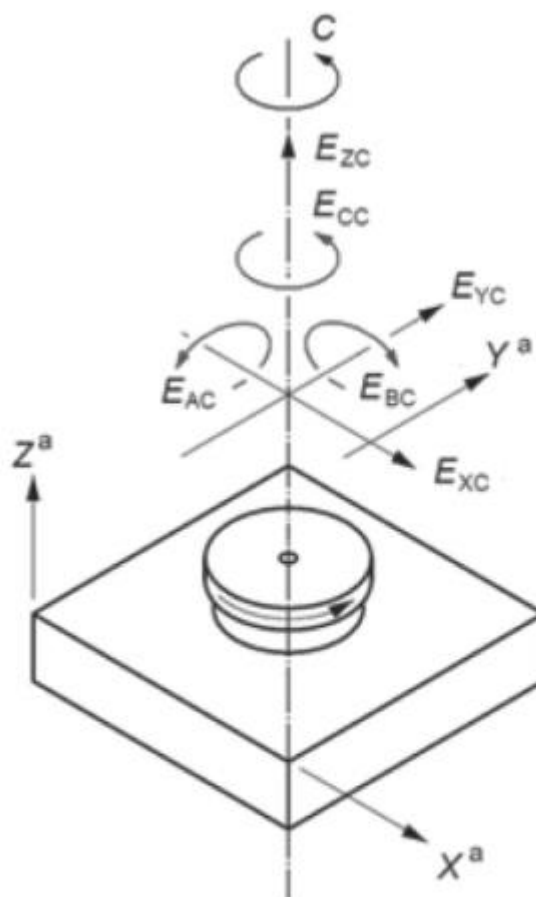


Leyenda

- 1 Husillo(rotor)
- 2 Error del movimiento en el eje de giro (anteriormente denominado C)
- 3 Línea media del eje
- 4 Eje de giro (para un ángulo C)
- 5 Carcasa del husillo (estator)
- ^a Ejes (sistema) de referencia

Figura 2 Error de movimiento de un eje de rotación

- Error de movimiento axial: es el error de movimiento que es coaxial con la línea media del eje. En la figura 3 este error viene representado como E_{ZC} para el eje de rotación C.
- Error de movimiento radial: es el error de movimiento en una dirección perpendicular a la línea media del eje en una posición axial específica. Se puede observar en la figura 3 como este error se define como E_{XC} o E_{YC} dependiendo del eje X o Y.
- Error de oscilación del movimiento: es el error de movimiento en una dirección angular relativa a la línea media del eje. Dependiendo del eje de rotación B o C se representará como E_{BC} o E_{AC} , como se puede ver en la figura 3.



Leyenda

E_{XC} Error radial del movimiento de C en la dirección del eje X

E_{YC} Error radial del movimiento de C en la dirección del eje Y

E_{ZC} Error axial del movimiento de C

E_{AC} Oscilación debido al movimiento de C en torno al eje X

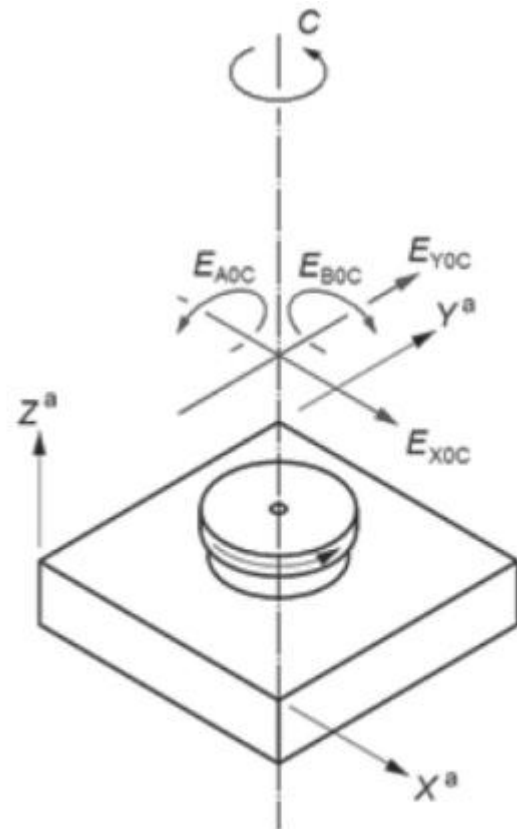
E_{BC} Oscilación debido al movimiento de C en torno al eje Y

E_{CC} Error del movimiento de posicionamiento angular de C; desviación angular del eje C obtenida

^a Ejes (sistema) de referencia

Figura 3 Errores radial, axial y de oscilación de los ejes de rotación

- Desplazamiento de los ejes: se trata de un cambio minúsculo en posición y orientación del eje central. Representado como E_{X0C} o E_{Y0C} si se trata de un desplazamiento del eje en la dirección X o Y, o E_{B0C} o E_{A0C} si se trata de la orientación con respecto a B o C.



Leyenda

E_{X0C} Error de posición de C en la dirección del eje X

E_{Y0C} Error de posición de C en la dirección del eje Y

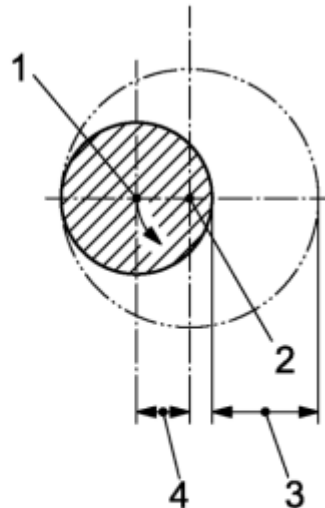
E_{A0C} Error de orientación de C en la dirección del eje A. Perpendicularidad de C con respecto a Y

E_{B0C} Error de orientación de C en la dirección del eje B. Perpendicularidad de C con respecto a X

^a Ejes de referencia

Figura 4 Error de desplazamiento de un eje de rotación

- Desplazamiento radial de un eje de rotación en un punto dado: distancia, figura 5 (4), entre el eje geométrico, figura 5 (1), de una pieza y un eje de rotación, figura 5 (2), cuando ambos no coinciden.



Leyenda

- 1 Eje geométrico
- 2 Eje de rotación
- 3 Desviación
- 4 Desplazamiento radial

Figura 5 Error de desplazamiento de un eje de rotación con respecto a un punto dado

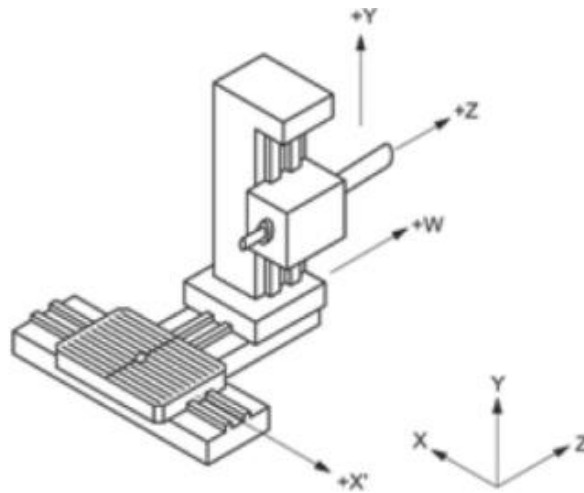
2.4.3 Paralelismo y perpendicularidad

Se dirá que unas líneas son paralelas cuando unas líneas rectas tienen el mismo ángulo de inclinación con respecto a la abscisa de un plano coordenado cualquiera. Por contra, dos líneas rectas son perpendiculares cuando formen 90° entre sí.

Por un lado, se encuentran los errores de paralelismo que actúan sobre los ejes lineales de la máquina herramienta. Dentro de estos ejes lineales se encuentran tanto los ejes lineales de movimiento, como los ejes relacionados con un componente giratorio. A continuación, se hace un resumen de todas las comparaciones entre ejes que se pueden realizar para determinar el paralelismo entre estos.

- Entre dos ejes de movimiento lineal: se mide a través del ángulo que forma una línea recta de referencia que se corresponde con la trayectoria del punto funcional de un componente que se mueve linealmente y otro componente que tiene un movimiento lineal de partida. La medición se produce sobre dos planos ortogonales. En la Figura 6 se puede ver un claro ejemplo de este tipo de error, medido entre los Z y W. Una vez se obtenga la inclinación de cada eje se procede a calcular el error total de paralelismo, $E_{B(0W)Z}$, según la siguiente ecuación:

$$E_{B(0W)Z} = \theta_{Z,ZX} - \theta_{W,ZX} \quad (1)$$



Leyenda

- E_{XZ} Desviación de rectitud en el eje Z, medida en el plano ZX, respecto a una referencia física de rectitud alineada con el eje W
- E_{XW} Desviación de rectitud en el eje W, medida en el plano ZX, respecto a una referencia física de rectitud alineada con el eje W
- 1 Línea recta de referencia asociada a E_{XZ}
- 2 Inclinación de la línea recta de referencia de E_{XZ} ; $\theta_{L,ZX}$ (valor positivo, tal y como se indica)
- 3 Línea recta de referencia asociada a E_{XW}
- 4 Inclinación de la línea recta de referencia de E_{XW} ; $\theta_{W,ZX}$ (valor positivo, tal y como se indica)

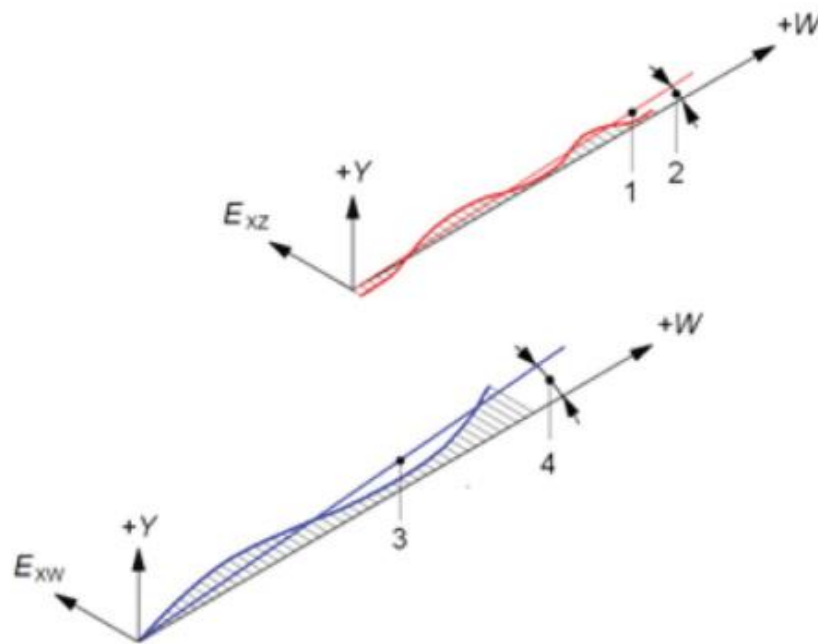
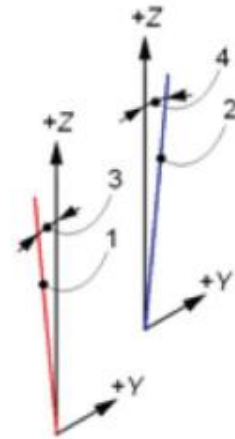
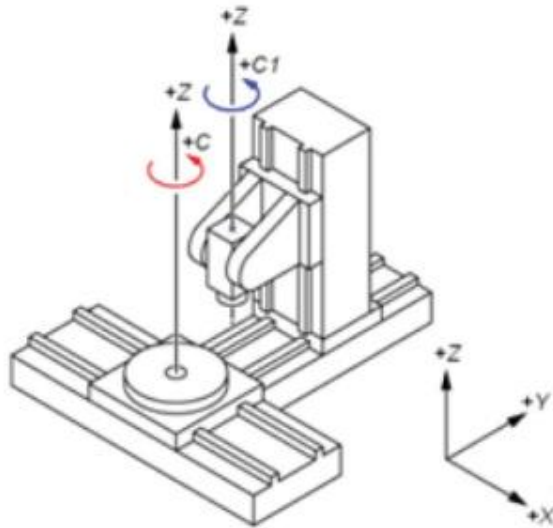


Figura 6 Paralelismo entre los ejes Z y W en el plano XZ.

- Entre dos ejes de giro: se mide a través del ángulo que forma el eje principal de un componente que gira y un eje central de otro componente que gira, sobre dos planos ortogonales. En la figura 7 se puede ver un ejemplo de cálculo de paralelismo entre dos ejes de giro diferentes. Al final para el cálculo del error de paralelismo, $E_{B(OC)C1}$, se acude a la siguiente ecuación:

$$E_{B(OC)C1} = \theta_{C1,ZX} - \theta_{C,ZX} \quad (2)$$



Leyenda

+C1 Eje del husillo (eje de referencia)

+C Mesa giratoria (eje medido)

+Z Referencia típica para la evaluación de la inclinación

1 Eje C

2 Eje C1 (eje del husillo)

3 Inclinación del eje C en el plano YZ; $\theta_{C,YZ}$ (valor positivo, tal y como se indica)4 Inclinación del eje C1 en el plano YZ; $\theta_{C1,YZ}$ (valor negativo, tal y como se indica)

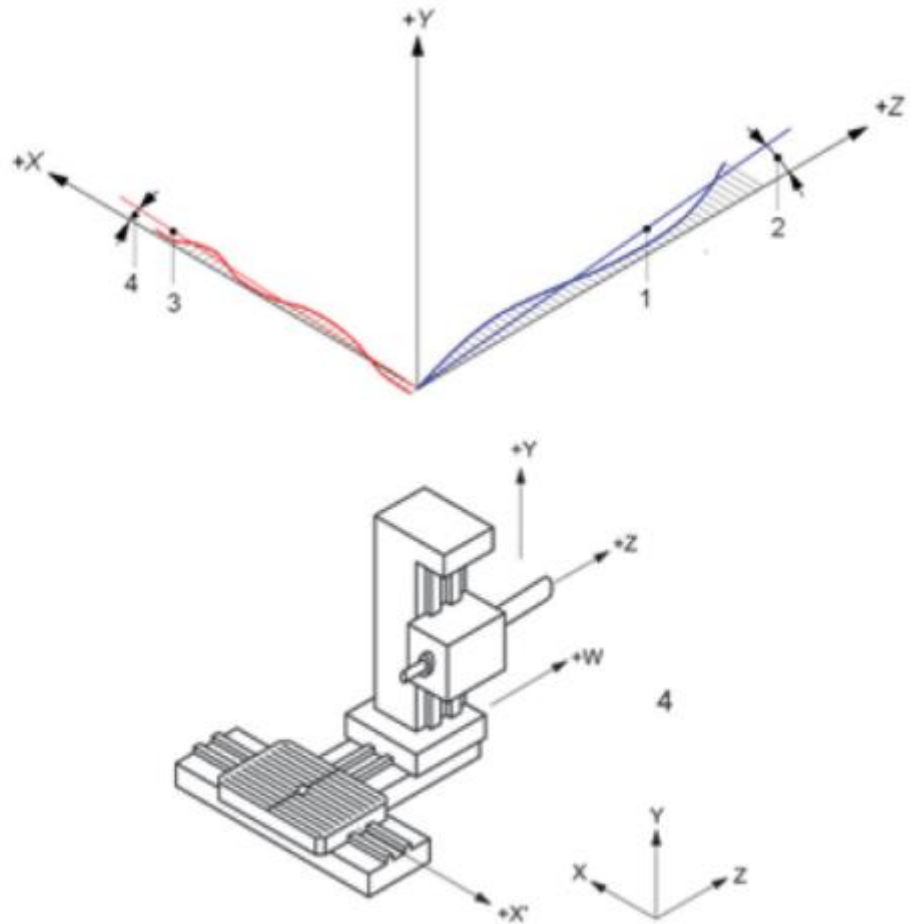
Figura 7 Error de paralelismo entre los ejes C y C1 en el plano YZ

- Entre un eje de movimiento lineal y un eje de movimiento de rotación: se mide el ángulo entre la línea recta de referencia de la trayectoria del punto funcional de un componente que describe un movimiento lineal y el eje central de otro componente giratorio.
- Entre un eje de movimiento lineal y una superficie: se mide el ángulo de la trayectoria de referencia y una superficie funcional de la máquina.
- Entre un eje de giro y una superficie: se mide el ángulo entre un eje de giro de un componente de giro y plano de referencia asociado a la superficie funcional de la máquina.

De igual manera que en los errores de paralelismo, los errores de perpendicularidad se medirán entre ejes lineales y/o ejes de rotación. El método para evaluar la perpendicularidad se basa en realizar dos mediciones de paralelismo entre un eje de movimiento y un eje estático. En este caso se agrupa los tipos de errores de una manera similar a los errores de paralelismo:

- Entre dos ejes de movimiento lineal: se calcula como la diferencia entre la inclinación de la trayectoria recta del punto funcional de un componente respecto de su correspondiente eje principal y la inclinación de la trayectoria recta del punto funcional de otro componente respecto a su correspondiente eje principal. En la Figura 8 se observa un ejemplo visual del cálculo de perpendicularidad de dos ejes. Para el cálculo del error total se hace uso de la siguiente ecuación:

$$E_{B(0Z)X} = E_{B0X} = \theta_{X,ZX} - \theta_{Z,ZX} \quad (3)$$



Leyenda

- 1 Línea recta de referencia asociada a E_{XZ}
- 2 Inclinación de la línea de referencia de E_{XZ} ; $\theta_{Z,ZX}$ (valor positivo, tal y como se indica)
- 3 Línea de referencia asociada a E_{ZX}
- 4 Inclinación de la línea de referencia de E_{ZX} ; $\theta_{X,ZX}$ (valor negativo, tal y como se indica)

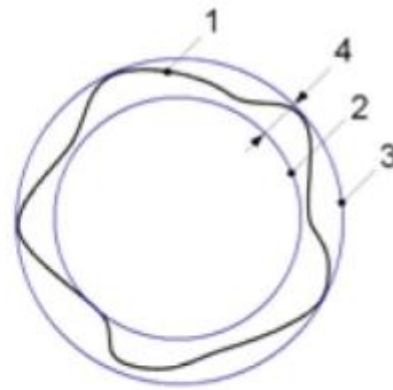
Figura 8 Perpendicularidad entre los ejes X y Z.

- Entre un eje de movimiento lineal y una línea media del eje: distorsión angular respecto a los 90° entre la línea recta de trayectoria de un punto que describe un movimiento lineal y la línea media del eje de un componente giratorio.
- Entre dos líneas medias de eje: distorsión angular respecto a los 90° entre la línea media de un eje de un componente giratorio y la línea media de otro eje de otro componente giratorio de la máquina.

2.4.4 Varios ejes o pruebas cinemáticas

Existen unas pruebas cinemáticas en las que actúan varios ejes a la vez para trazar una trayectoria definida, con el fin de evaluar los distintos errores descritos anteriormente con solo una medición. Este tipo de ensayo permite observar una combinación de los distintos errores actuando a la vez.

- Trayectoria circular: partiendo de una trayectoria circular definida por la máquina permite prever diferentes tipos de errores. Este error circular se basa en la desviación radial de la trayectoria circular con respecto a dos círculos que envuelven dicha trayectoria. Estos círculos de referencia pueden ser cálculos mediante mínimos cuadrados o por medio de una media aritmética de dos círculos con la mínima separación radial.

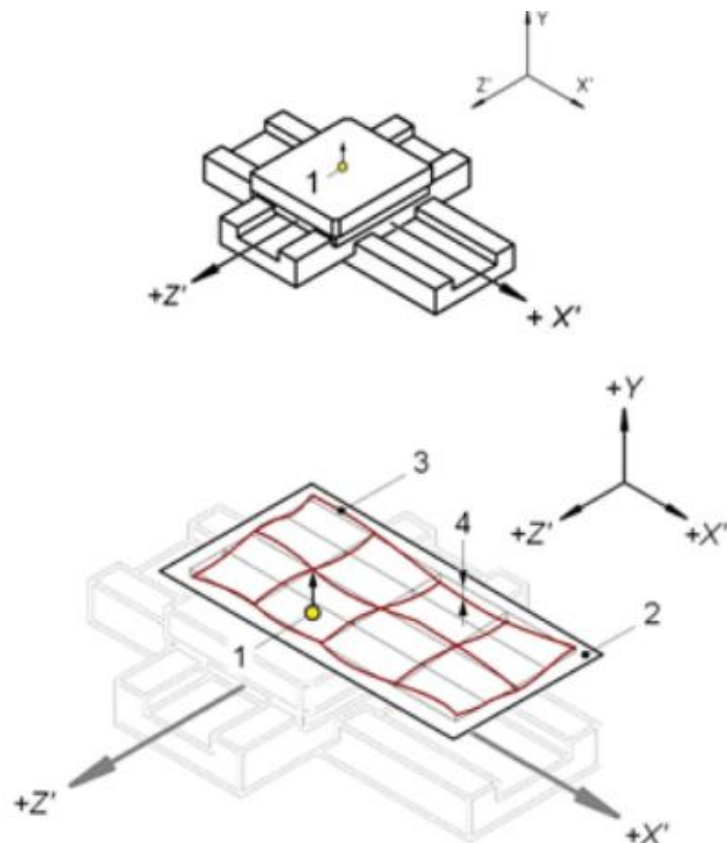


Leyenda

- 1 Trayectoria circular
- 2, 3 Círculos de zona mínima
- 4 Separación mínima en dirección radial; desviación circular

Figura 9 Desviación circular en trayectoria circular

- Planitud: se compara la superficie generada por dos ejes lineales con una superficie de referencia. La desviación de un punto de la superficie generada con respecto a la superficie de referencia es normal a esta. Se generará un mapa con las desviaciones y se obtiene un rango de valores que representará el error de planitud en toda la superficie. En la Figura 10 se tiene una representación del error de planitud.



Leyenda

- 1 Punto funcional.
- 2 Plano de referencia
- 3 Trayectoria del punto funcional
- 4 Desviación local de planitud

Figura 10 Error de planitud

3 INSTRUMENTOS DE CALIBRACIÓN

3.1. Finalidad de los instrumentos de medición

Conforme la tecnología ha ido avanzando los requerimientos y las exigencias del mercado se han vuelto más exigentes. Ello ha llevado a la industria a efectuar un control exhausto de sus máquinas para cumplir una serie de normas y tolerancias impuestas. Aquí es donde entra en juego la calibración periódica de las maquinas. La calibración de un instrumento o una maquina se basa en comparar la medida que marca el instrumento y la que debiese de indicar de acuerdo con un valor conocido. Dependiendo de los resultados de estas mediciones se procederá con las medidas correctores según los errores encontrados. Todo este procedimiento de medición se plasma en un documento denominado certificado de calibración.

Los instrumentos de medición han tenido siempre como función principal calibrar y verificar lo que se ha construido para comprobar que cumple con los requisitos dispuestos. Este proceso de medición se define como la comparación de una magnitud con su unidad de medida. Dependiendo de la manera de obtener la medida existen dos tipos de mediciones:

- Medición directa: la medida se obtiene desde la escala de medida, pantalla analógica o digital del instrumento de medición.
- Medición indirecta: este tipo de medición compara la variación de magnitud entre un patrón y la magnitud de la pieza a medir.

En la actualidad existen una infinidad de instrumentos de medición que se han ido perfeccionando o creando, conforme ha ido avanzando la tecnología para que sean más precisos y fáciles de utilizar. Los instrumentos de medición se pueden clasificar según la magnitud que mida (masa, longitud, volumen, densidad, temperatura, etc.). Una vez se conozca la magnitud a medir se procede a elegir entre instrumentos, analógicos y digitales, su precisión, su facilidad de uso y su precio.

3.2. Instrumentos de calibración para maquinas herramientas

En el campo de la metrología existe una gran variedad de instrumentos de medición cada uno con sus ventajas y desventajas. Se ha realizado un estudio sobre los instrumentos de medición más adecuados para realizar las calibraciones expuestas en el punto 4, atendiendo a sus características de uso.

3.2.1. Sensores de desplazamiento lineal

Este tipo de instrumento realiza una medición del desplazamiento lineal de un objeto para obtener resultados sobre paralelismo, rectitud, perpendicularidad, etc. En resumen, todo lo relacionado con una medición que requiera linealidad sobre un objeto base. Puede que para algunas mediciones se necesite otros instrumentos de apoyo.

Dentro de este grupo se puede encontrar una gran variedad de sensores de desplazamiento dependiendo de la tecnología que usen. Existen sensores de contacto con pantalla analógicas o también se puede encontrar sensores sin contacto gracias a los ultrasonidos o la tecnología láser. Habrá que tener en cuenta el proceso de medición y las exigencias por parte del cliente para elegir el más adecuado. Los instrumentos más utilizados de este grupo son:

- Palpadores: el componente principal de un palpador es un vástago que está en continuo contacto con la superficie a medir. Este vástago es sensible a cualquier variación en la superficie. El rango de precisión puede ir desde las décimas de milímetro hasta las centésimas de milímetro. En la Figura 11 se puede ver un palpador neumático cuya tecnología es inductiva. Se pueden encontrar muchos tipos de palpadores según su tecnología y funcionamiento.



Figura 11 Palpador neumático

- Reloj comparador: este dispositivo consta de un mecanismo que traduce el movimiento lineal del palpador en movimiento circular de las agujas indicadoras en la esfera graduada. Realiza una medición indirecta, por medio de comparación para obtener el resultado que finalmente se usará para la verificación oportuna. Puede realizar mediciones muy precisas del orden del milímetro y centésima de milímetro. Se puede encontrar relojes comparadores digitales o analógicos como el de la Figura 12.



Figura 12 Reloj comparador

3.2.2. Microscopio e hilo tenso

Este dispositivo está compuesto por un hilo de 0,1 mm de diámetro, contrapesos y un microscopio. El hilo se tensará mediante contrapesos para que se mantenga recto y sirva como referencia. El microscopio comprueba y anota todas las posibles desviaciones a lo largo del hilo. Se utiliza principalmente para comprobar la rectitud del elemento a verificar, cuando se trata de longitudes grandes.

3.2.3. Telescopio de alineamiento

Este dispositivo está compuesto de un telescopio y un receptor. El telescopio tiene un eje óptico que será la referencia para las diferentes medidas para las que se utilice. El receptor indica las desviaciones con respecto a la referencia marcada por el telescopio y va montado sobre la parte de la máquina que sujeta la herramienta. El telescopio se instala sobre la parte que soporta la pieza y se debe de asegurar que no sufre ninguna perturbación durante la medición ya que afectaría en gran medida a las mediciones.

En la actualidad se puede encontrar telescopios electrónicos, Figura 14, los cuales poseen un software que indica los resultados directamente. También existen telescopios convencionales donde el operario es el encargado de observar a través de la retícula la desviación que se haya producido. Este dispositivo se aplica principalmente para medir la rectitud, el paralelismo o la cuadratura de los componentes que se requiera.



Figura 13 Telescopio electrónico de alineamiento

3.2.4. Instrumentos con tecnología láser

Hoy en día el uso de la tecnología láser en calibraciones está muy extendido gracias a su precisión y facilidad de realizar mediciones de múltiples magnitudes dentro de una máquina herramienta. Al ser mediciones en las que el operario se encarga solo del montaje y programación del dispositivo, se pueden verificar máquinas pequeñas o de gran tamaño. Este método de calibración consta de un componente que es el generador del haz del láser y unos retroreflectores colocados estratégicamente sobre la máquina herramienta según la medición que quiera llevarse a cabo. Los datos son recogidos y manipulados por un software el cual expone los resultados para su interpretación.

- Laser Tracker: se puede decir que se trata de una máquina de medición por coordenadas (MMC) debido a que se obtiene unas coordenadas Y, X y Z relativas a la posición del retroreflector. En la Figura 15 se tiene un esquema de este dispositivo. El retroreflector proporciona la posición de su centro al emisor láser mediante tres medidas: dos mediciones de ángulos y una distancia.



Figura 14 Láser Tracker

- La interferometría láser es un método muy utilizado en la calibración de máquinas herramientas debido a su gran precisión a la hora de realizar ensayos. Este método se basa en las interferencias de las ondas mediante dos rayos de luz. Del cabezal láser sale un rayo que se desdobra en dos al pasar por el interferómetro. Estos dos rayos forman un patrón de interferencia sobre los cuales se superponen los dos rayos. Al ser la longitud de onda pequeña se podrá detectar pequeños cambios entre los rayos.

La longitud de onda del láser se verá afectado por las condiciones ambientales donde se realice las mediciones. Por ello se necesitará unos compensadores ambientales que midan las componentes ambientales del entorno para corregir las posibles variaciones de la longitud de onda. Esta compensación es automática, a través del software, y el operario no tiene que intervenir en el proceso.

Un instrumento representativo de este método de medición es el láser XL-80, Figura 16. Este dispositivo se compone principalmente del láser, interferómetro y espejos retroreflectores. El interferómetro es el encargado de desdoblar en haz en dos y los otros espejos reflejan el haz en dirección de vuelta. Se trata de un dispositivo muy completo ya que permite realizar mediciones lineales, angulares, de planitud, etc. Todos los accesorios necesarios para estas mediciones vienen incluidos en el Kit proporcionado por el fabricante.

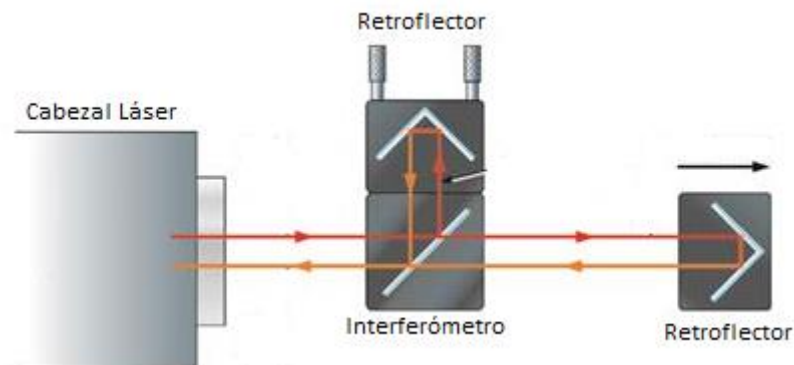


Figura 15 Esquema láser XL-80

3.2.5 Instrumentos tradicionales

Dentro de este grupo se han agrupado a unos instrumentos elementales en cualquier procedimiento de medición. En algunos se podrá obtener la medida directamente de estos instrumentos y en otros casos servirán como complementos de otros dispositivos más complejos. Los más utilizados para procedimientos de calibración son: la regla lineal, nivel de precisión, esfera patrón, escuadra patrón y sus semejantes.

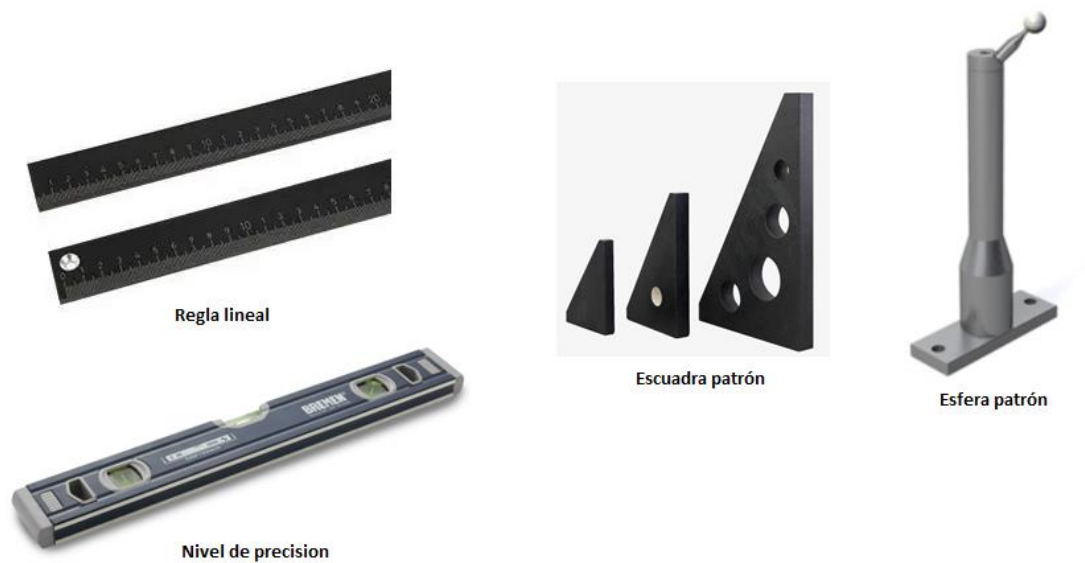


Figura 16 Instrumentos tradicionales

3.2.6 Autocolimador

Se trata de un dispositivo óptico que mide la inclinación angular de la superficie reflectora. El autocolimador proyecta un haz de luz colimado dirigido hacia un espejo el cual devuelve el haz hacia el colimador. Este espejo se encuentra situado sobre la superficie a calibrar. El operario es el encargado de visualmente detectar las posibles desviaciones. Existen también medios digitales para detectar estas desviaciones y así eliminar los errores aleatorios o sistemáticos que se pueden producir. Las mediciones más comunes que realiza este dispositivo son: paralelismo, perpendicularidad y rectitud. En general cualquier desviación producida por alteraciones angulares.

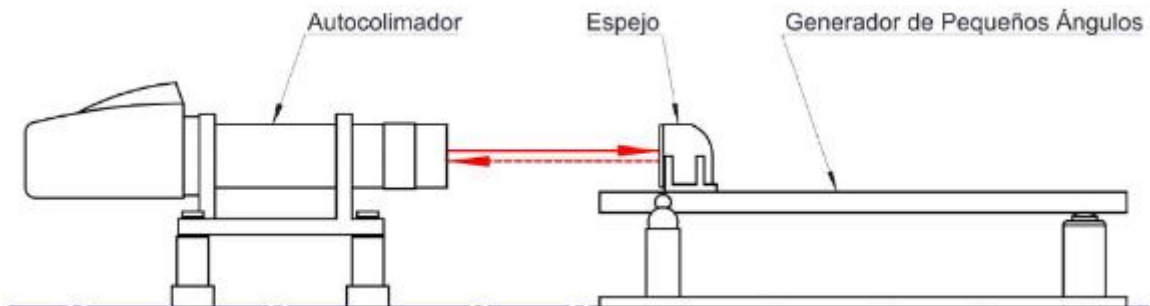


Figura 17 Autocolimador

3.2.7 Ball-bar

El Ball-Bar es sensor lineal telescópico con bolas de precisión en sus extremos cuya función es detectar cualquier desviación radial cuando se realiza una trayectoria circular. Además del sensor este dispositivo se compone de dos montajes magnéticos instalados uno en la mesa de la máquina herramienta y otro en el cabezal de la máquina o en husillo. Los datos recogidos por el Ball-Bar se envían a un ordenador donde son evaluados y finalmente expuestos en un diagrama.

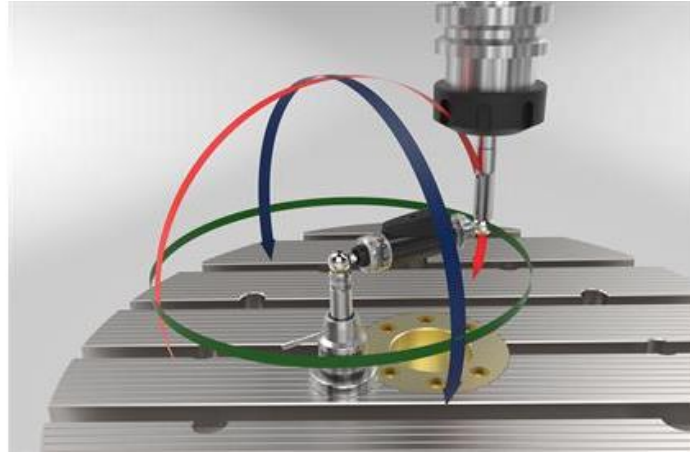


Figura 18 Ball Bar

En la Figura 19 se puede ver un Ball bar QC20-W de Renishaw. Esta marca vende este dispositivo dentro de un kit donde vienen todos los accesorios para poder llevar a cabo las mediciones correctamente. Se puede encontrar un calibrador que se utiliza cuando se midan desviaciones radiales donde el sensor debe ser calibrado antes de la toma de datos.

Se trata de un método de medición rápido de usar, fácil de montar y que proporciona numerosos datos para hallar las diferentes fuentes de error en las máquinas herramienta. El software de Renishaw proporciona una gran ayuda al tener identificados según los trazos todos los posibles errores. Además, también ayuda a prever de donde se produce este error para poder identificarlo rápidamente. En la Figura 20 se puede ver algunos de esos trazos con el nombre del error asociado.

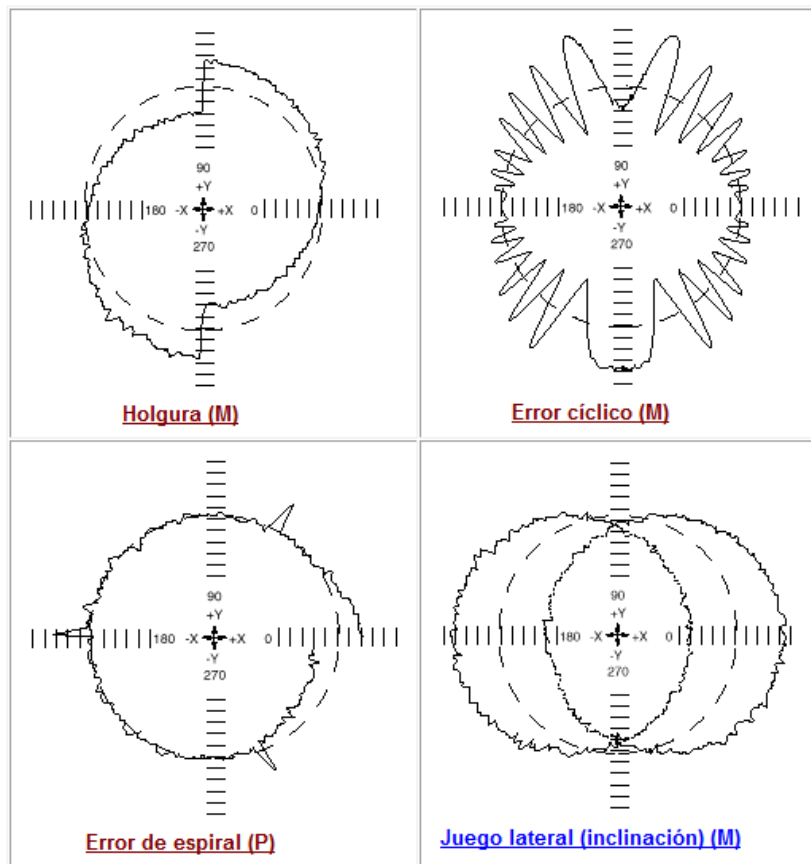
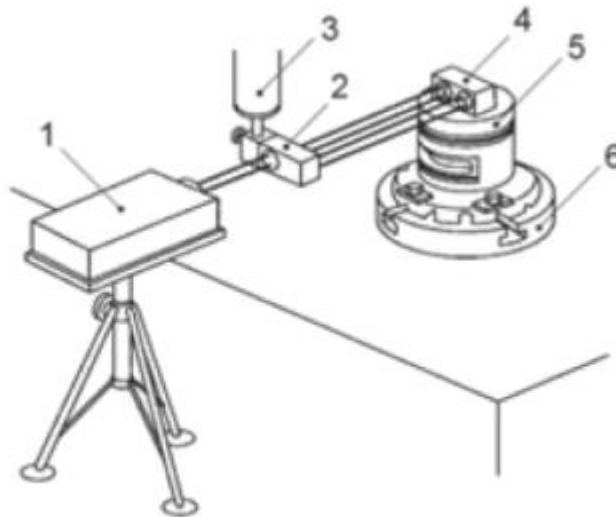


Figura 19 Trazos del Ball bar con su error asociado

3.2.8 Mesa de indexación de referencia

La mesa de indexación se utiliza como referencia para realizar verificaciones de posicionamiento angular. En el mercado existen diferentes mesas de indexación dependiendo de la precisión o posiciones. Dichas posiciones en las que estén divididas las mesas son los puntos de verificación de la máquina herramienta.

Las mesas de indexación se instalan en el componente que gira. Estos dispositivos se pueden combinar con otros dispositivos de medición o en algunos casos utilizarlos de manera independiente. Por ejemplo, se puede utilizar la mesa de indexación con un láser interferómetro, Figura 21, que hará que las medidas sean bastante precisas.



Leyenda

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1 Cabezal del laser | 4 Retroreflector dual |
| 2 Interferómetro con espejo angular | 5 Mesa de indexación de referencia |
| 3 Cabezal del husillo | 6 Eje de giro bajo análisis |

Figura 20 Mesa de indexación de referencia

3.2.9 Encoder rotativo de referencia

El Encoder rotativo de referencia se puede utilizar para medir el posicionamiento angular y además también para medir la velocidad y aceleración de un eje rotatorio. Su funcionamiento consiste en un disco con ranuras adosado al eje que se vaya a medir. Según el disco gire dejará pasar luz o no, lo que hace que se genere una secuencia de pulsos digitales que se utilizan para controlar las magnitudes comentadas anteriormente. La figura 22 muestra un esquema del proceso de medición con un Encoder rotativo de referencia.

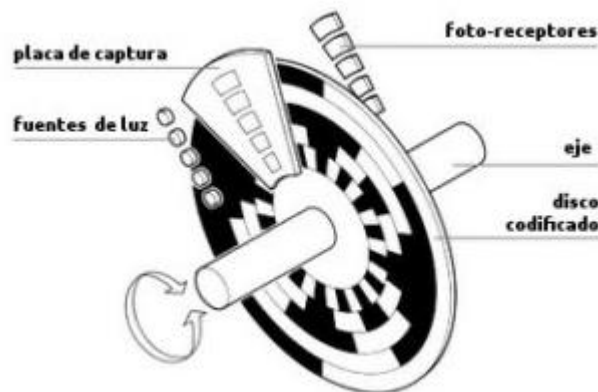


Figura 21 Encoder rotativo de referencia

4 ENSAYOS

4.1. Presentación

Una máquina herramienta puede tener varias fuentes de error debidos a múltiples causas ya sean propias de su montaje o externas por deterioro de sus componentes. Es vital mantener la maquina correctamente calibrada para cumplir con las exigencias del cliente y de las normas de calidad globales. Por ello en el campo de la metrología se han desarrollado numerosas técnicas de calibración que cubran todo tipo de error y lo reduzcan al mínimo.

Según la naturaleza de la maquina y su cometido su estructura variará y tendrá un mayor o menor número de ejes de movimiento. Por ejemplo, un torno convencional consta de 2 ejes de movimiento y una fresadora dispone de 3 ejes. Por este motivo es crucial realizar un estudio de todos los posibles ensayos de calibración que se pueden realizar a los ejes o componentes móviles de una máquina herramienta. Para llevar a cabo estos ensayos de calibración se hará uso de los instrumentos de medición expuesto en el punto 3.2. Según la manera que se monte algunos instrumentos de medición pueden ser utilizados para diferentes ensayos.

La incertidumbre asociada al ensayo de medición es algo fundamental que debe quedar detallado junto con el procedimiento de calibración. Debido a la influencia que tienen tanto a agentes externos como internos en los resultados de la medición, en 1995 la ISO publicó la primera edición de la Guía para la expresión de la Incertidumbre de la Medida (GUM). Con esta guía quedó definida el concepto de incertidumbre, como calcularla y la manera de expresarla para cualquier ensayo de calibración.

4.2. Condiciones previas al ensayo

Un paso importante, antes de comenzar a exponer los procedimientos de medición y toma de datos, es la verificación de ciertos aspectos del lugar de trabajo y de la máquina que confirmen la correcta operatividad de la máquina herramienta. Es conveniente instalar la máquina herramienta sobre una base que aisle los ensayos de cualquier tipo de vibraciones. Las vibraciones afectan principalmente a las propiedades geométricas de la máquina herramienta por lo que los ensayos de rectitud, paralelismo, perpendicularidad, etc., pueden verse afectados. Se tiene que analizar y documentar dichas vibraciones para tenerlas en cuenta en la presentación de los resultados. Se recomienda realizar un nivelado para conseguir un equilibrio estático de la máquina y así conseguir unas medidas más exactas.

En cuanto a las condiciones ambientales en la que es debe de encontrar la máquina herramienta, la temperatura óptima de medición es 20 ° C. La máquina consta de elementos que se mueven y varían su forma debido al calentamiento durante el proceso. Debido a que los ensayos trabajan en vacío, la intención es que estas mediciones se acerquen lo máximo a su funcionamiento normal y los componentes de la maquina estén en equilibrio con la temperatura del entorno. Puede darse el caso que la temperatura no concuerde con la idónea para realizar la medición, en ese caso se tiene que aplicar un coeficiente de corrección entre el objeto y el sistema de medición.

Todos los ensayos de calibración se componen de una estructura que abarca tanto el elemento de referencia como el elemento que se encarga de medir las correspondientes desviaciones. Esta configuración se debe de comprobar que funciona y se adecua correctamente en el entorno de la máquina herramienta. Para ello se sugieren dos pruebas antes de comenzar con las calibraciones: prueba de histéresis y prueba de estabilidad del montaje.

4.2.1 Prueba de histéresis de montaje

Con esta prueba principalmente lo que se pretende es cuantificar, si existiese, cualquier tipo de holgura de montaje que afecte a los resultados. Esta holgura de montaje se puede deber a que hay elementos de

sujeción no instalados o que los soportes no posean la rigidez suficiente para soportar el proceso de medición. La pérdida en la repetibilidad de los resultados es un claro indicador de histéresis u holgura de montaje. En el caso de obtener una histéresis significativa y aún después de ajustar la estructura de medición no se reduce esta histéresis, quiere decir que el problema puede ser propio de la máquina. El límite de aceptación de histéresis es el 10% de la repetibilidad que se desea conseguir.

Se deben seguir los siguientes pasos para realizar esta prueba:

- 1) Se instala y se ajusta a cero el reloj comparador entre las fijaciones que sostienen el elemento de referencia, en la misma dirección y sentido que el eje que se vaya a medir.
- 2) Se aplica manualmente una fuerza sobre la fijación. Esta fuerza puede variar entre 20 N y 200 N, pero se recomienda utilizar 40 N. No es necesario llevar un control exacto de la fuerza a aplicar.
- 3) Dejar de aplicar esta fuerza progresivamente hasta cero. Anotar lo que marca el reloj comparador.
- 4) Realizar los pasos 2) y 3) pero con una fuerza en una dirección opuesta.
- 5) La diferencia de ambas mediciones da como resultado la histéresis de la fijación del elemento de referencia.
- 6) Realizar los pasos 2) hasta 5) actuando sobre el soporte del comparador.
- 7) La suma de ambas histéresis dará el valor total de histéresis para el montaje.

4.2.2 Prueba de estabilidad

En las máquinas herramienta se pueden producir vibraciones de todo tipo, las cuales pueden provenir tanto de fuentes externas como internas. Un incorrecto montaje de los instrumentos de medición puede hacer que los resultados de las mediciones sean muy sensibles a las vibraciones. Habrá que seguir estos pasos para realizar la prueba de estabilidad del montaje de los instrumentos de medición y así poder eliminar o disminuir el impacto que pueda llegar a tener en la incertidumbre de las mediciones.

- 1) Se monta el instrumento de la manera prevista para el ensayo de calibración.
- 2) Se coloca la máquina herramienta en la mitad del recorrido.
- 3) Sin mover la máquina, se muestran los resultados de la prueba para un ritmo y tiempo iguales a los del ensayo.

4.3. Tipos de ensayo según el error a medir

La mayoría de los ensayos de calibración descritos a continuación se aplican a los ejes de una máquina herramienta. La calibración de los ejes de la máquina herramienta es la más importante, ya que es donde principalmente afecta el error y por consiguiente al acabado de la pieza final. La mayoría de estos ensayos se pueden utilizar sobre las superficies funcionales de la máquina herramienta. Las superficies funcionales de una máquina herramienta se refiere a las superficies que constantemente están en contacto dinámico con otras.

4.3.1 Rectitud

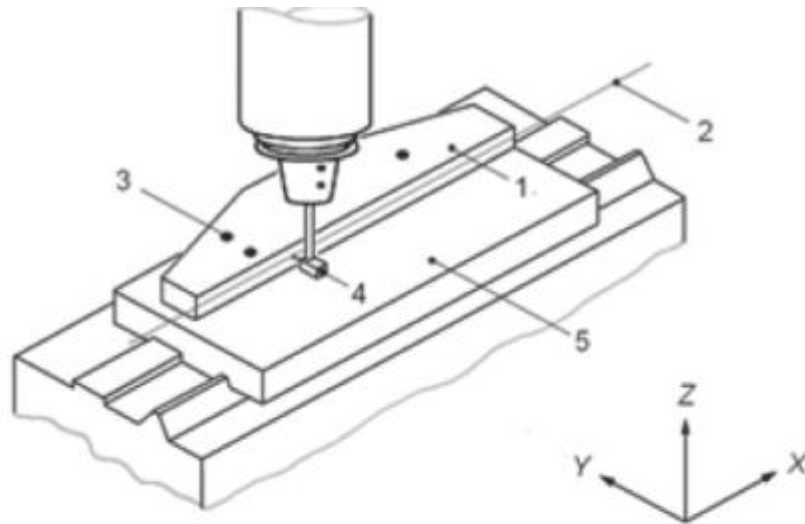
Los ensayos de rectitud se realizan sobre trayectorias lineales para detectar posibles desviaciones o distorsiones en el movimiento. Dichas desviaciones se producen en las dos direcciones perpendiculares a la dirección de movimiento de la trayectoria lineal. Estos errores pueden afectar a la rectitud del desplazamiento, planitud de la superficie o la forma, orientación y posición de las propiedades de la pieza elaborada.

La base de estos ensayos se encuentra en medir los desplazamientos relativos con respecto a una referencia de rectitud. Esta referencia de rectitud puede ser algo físico (regla lineal, cable tenso) o un rayo de luz producido por un dispositivo óptico. El dispositivo de medición facilitará la diferencia existente entre la referencia de rectitud y el desplazamiento lineal a medir.

La medición se realizará en varios puntos sobre una cierta longitud del desplazamiento del eje lineal en cuestión. La longitud del eje está relacionada con el número de intervalos sobre los que se realizará las mediciones. Para ejes de 250 mm de recorrido los intervalos deberán de ser de 25 mm y para ejes con un recorrido más largo los intervalos no pueden superar el 1/10 de su longitud.

A continuación, se detalla los ensayos que se pueden realizar según el instrumento que se utilice:

- Regla y sensor de desplazamiento lineal: la referencia de rectitud es una regla sobre la cual se posiciona el sensor de desplazamiento. El sensor se debe de colocar lo más próximo al punto funcional. La medición se realizará desplazando el dispositivo a lo largo de la regla y anotando las distorsiones obtenidas en los puntos de medición calculados.

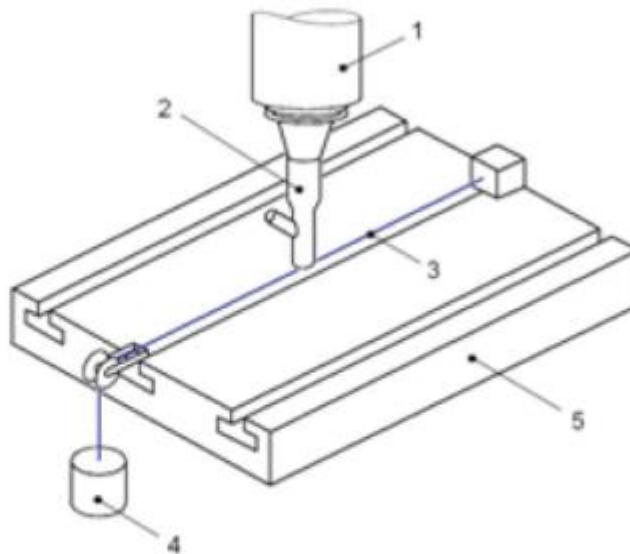


Leyenda

- 1 Regla de referencia
- 2 Línea de medición
- 3 Puntos de apoyo de la regla de referencia (3) en ambas caras
- 4 Sensor de desplazamiento lineal
- 5 Mesa de la máquina

Figura 22 Montaje del sensor de desplazamiento y regla

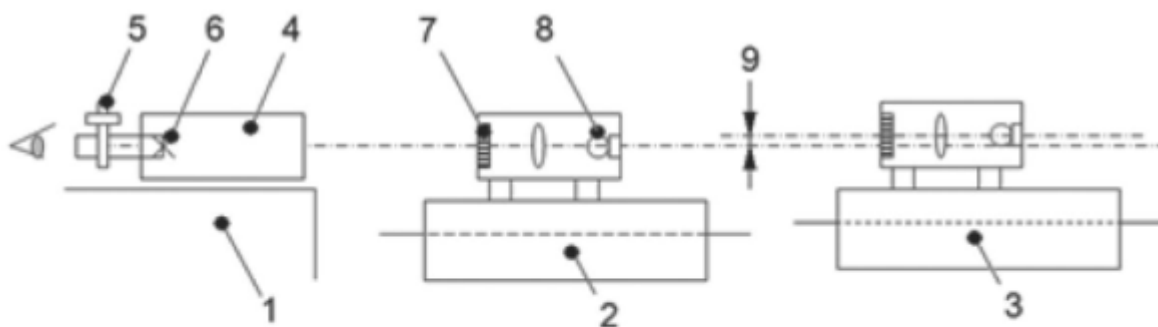
- Microscopio e hilo tenso: el elemento de referencia, el hilo, se coloca en dirección paralela a la dirección de movimiento lineal. La diferencia o distorsión que se produce con respecto a esta referencia se mide con un microscopio instalado en el husillo de la máquina herramienta. Normalmente esta técnica se usa para máquinas de grandes dimensiones. No se recomienda que se utilice este método para medir el error de rectitud en el plano vertical debido a que es muy complicado medir la curvatura del hilo en esta posición. En la Figura 23 se tiene un esquema del montaje de estos elementos en una máquina herramienta.



- Leyenda
- 1 Husillo
 - 2 Microscopio
 - 3 Hilo tenso
 - 4 Peso
 - 5 Mesa

Figura 23 Montaje del microscopio e hilo tenso.

- Telescopio de alineamiento: este dispositivo generará un eje óptico de referencia sobre el cual se realizará las mediciones. Debe ajustarse lo máximo posible para que sea similar al eje de movimiento lineal. El telescopio se situará en la mesa de la máquina herramienta y el receptor en el componente que soporta la herramienta, lo más próximo al punto funcional. Las diferencias con el eje de referencia se leerán directamente sobre la retícula o mediante un micrómetro óptico. En ciertas ocasiones se puede producir un movimiento involuntario de la mesa donde está sujeto el telescopio lo cual puede producir interferencias en las mediciones. Para ello se aconseja instalar el telescopio con un soporte para fijarlo rígidamente a la mesa. Se observa en la Figura 24 un esquema del montaje de este dispositivo y la posible desviación que detecta.



- Leyenda
- 1 Cara de la pieza (mesa)
 - 2 Cara de la herramienta (posición 1)
 - 3 Cara de la herramienta (posición 2)
 - 4 Telescopio
 - 5 Lector micrométrico
 - 6 Reticula
 - 7 Receptor
 - 8 Emisor de luz
 - 9 Desviación obtenida

Figura 24 Montaje del telescopio de alineamiento

- Interferómetro laser de rectitud: en este caso la referencia de rectitud se define con el eje de simetría del reflector de doble espejo (reflector de rectitud). El interferómetro de rectitud es el encargado de detectar las desviaciones con respecto al eje de simetría. Este elemento es el encargado de dividir el haz en dos y dirigirlos hacia el reflector de rectitud. Después de pasar por el reflector de rectitud ambos haces convergen en el interferómetro de rectitud y este envía un solo haz hacia el cabezal láser. El reflector de rectitud se monta sobre la mesa y el interferómetro de rectitud en el componente que soporta la herramienta.

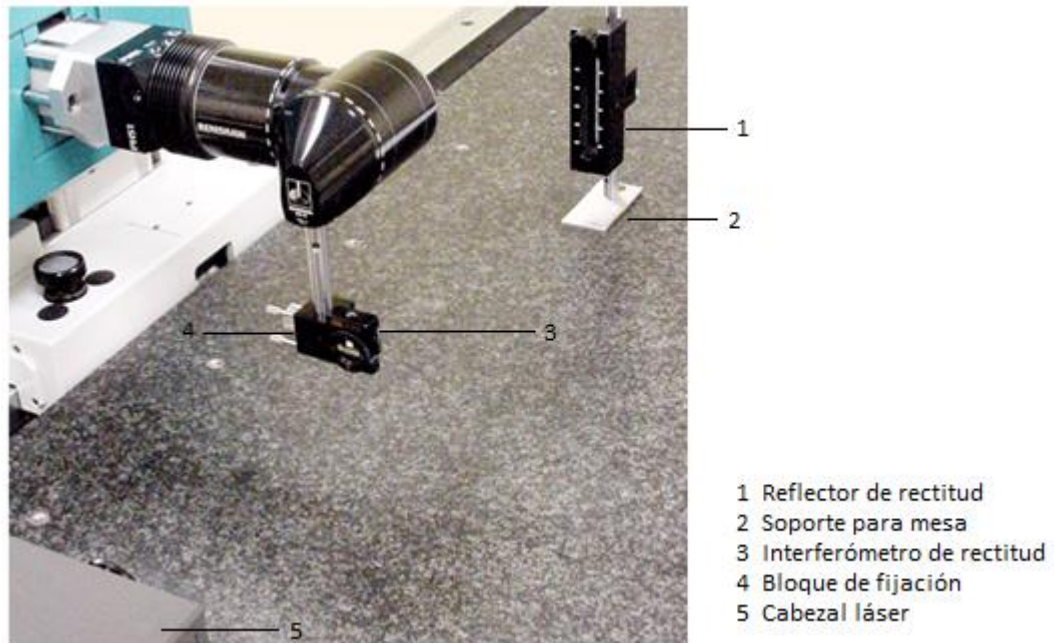


Figura 25 Montaje del láser interferómetro de rectitud

4.3.2 Movimiento de posicionamiento lineal

La calibración de posicionamiento lineal se basa en medir la distancia recorrida por el componente móvil de la máquina herramienta según el eje que se requiera. Se posiciona de manera manual o mediante control numérico en la posición deseada y se anota el valor por medio de los instrumentos de medición más adelante descritos. La diferencia entre el valor previsto y el dato medido es la desviación lineal de posicionamiento.

Las posiciones donde se realizarán las mediciones pueden estar acordadas con el cliente o puede que sean de elección libre. En este último caso habrá que registrarse por la ecuación, para el cálculo de las posiciones de medición:

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (4)$$

Donde i se refiere al número de la posición, p es un intervalo equiespaciado a lo largo del recorrido de medición y r es un número que debe de encontrarse entre $\pm 30\%$ de p . La longitud del eje lineal influye de manera que si mide hasta 2000 mm el número mínimo de posiciones seleccionadas es de 5 y habrá que realizar un ciclo de ensayo normal. Para ejes con una longitud mayor el intervalo puede tener un promedio de 250 mm y debe de realizarse una medición en cada sentido de aproximación. En el caso de máquinas de gran tamaño con ejes de más de 4000 mm, las posiciones de medición deben de ser acordada entre fabricante/suministrador y el usuario.

Los principales instrumentos de medición para este ensayo son:

- Interferómetro láser: el proceso de calibración y el montaje es similar al ensayo de rectitud descrito en el apartado anterior. Para la medición del posicionamiento este dispositivo se compone de un cabezal láser, un interferómetro y unos reflectores lineales como elementos principales. Uno de los reflectores lineales se monta junto al interferómetro sobre la parte que soporta la herramienta y el otro sobre la parte de la mesa de la máquina herramienta. Para fijar estos elementos a la máquina herramienta se hará

uso de bloques y soportes de fijación. El haz de láser debe ser lo más paralelo posible al movimiento para poder evitar errores de coseno. Además, se deberá de hacer uso de los sensores de aire, que se instalan cerca de la trayectoria de la luz para compensar la refracción del aire.

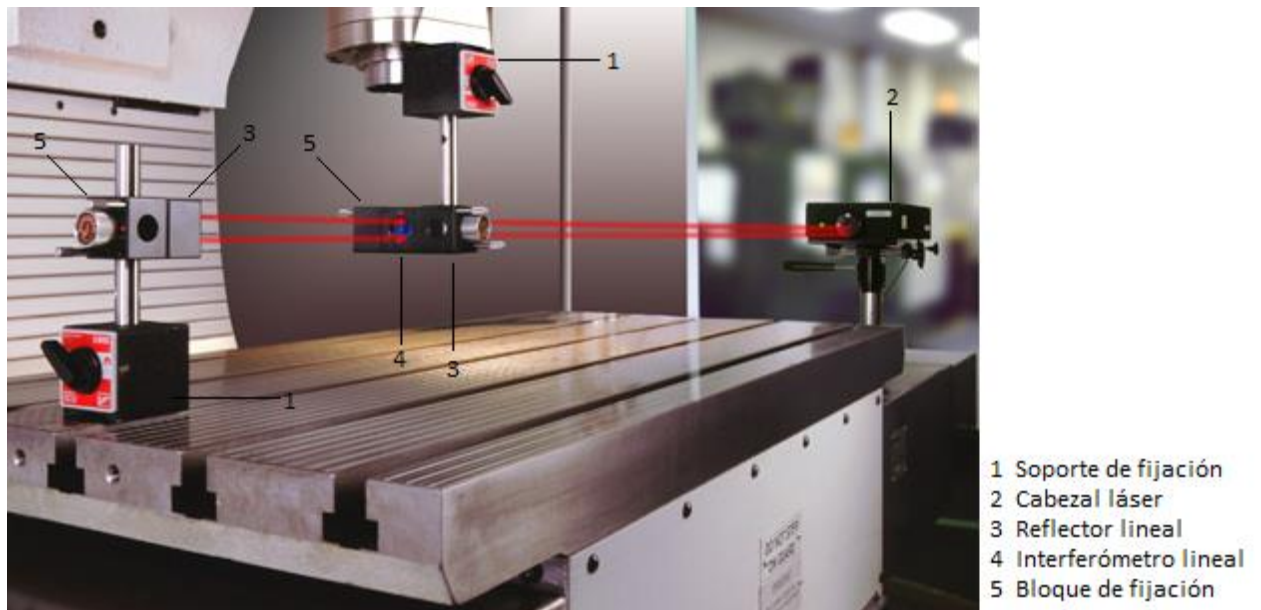


Figura 26 Montaje del interferómetro láser de posicionamiento

- Regla lineal: el ensayo se compone solamente de una regla lineal. Para una correcta lectura de las desviaciones se posicionará la regla en la mesa de la máquina y deberá también estar en contacto con la parte de la máquina la herramienta que sujeta la herramienta. La regla debe de ser lo más paralela al movimiento para así evitar errores de coseno.

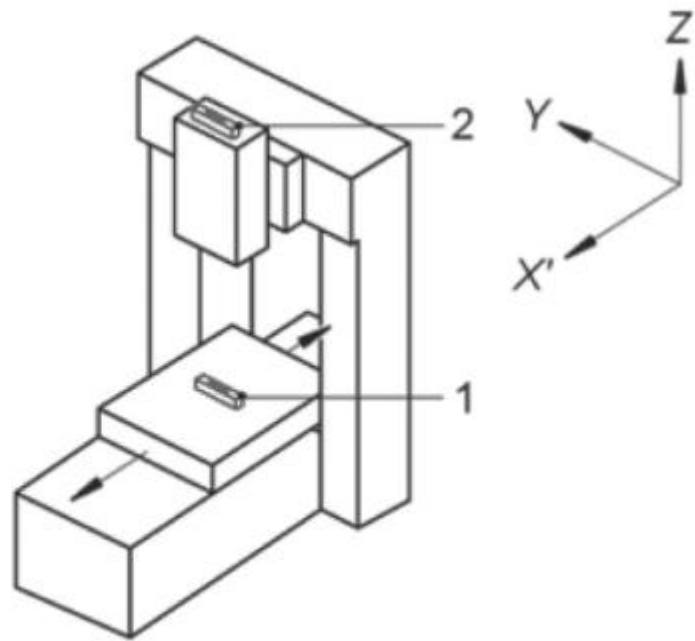
4.3.3 Movimientos angulares

Durante un desplazamiento lineal pueden aparecer movimientos angulares como el alabeo, balanceo y cabeceo. Para poder hallar estas inexactitudes sobre la trayectoria lineal se instalan dispositivos de medición de ángulos entre la parte de la máquina que sujeta la pieza y la parte de la herramienta que sujeta la herramienta. La medición se realizará en una serie de posiciones programadas mientras un componente móvil se desplaza a lo largo de su eje lineal.

Para la elección de las posiciones a medir se tomará en cuenta que para ejes de hasta 250 mm los intervalos no serán mayores a 25 mm y para ejes de mayor envergadura el intervalo no será más grande que 1/10 de la longitud del eje. Se debe cerciorar que la maquina se mantiene en reposo el tiempo necesario para la toma de datos en cada posición. Al menos se realizará un conjunto de mediciones unidireccionales en de todas las posiciones.

Atendiendo a los principios de medición se utiliza un interferómetro laser o autocolimador para medir el cabeceo o la guiñada y niveles de precisión para medir el balanceo.

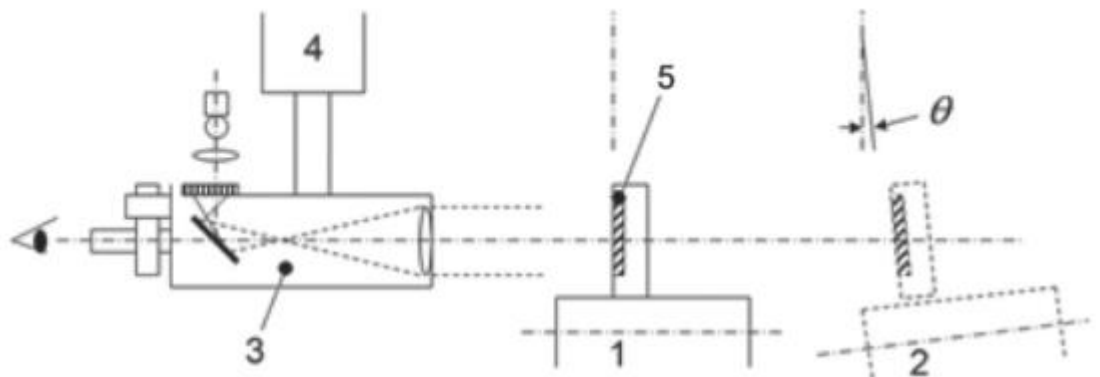
- Nivel de precisión: se hará uso de dos niveles de precisión. Uno de ellos actúa a modo de referencia, instalado en la parte de la máquina que sujeta la pieza. El otro se situará en la parte de la maquina a medir y es el encargado de detectar las desviaciones a lo largo del eje. Se realizará mediciones diferenciales entre ambos niveles de precisión a lo largo de unos puntos definidos en una trayectoria lineal.



- Leyenda
- 1 Nivel de medición
 - 2 Nivel de referencia

Figura 27 Montaje del nivel de precisión

- Autocolimador: este dispositivo es capaz de obtener una medición relativa entre la parte de la máquina que sujeta la pieza y la parte de la máquina que sujeta la herramienta. Por un lado, se montará el autocolimador en el componente estático de la máquina coaxialmente con el eje de movimiento. El espejo receptor será el encargado de dar el dato del desplazamiento vertical, con el cual se puede saber el ángulo girado. Existen también algunos tipos de autocolimadores capaces de hacer dos mediciones simultáneas y así poder obtener el cabeceo y la guiñada.



- Leyenda
- 1 Mesa (lado de la pieza, posición 1)
 - 2 Mesa (lado de la pieza, posición 2)
 - 3 Autocolimador
 - 4 Husillo de la máquina (lado de la herramienta)
 - 5 Espejo receptor
 - θ Desviación angular medida

Figura 28 Montaje del autocolimador

- Interferómetro láser: como se podrá ir viendo este dispositivo puede ser utilizado para varias mediciones dependiendo de los espejos que se utilicen. El reflector angular va montado en la parte de la máquina que sujeta la herramienta y el interferómetro angular en la parte de la máquina que sujeta la pieza. El

software detectará cualquier rotación del reflector angular con respecto al interferómetro angular por medio del recorrido de los haces. Las mediciones se llevarán a cabo en unas posiciones definidas a lo largo del recorrido del eje.

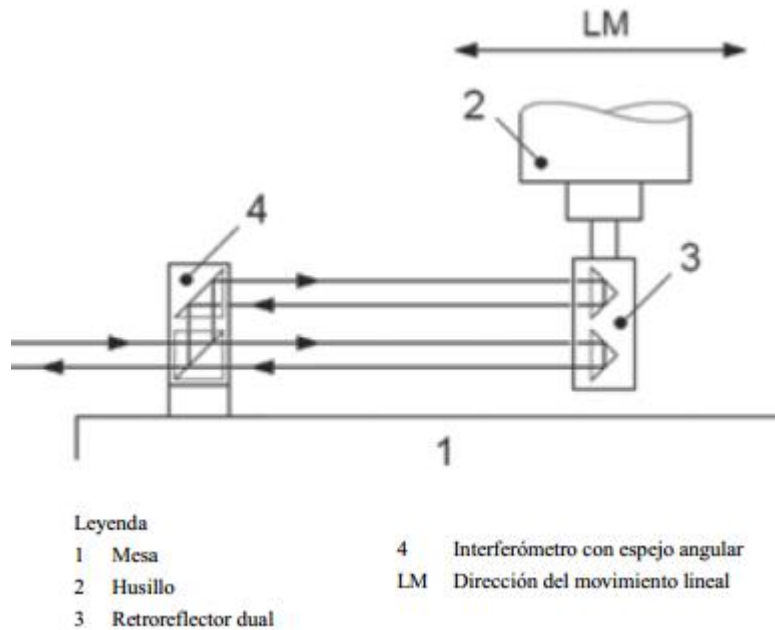
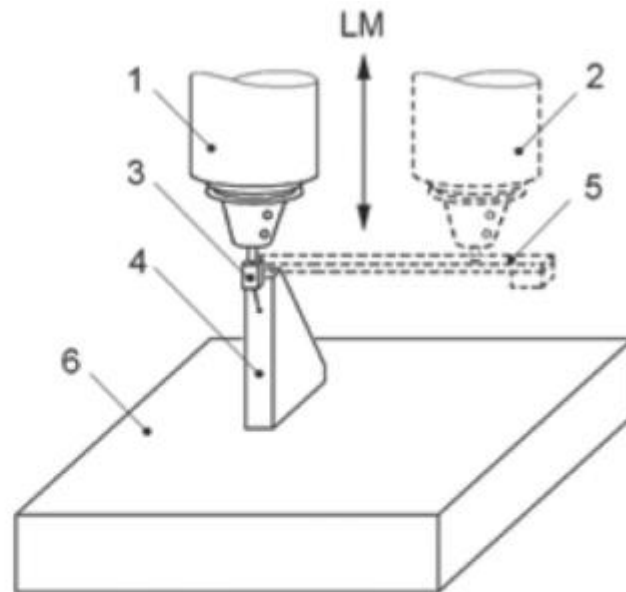


Figura 29 Montaje del interferómetro láser angular

- Método de las mediciones diferenciales de rectitud: este método puede llegar a ser un poco más laborioso que los otros ya que se deberá de realizar dos mediciones de rectitud. Esta medición se puede realizar sobre cualquier elemento móvil vertical y se necesitará una escuadra vertical y un sensor de desplazamiento lineal.

Se realizan dos procesos de mediciones de rectitud en paralelo. Primero se instalan los instrumentos para medir la rectitud perpendicular al movimiento del desplazamiento del elemento móvil en una posición del husillo. Luego se moverá el husillo a una segunda posición y con ayuda de un accesorio de extensión sobre el que se instalará el sensor de desplazamiento lineal, se medirá de nuevo la rectitud sobre la cara de referencia de la escuadra. La diferencia entre los valores de las medidas locales de la desviación de rectitud en dicha posición, divididas entre las posiciones del husillo dará como resultado el balanceo que se produce.

Debido a que se traslada un componente de la máquina herramienta en una dirección distinta a la del movimiento vertical, se debe corregir la medición o en su defecto trasladar la escuadra a la posición 2 y ajustarla mediante un nivel de precisión. El esquema de esta medición queda plasmado en la Figura 30.



Leyenda

- | | |
|----|--|
| 1 | Husillo (posición 1) |
| 2 | Husillo (posición 2) |
| 3 | Sensor de desplazamiento lineal |
| 4 | Escuadra (o regla montada aproximadamente perpendicular a la mesa de la máquina) |
| 5 | Accesorio de extensión equilibrado (solo para la posición 2 del husillo) |
| 6 | Mesa |
| LM | Dirección del movimiento lineal |

Figura 30 Montaje para el método de mediciones diferenciales

4.3.4 Movimiento angular de posicionamiento

Las máquinas herramientas constan de ejes giratorios susceptibles también de contener errores y hacer que los resultados de sus movimientos no sean precisos. Habrá que diferenciar entre dos tipos de máquinas según la capacidad de posicionamiento: discreto o continuo. Una máquina discreta no tiene la posibilidad de situarse entre dos valores consecutivos, todo lo contrario, a una máquina continua la cual puede situarse en cualquier punto de un intervalo. Ambos tipos de posicionamiento de los ejes giratorios pueden ser ejecutados mediante CNC y en concreto para los ejes de posicionamiento discreto pueden ser ejecutados mediante control manual o controlador lógico programable.

La resolución de la medición en el caso de los ejes de posicionamiento continuo dependerá del dispositivo que se use. Para el otro método, ejes de posicionamiento discreto, la resolución depende de los elementos mecánicos de indexación que van desde los 90° hasta $0,5^\circ$.

Como en todos los métodos anteriores la medición se realizará entre la parte de la máquina que sujeta la herramienta y la parte de la herramienta que sujeta la pieza. Para ejes de hasta 360° se tomará 3 posiciones en el intervalo de 0° a 90° , 5 posiciones en el intervalo de 90° a 180° y 8 posiciones para el intervalo de 180° a 360° . Dentro de este grupo de posiciones programadas deberán incluirse los ángulos 0° , 90° , 180° y 280° . Las posiciones que se elijan deben de ser alcanzadas cinco veces en cada sentido. Para ejes mayores de 360° se ensayará sobre el recorrido total hasta 1800° y se elegirán 8 posiciones por vuelta, las cuales se alcanzarán mediante una aproximación en una dirección. Puede darse el caso que las posiciones seleccionadas no puedan alcanzarse debido al dispositivo de referencia o el paso mínimo de indexación de la máquina. En ese caso, se redefinirá las posiciones atendiendo a esas características.

En los siguientes puntos se exponen diferentes dispositivos que se pueden usar para realizar estas mediciones:

- Polígono de referencia con autocolimador: se utiliza un polígono óptico de referencia y un autocolimador para comprobar las posibles desviaciones. El polígono se situa concéntrico al

componente giratorio de la máquina y ha de cumplirse el paralelismo entre las superficies del polígono y el componente giratorio. Además, debe de ser ortogonal al eje de simetría del componente giratorio. El autocolimador va montado en el componente no giratorio, por ejemplo, el husillo.

Una de las cosas para tener en cuenta a la hora de seleccionar un polígono de referencia es que los incrementos del componente giratorio tendrán que ser múltiplo o coincidir con los ángulos del polígono de referencia.

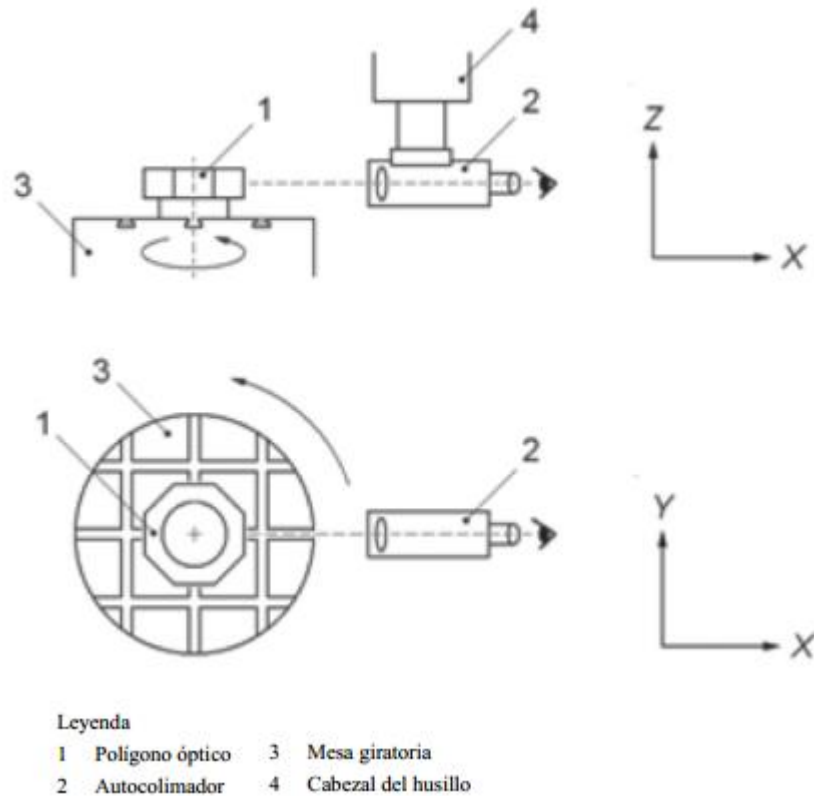


Figura 31 Montaje del autocolimador y polígono de referencia

- Mesa de indexación de referencia con interferómetro láser/autocolimador: en este caso se usa una mesa de indexación como referencia, la cual se fijará al componente giratorio a medir. Sobre esta se monta un espejo reflector perpendicular al haz láser que se proyectará. Fuera del componente giratorio se instalará el interferómetro láser. La mesa de indexación de referencia girará en sentido contrario al componente giratorio para que el espejo reflector mantenga siempre la misma orientación. En la figura 32 se puede ver el montaje del interferómetro y la mesa de indexación comentado.

Se podrá usar la mesa de indexación de referencia con autocolimador siempre que el polígono disponga de ángulos múltiplos del mínimo paso de indexación del eje rotativo a medir. El autocolimador se instalará igual que el punto anterior.

Con el interferómetro se puede detectar errores de movimiento angular hasta $5''$. Por lo que este dispositivo es recomendable para ejes de posicionamiento continuo. La incertidumbre de medición aumenta con ángulos mayores a $20''$.

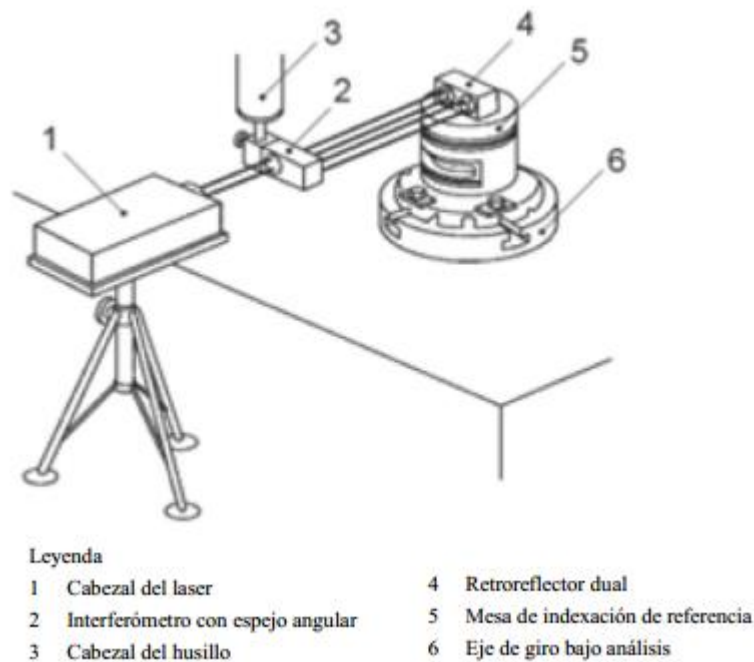


Figura 32 Montaje interferómetro y mesa de indexación

- Encoder rotativo de referencia: la parte que gira de este dispositivo debe ir alineado con el eje de giro de la máquina. Por otro lado, el componente fijo del Encoder se situará en la parte estática de la máquina. Este dispositivo no se usará para máquinas que necesitan moverse axialmente para funcionar. La desviación del posicionamiento angular se medirá según el valor proporcionado por el Encoder comparándolo con el valor previsto.

4.3.5 Paralelismo de los ejes de movimiento

En este punto se trata las posibles desviaciones de paralelismo que se pueda detectar sobre dos ejes lineales de movimiento. Las características de este proceso de medición tienen muchas similitudes con los ensayos de rectitud. Es por este motivo por lo que muchos de los atributos del proceso se obtienen o calculan de la misma manera. Dentro de una máquina herramienta se pueden encontrar múltiples ejes sobre los que realizar este ensayo de paralelismo. Por ello se ha separado las mediciones de paralelismo en diferentes puntos según los ejes que se midan.

4.3.5.1 Paralelismo entre dos ejes de movimiento lineal

- Método de la desviación de un punto fijo: para este método se utilizará un sensor de desplazamiento lineal que se colocará sobre uno de los componentes móviles de tal manera que el palpador toque un punto del otro componente móvil de la máquina. Este dispositivo medirá el desplazamiento perpendicular a su eje de movimiento. Ambos componentes móviles deberán de moverse en la misma dirección y longitud, como puede verse en el esquema de montaje de la Figura 33.

Con las medidas del sensor de desplazamiento se podrá definir la línea de rectitud de referencia. El ángulo de inclinación de la línea de rectitud de referencia con respecto a la dirección nominal de movimiento será el error de paralelismo entre los ejes de movimiento.

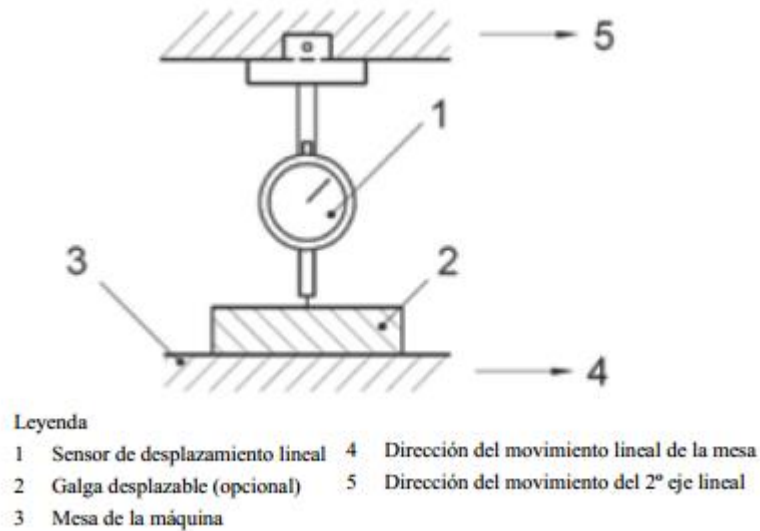


Figura 33 Montaje sensor de desplazamiento

- Método basado en las mediciones de los errores de movimiento lineal: se mide la rectitud de los componentes móviles por separado utilizando los dispositivos definidos en el apartado 4.3.1. Una vez obtenido los resultados el error de paralelismo se calcula sumando algebraicamente las pendientes de las dos líneas de referencia con respecto a la línea de referencia de rectitud.

4.3.5.2 Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje fijo

- Mandrino de control y sensor de desplazamiento: en este caso se instala un mandrino de control sobre el eje fijo y el sensor de desplazamiento sobre el componente móvil. El palpador del sensor de desplazamiento se situará sobre el mandrino de control y es el encargado de medir, en las posiciones definidas, las posibles alteraciones entre ambos ejes. Las mediciones del sensor de desplazamiento sirven para elaborar la línea de rectitud de referencia. El error de paralelismo será el ángulo de la pendiente de dicha línea con respecto la dirección nominal de movimiento.

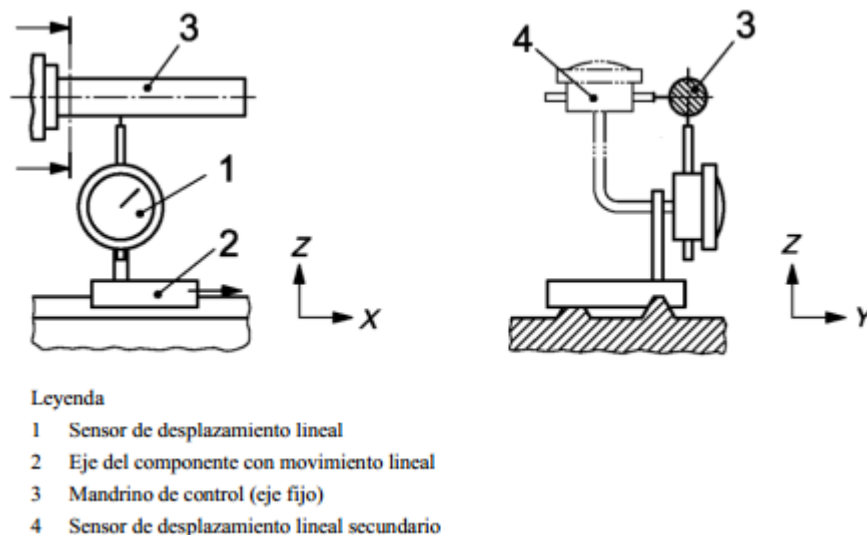


Figura 34 Montaje de sensor de desplazamiento y mandrino

4.3.5.3 Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje de revolución

- Interferómetro laser de rectitud: en este caso el reflector de rectitud se instala sobre el componente giratorio. Se tiene que comprobar que el eje de medición este alineado con el eje de revolución. Se realizarán unas primeras mediciones con el componente giratorio en una posición angular inicial y a

continuación se repite las mediciones girando el componente giratorio 180°. El error de paralelismo se calcula como la mitad de la suma algebraica de las pendientes de las líneas de rectitud de referencia con respecto a la dirección nominal de movimiento lineal en las dos posiciones angulares del eje giratorio.

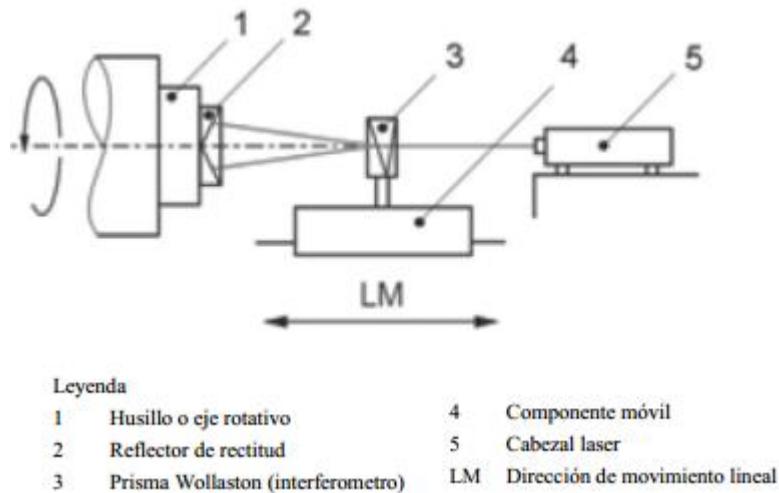


Figura 35 Montaje interferómetro de rectitud

- Mandrino de control o una regla y un sensor de desplazamiento lineal: en este caso se coloca el mandrino de control sobre el componente giratorio y el sensor de desplazamiento sobre el componente móvil. El operario debe asegurarse que el palpador este en contacto con el mandrino de control durante todo el recorrido de la medición. Al igual que el caso anterior primero se hace unas mediciones con el componente giratorio en una posición angular inicial y luego se repite el procedimiento, pero girando el componente giratorio 180°. El error de paralelismo se determina mediante la mitad de la suma algebraica de la pendiente de las líneas de referencia de rectitud con respecto a la dirección nominal de desplazamiento para dos posiciones angulares.

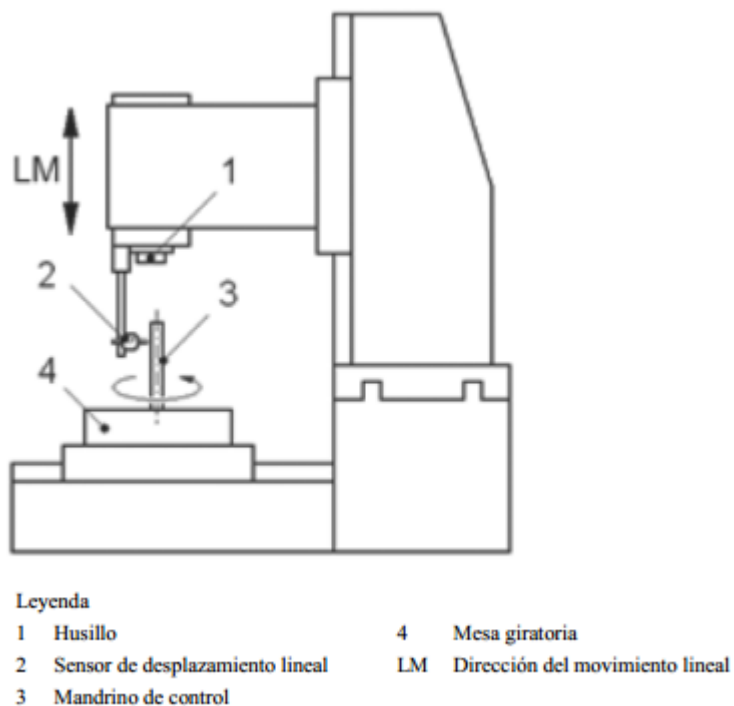
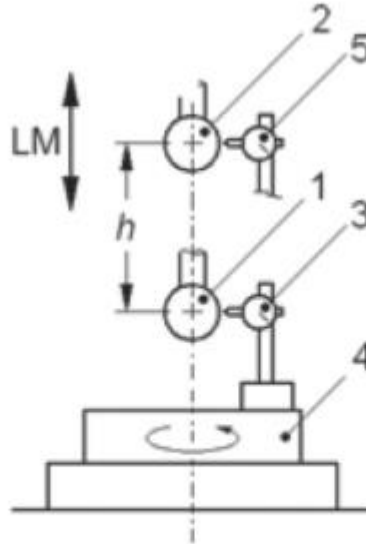


Figura 36 Montaje mandrino y sensor de desplazamiento

- Esfera patrón y un sensor de desplazamiento lineal: la esfera patrón se instala en el componente móvil asegurando que se coloca en el centro con respecto al componente giratorio y el sensor de desplazamiento lineal en el componente giratorio. Las medidas se realizarán moviendo una distancia h

el componente móvil y desplazando el sensor hasta la nueva posición para tomar las medidas. El error en la zona intermedia se obtiene restando las mediciones del sensor de desplazamiento en dos posiciones opuestas sobre la esfera. El error de paralelismo se calcula dividiendo el error en la zona intermedia de las dos posiciones, entre la distancia de ambas posiciones. El resultado será mejor en cuanto mayor sea el número de posiciones seleccionadas.



Leyenda

- | | | | |
|---|---|-----|--|
| 1 | Esfera patrón en la posición 1 | 5 | Sensor de desplazamiento lineal en la posición 1 |
| 2 | Esfera patrón en la posición 2 | h | Distancia entre la posición 1 y la posición 2 |
| 3 | Sensor de desplazamiento lineal en la posición 2 | LM | Dirección del movimiento lineal |
| 4 | Componente giratorio bajo ensayo (mesa giratoria o husillo) | | |

Figura 37 Montaje esfera patrón y sensor de desplazamiento

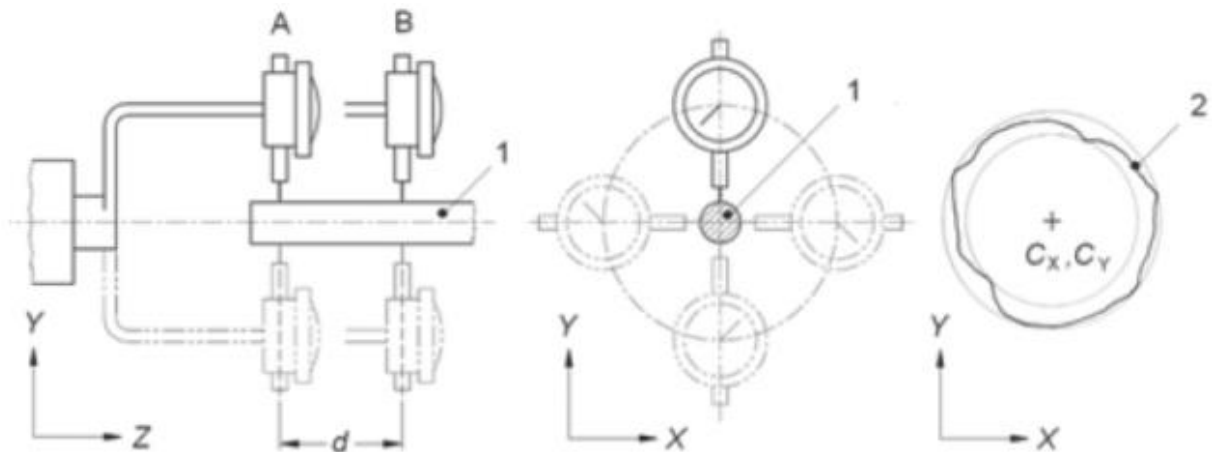
4.3.5.4 Paralelismo entre dos ejes de giro

Para medir el paralelismo entre dos ejes se debe de definir primero la línea media de un eje de rotación para luego compararla con el otro eje de rotación. Se utiliza diferentes dispositivos mecánicos u ópticos para generar dicha línea media.

- Mandrino de control: para este método se necesitará un mandrino de control y un par de relojes comparadores. El mandrino de control va montado sobre un eje y sobre el otro los relojes comparadores ayudándose de un soporte para fijarlos a este. Una condición importante es que el mandrino debe de estar alineado con el otro eje de rotación. A continuación, se ajusta los relojes comparadores para que toque al mandrino y así poder medir las desviaciones que se produzcan.

Se hace girar a los relojes comparadores con respecto al mandrino de control y se anotan todas las desviaciones. Al final se tendrá un esquema de movimiento como el mostrado en la Figura 38. Se procede a calcular el centro (C_x y C_y) de esos dos círculos de referencia. El error de paralelismo se puede calcular en las dos direcciones del plano que contiene a los círculos de referencia. Por ejemplo, para el cálculo del error de paralelismo en la dirección X se divide la diferencia de los centros ($C_{x1}-C_{x2}$) entre la distancia d que los separa. Se tiene como resultado el ángulo entre los dos ejes de giro. Se hará de la misma manera para la dirección Y, pero en este caso cogiendo las componentes relacionadas con esta dirección.

Para realizar mediciones más exactas se puede mover el husillo con el mandrino de control 180° y volver a realizar las mediciones. En este caso el error de paralelismo es la mitad de la suma algebraica de los dos ángulos calculados.



Leyenda

- 1 Mandrino de control
- 2 Trayectoria del sensor de desplazamiento lineal contra el mandrino de control
- A, B Sensor de desplazamiento lineal
- C_x Coordenadas en el eje X del centro del círculo de referencia
- C_y Coordenadas en el eje Y del centro del círculo de referencia
- d Distancia entre los sensores de desplazamiento lineal A y B

Figura 38 Montaje del mandrino y los sensores de desplazamiento

- Dos esferas patrón: este método de medición es similar al anterior salvo por el uso de esferas patrón en lugar del mandrino de control. Las dos esferas patrón se instalan sobre uno de los ejes de giro, separadas axialmente una distancia definida. Sobre el otro eje giratorio irán montados los dos sensores de desplazamiento separados una determinada distancia. Para la toma de datos y cálculo del error de paralelismo se procede de igual manera que el procedimiento anterior.

4.3.6 Coaxialidad entre líneas medias de ejes

El error de coaxialidad consta de cuatro parámetros: dos muestran el error de paralelismo entre ambos ejes y los otros dos el desajuste entre ellos. Se realizará esta medida entre dos líneas media de ejes de rotación. Tiene cierta similitud con el error de paralelismo por lo que las mediciones para hallar el error de paralelismo se podrán utilizar para hallar el error de coaxialidad y viceversa.

- Método del salto de un punto estacionario: este método también se puede denominar método de borde y cara por la zona donde se realizan las mediciones. Para llevar a cabo este método se requiere dos relojes comparadores que irán instalados sobre uno de los ejes. Un apoyo final de uno de los sensores de desplazamiento va montado en el otro eje. Se obtienen mediciones en las direcciones radial y axial.

Las mediciones se deben de realizar sobre las posiciones 0°, 90°, 180° y 270°, y repetirse tres veces para suprimir efectos térmicos. Otra cosa para tener en cuenta es la flexibilidad de los soportes que sostienen a los sensores de desplazamiento. Para ello se deberá realizar un montaje como el mostrado en la Figura 39 en el cual los soportes van conectados a un mandrino de control. Se sitúan los sensores de desplazamiento en la posición 0° y se comprueban que están a cero. A continuación, se mueve el mandrino hasta la posición opuesta y se apunta el valor marcado en el sensor. Los valores que se obtengan será el efecto de la flexión en cada dirección.

El error axial producido por el movimiento de los elementos analizados se puede eliminar si se utiliza el montaje de la Figura 40. En este caso se monta el otro sensor de desplazamiento en el otro eje de giro y los ángulos horizontal y vertical se calculan mediante la diferencia de los desajustes medidos divididos entre la distancia entre los sensores.

Desajuste vertical:

$$V_0 = \frac{(R_0 - R_{180})}{2} \quad (5)$$

Angulo vertical:

$$V_A = \frac{(F_{180} - F_0)}{D} \quad (6)$$

Desajuste horizontal:

$$H_0 = \frac{(R_{90} - R_{270})}{2} \quad (7)$$

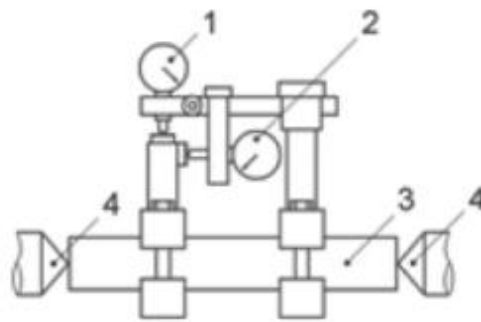
Angulo horizontal:

$$H_A = \frac{(F_{270} - F_{90})}{D} \quad (8)$$

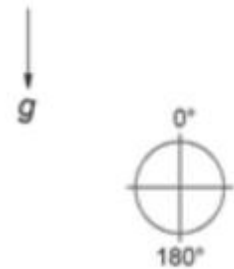
R_x es la lectura radial para la posición X.

F_x es la lectura radial para la posición X.

D es el diámetro del círculo que recorre el sensor de desplazamiento en la cara.



a) Vista lateral

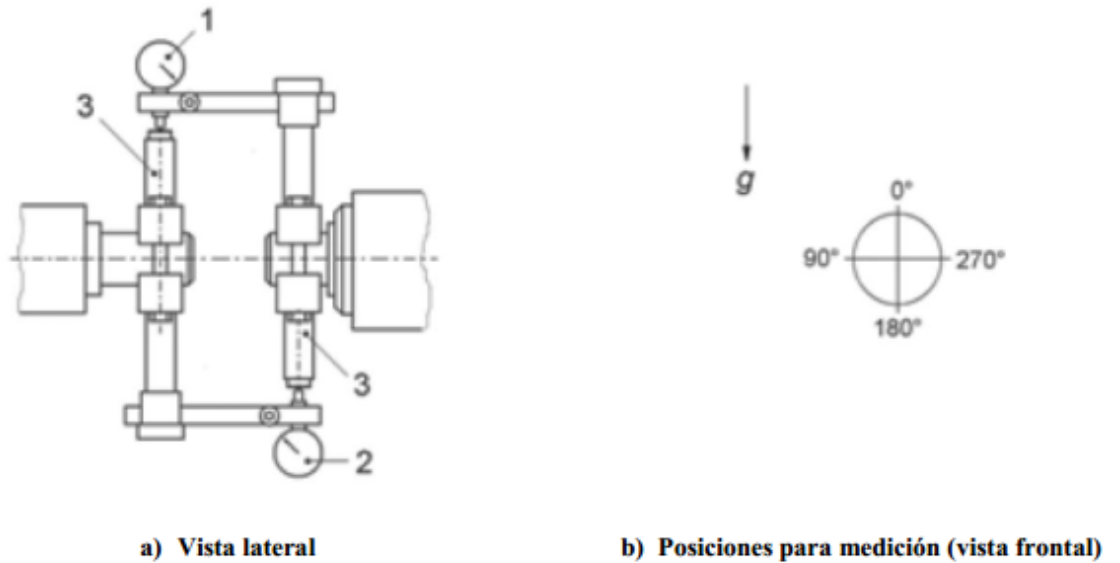


b) Posiciones para medición (vista frontal)

Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 2 Sensor de desplazamiento lineal en dirección axial
- 3 Mandrino
- 4 Puntos de centrado
- g Gravedad

Figura 39 Montaje para el cálculo de la flexión de los soportes



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 2 Segundo sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 3 Soporte a medir
- g Gravedad

Figura 40 Montaje de los relojes comparadores para eliminar el error axial

4.3.7 Perpendicularidad de los ejes del movimiento

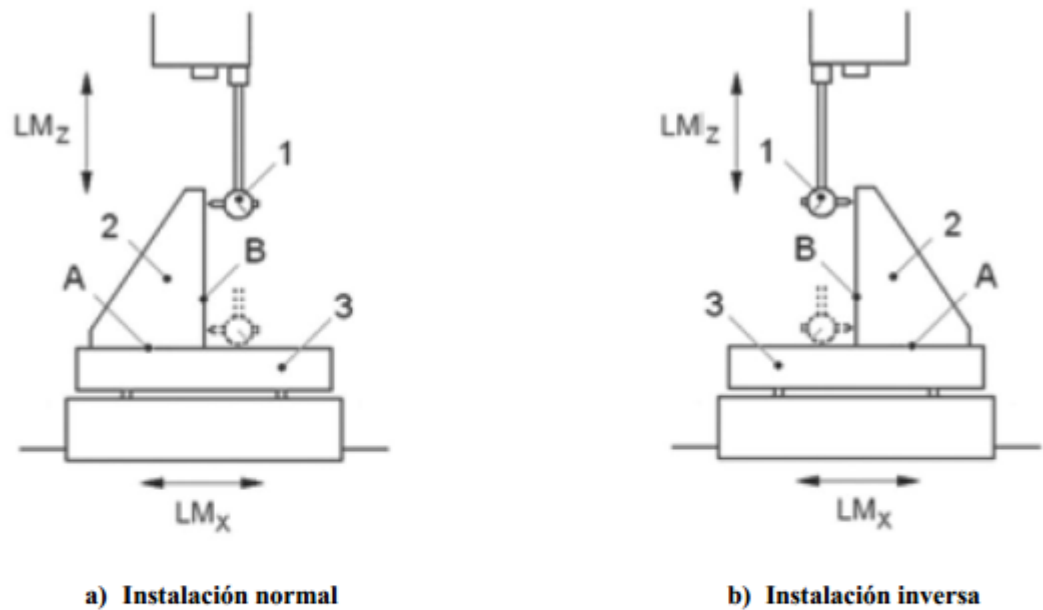
Para hallar el error de perpendicularidad entre dos ejes lineales se realiza dos mediciones de paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje fijo. El eje fijo debe representar una referencia para la medición por lo que se suele utilizar una regla indexable o una escuadra patrón.

4.3.7.1 Perpendicularidad entre dos ejes de movimiento lineal

Puesto que se van a realizar mediciones de paralelismo la línea de perpendicular de referencia se definirá de tal manera que sea paralela al eje de movimiento lineal. Un sensor de desplazamiento medirá las desviaciones laterales entre el punto de funcionamiento del componente y la línea de referencia de medición correspondiente a ese eje. El error de paralelismo de cada eje de movimiento con su línea de medición de referencia se hará igual que en el punto 4.3.5.2 Error de paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje fijo. Finalmente, el error de perpendicularidad se calculará como la suma algebraica de los dos errores de paralelismo.

- Escuadra patrón y sensor de desplazamiento lineal: se coloca la escuadra patrón de tal manera que sus superficies estén totalmente alineadas con los ejes de movimiento cuya perpendicularidad se quiere medir. El sensor de desplazamiento se encargará de medir las desviaciones del eje con respecto a la correspondiente superficie de referencia de la escuadra (eje fijo).

Si se utiliza una escuadra patrón, se recomienda girarla 180° y volver a tomar datos, para cancelar el error del dispositivo. Hay que asegurarse que al desplazar la escuadra para colocarla invertida se queda nuevamente alineada con los ejes a medir. En caso contrario el resultado se verá afectado por un error angular en uno de los ejes. Se puede observar en la Figura 41 el montaje de los dispositivos comentados y su instalación invertida.

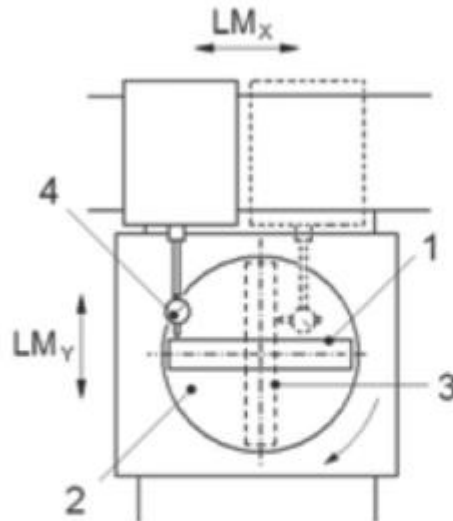


Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal
- 2 Escuadra patrón
- 3 Regla
- A Primera superficie de referencia de la escuadra patrón
- B Segunda superficie de referencia de la escuadra patrón
- LM_x Movimiento lineal a lo largo del eje X (ejemplo)
- LM_z Movimiento lineal a lo largo del eje Z (ejemplo)

Figura 41 Montaje escuadra patrón y sensor de desplazamiento

- Regla patrón y una mesa de referencia indexable: la regla patrón va sobre la superficie de referencia indexable y está irá fijada rígidamente sobre la mesa de la máquina. Primero se coloca la regla patrón en una dirección de movimiento de uno de los ejes en cuestión y se calcula el error de paralelismo. A continuación, se gira la mesa indexable 90° y se vuelve a calcular el error de paralelismo del otro eje lineal de movimiento de la misma manera. Cabe destacar que estos dispositivos suelen utilizarse para mediciones horizontales debido a que la mayoría de las máquinas herramienta tienen la mesa en este plano. En la Figura 42 se puede observar desde arriba este proceso de medición.



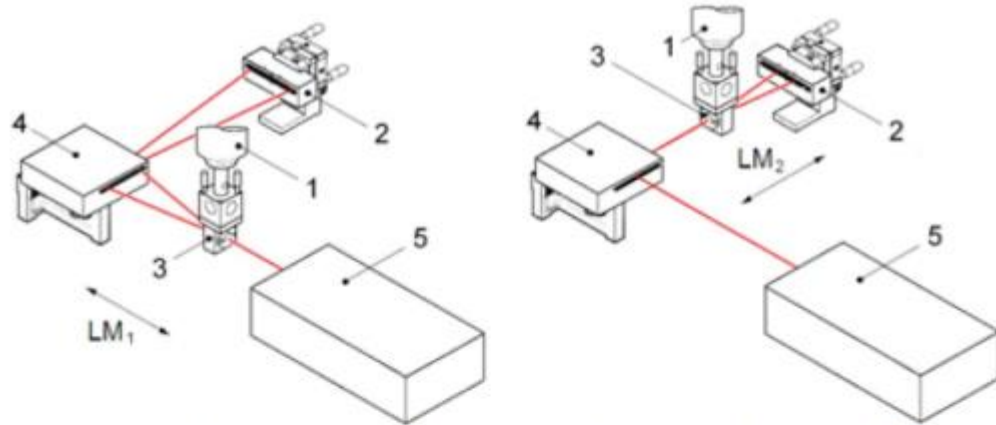
Leyenda	
1	Regla en su posición inicial
2	Mesa de referencia indexable
3	Posición de la regla después de girarla 90°
4	Sensor de desplazamiento lineal
LM_x	Movimiento lineal a lo largo del eje X (ejemplo)
LM_y	Movimiento lineal a lo largo del eje Y (ejemplo)

Figura 42 Montaje de la regla patrón y mesa de referencia indexable

- Escuadra óptica e interferómetro laser de rectitud: en este caso se usa los mismos componentes que la medición de rectitud (ópticas, soportes, accesorios, etc.). La escuadra óptica es el elemento diferencial con respecto a las mediciones de rectitud. Este elemento permite desviar el haz del láser 90° para realizar las mediciones en los distintos ejes. Se realizan dos mediciones de rectitud, una para cada eje y luego el software muestra los resultados y el error de perpendicularidad asociado.

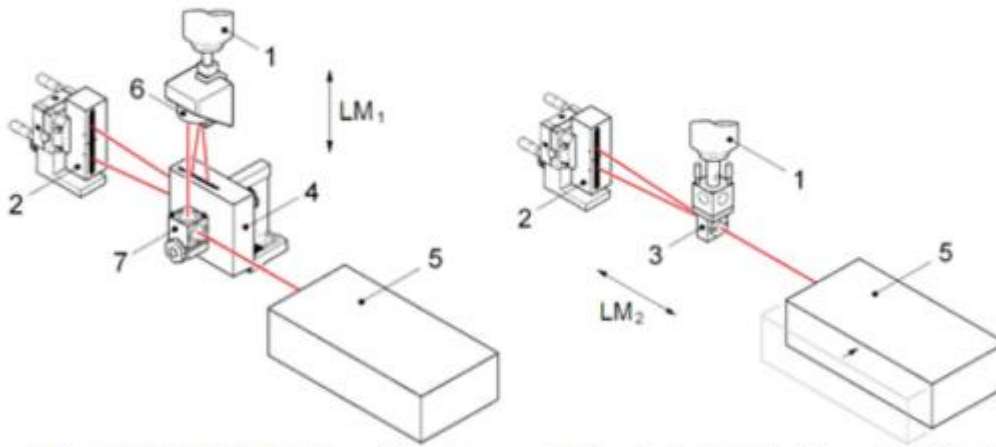
Dependiendo de las características de montaje se procederá a utilizar la escuadra en ambas divisiones o solo en una, tal como muestra la Figura 43. Para el caso a) y b) se podría dejar de utilizar la escuadra para la medición del segundo eje, si el cabezal láser se recoloca y se alinea con el segundo eje a medir.

Los resultados de la medición pueden representarse en una gráfica, como la Figura 44, sobre la cual se podrá ver las líneas de referencia y los datos obtenidos. Finalmente, para obtener el error angular se calcula las pendientes de cada recta con su línea de referencia. Según el criterio de signos que se use los ángulos se sumaran o se restaran.



a) Ejemplo 1 – Medición del primer eje lineal para la medición en el plano horizontal

b) Ejemplo 1 – Medición del segundo eje lineal para la medición en el plano horizontal



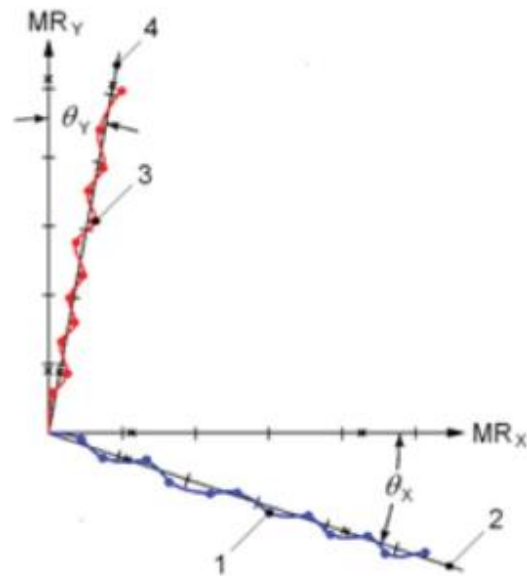
c) Ejemplo 2 – Medición del primer eje lineal para la medición en el plano vertical

d) Ejemplo 2 – Medición del segundo eje lineal para la medición en el plano vertical

Leyenda

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 Husillo de la máquina | 6 Montaje con retroreflector de mayor rango y prisma Wollaston (interferómetro) |
| 2 Reflector de rectitud | 7 Espejo de desviación |
| 3 Prisma Wollaston (interferómetro) | LM ₁ Movimiento del primer eje lineal |
| 4 Escuadra óptica | LM ₂ Movimiento del segundo eje lineal |
| 5 Cabezal láser | |

Figura 43 Tipos de montajes del láser según la posición de la escuadra óptica



- Leyenda**
- MR_x Línea de referencia de la medición en el eje X
 - MR_y Línea de referencia de la medición en el eje Y
 - 1 Trayectoria del movimiento medida en el eje X
 - 2 Línea de referencia del movimiento en el eje X
 - 3 Trayectoria del movimiento medida en el eje Y
 - 4 Línea de referencia del movimiento en el eje Y
 - θ_x Pendiente de la trayectoria en el eje X
 - θ_y Pendiente de la trayectoria en el eje Y

Figura 44 Análisis y representación de los datos

4.3.7.2 Perpendicularidad entre un eje de movimiento lineal y una línea media de un eje rotativo

Para llevar a cabo esta medición primero se debe determinar la línea media del eje de rotación. La línea media correspondiente al eje de giro se obtiene mediante los promedios de las mediciones del error de rectitud para dos posiciones angulares giradas 180°. También puede representarse el eje de revolución mediante una línea de referencia perpendicular al eje de revolución. Posteriormente, se compara el eje de movimiento lineal con esta línea media o línea de referencia.

Se utiliza para ello una regla de tal manera que pase por el centro del eje y se mide la desviación de rectitud del eje de movimiento lineal, utilizando los métodos descritos en el apartado 4.3.1 Rectitud. El ángulo que forma el eje de movimiento lineal y la superficie de la regla será la pendiente de la línea de rectitud de referencia (φ_F, φ_R). Una vez se realice la medición en un sentido se deberán de realizar las mismas mediciones en el sentido contrario, girando el eje 180°. El error de perpendicularidad, E_{BOC} , se calcula según la ecuación (8). En la Figura 45 se detalla con que se relaciona cada componente de esta ecuación.

$$E_{BOC} = 1/2 (\varphi_F + \varphi_R) \quad (9)$$

Si se requiere la medición con respecto al otro plano ortogonal de movimiento se puede calcular empezando las mediciones en 90° y luego girando hasta 270° para las otras mediciones.

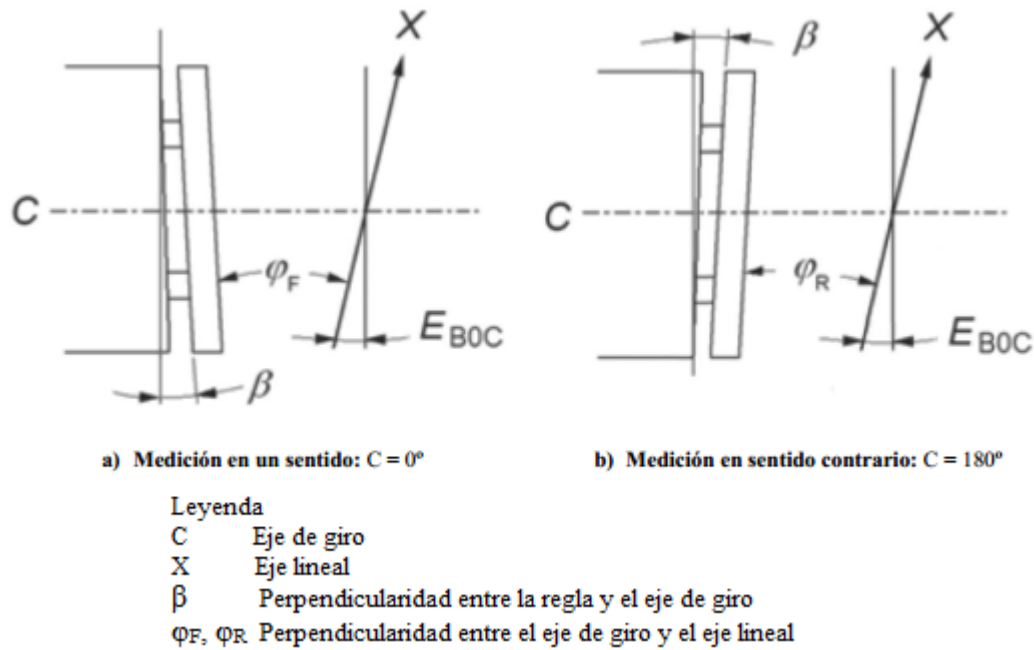


Figura 45 Montaje de la regla sobre el componente giratorio

4.3.7.3 Perpendicularidad entre dos ejes de revolución

Para esta medición se necesita un mandrino de control y un sensor de desplazamiento los cuales se instalan en los ejes giratorios. En uno de los ejes de giro se coloca el mandrino de control y en el otro se instala el sensor de desplazamiento con un brazo para que este a cierta distancia del eje. A continuación, se pone en contacto el sensor de desplazamiento con el mandrino para que lea las desviaciones que se puedan producir y se pone a 0. Se hará girar el eje de giro que tiene el mandrino varias vueltas y se tomara las mediciones correspondientes. Después se girará el sensor de desplazamiento 180° para medir en otra posición en el mandrino de control.

Con los resultados de las mediciones anteriormente descritas se obtiene mediante mínimos cuadrados los centros de los círculos. La perpendicularidad entre ambos ejes de giro se calculará como la diferencia entre las coordenadas del centro a lo largo del eje de giro que tiene el sensor de desplazamiento dividido entre la distancia del sensor de desplazamiento entre las dos mediciones.

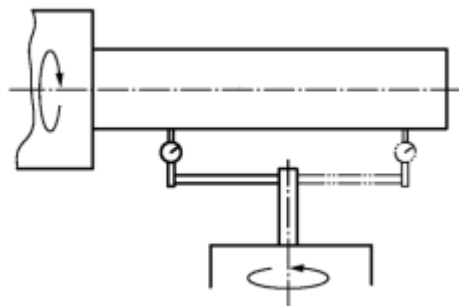


Figura 46 Montaje mandrino y sensor de desplazamiento sobre los ejes de giro

4.3.8 Prueba trayectoria circular generadas por dos o tres ejes lineales

Existen pruebas de trayectorias circulares para comprobar principalmente el contorneado que realiza la maquina es correcto y está dentro de unos ciertos valores. Normalmente los errores de circularidad están afectados por errores geométricos y el comportamiento dinámico de la máquina. Los resultados se representan mediante un diagrama, como el de la Figura 47, donde se puede observar fácilmente las

desviaciones que se producen en la trayectoria.

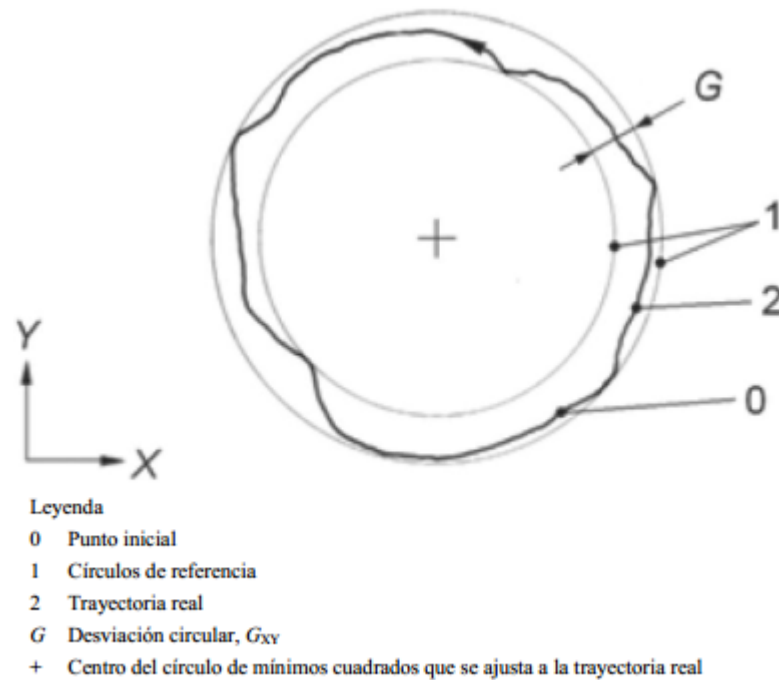
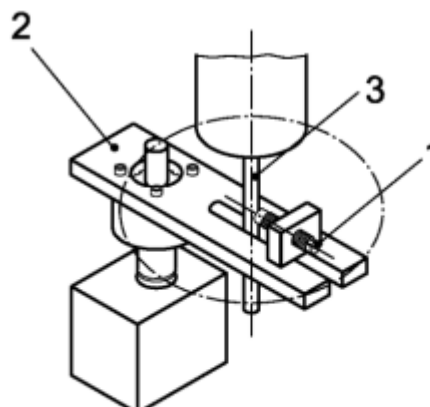


Figura 47 Representación de los resultados del ensayo de circularidad

Se puede llevar a cabo los ensayos con círculos completos y círculos parciales. Se usa las trayectorias circulares completas para tener unos resultados más precisos. Por el contrario, las trayectorias parciales cuando el eje en cuestión no pueda describir un círculo completo debido a las características de la máquina o el instrumento de medición. Este último deberá de hacerse con cuidado ya que puede llevar a varios errores asociados del ensayo. Han de realizarse dos pruebas sobre la trayectoria efectiva que se haya elegido, una en sentido horario y otra en sentido antihorario.

- Sensor de desplazamiento lineal giratorio en una dimensión: se instala un sensor de desplazamiento con el objetivo de describir una trayectoria circular. Este se moverá gracias a un soporte giratorio especial y medirá el desplazamiento relativo a un mandrino de control o a un punto fijo. Para generar el diagrama circular se necesitará un plotter polar sincronizado, un análisis por ordenador o mediante un codificador giratorio adicional en el soporte giratorio y un plotter polar.



Leyenda
 1 Sensor de desplazamiento lineal unidimensional
 2 Soporte especial giratorio
 3 Mandrino de control

Figura 48 Montaje del sensor de desplazamiento

- Método del patrón circular y dos sensores de desplazamiento lineal: en este caso se utiliza una sonda

para que se mueva según una trayectoria circular y pueda registrar los datos en dos direcciones a la vez. La sonda deberá de estar en contacto siempre con el patrón circular.

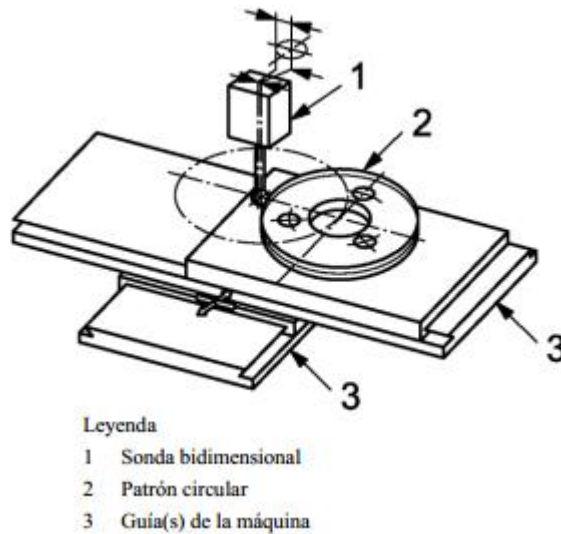


Figura 49 Montaje sensores de desplazamiento y patrón circular

- Ball-bar: se trata de un dispositivo telescópico con bolas de precisión en sus extremos. Una esfera se fijará al componente de amarre de la máquina y el otro extremo al portaherramientas. Seguidamente, se programa una trayectoria circular cuyo radio sea igual a la longitud de la barra del Ball-bar que se haya elegido. Lo que se medirá son las variaciones radiales en la distancia de las esferas y con ello se generará un diagrama circular mediante el software del fabricante. Este dispositivo es muy usado para realizar calibraciones rápidas ya que permite conocer de una manera general los posibles errores que existen en la máquina herramienta. Una vez identificados los posibles errores se pasa a realizar las calibraciones concretas para cuantificar un error en concreto.

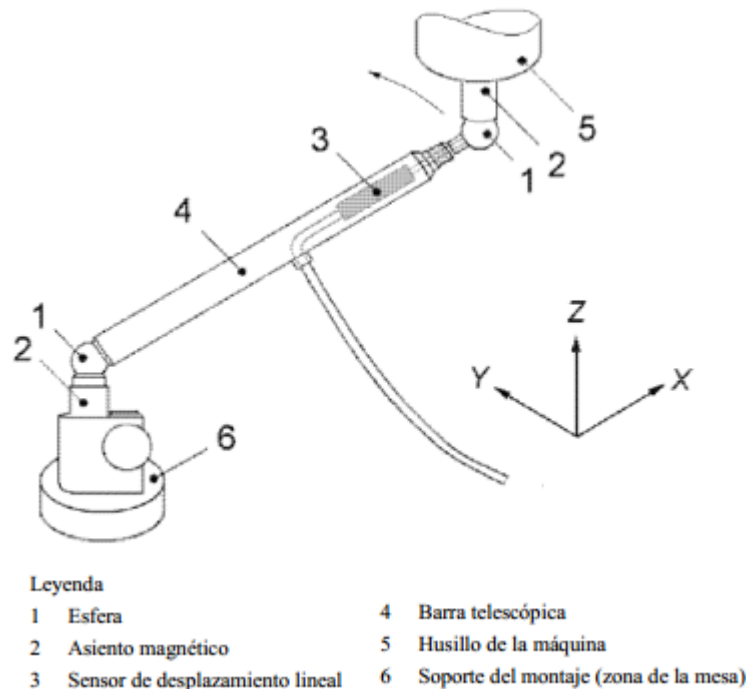
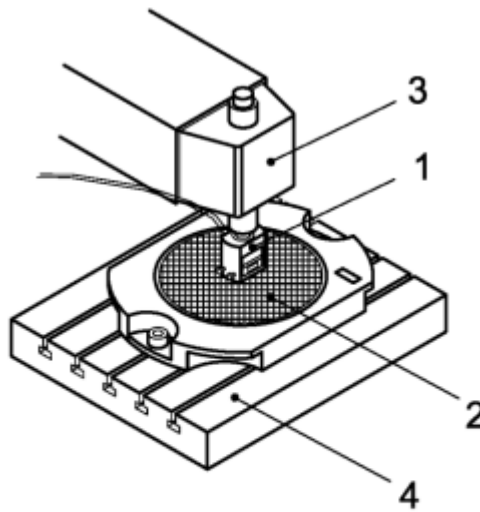


Figura 50 Montaje Ball-bar

- Escala digital bidimensional: este dispositivo permite hacer una medición en dos coordenadas para poder obtener así las desviaciones en las trayectorias circulares. Se tiene que instalar un detector de posición bidimensional en el portaherramientas y la escala 2D en la zona donde se sitúa la pieza.

Normalmente se requiere de un software para registrar las desviaciones y representarlas en un diagrama circular.



Leyenda

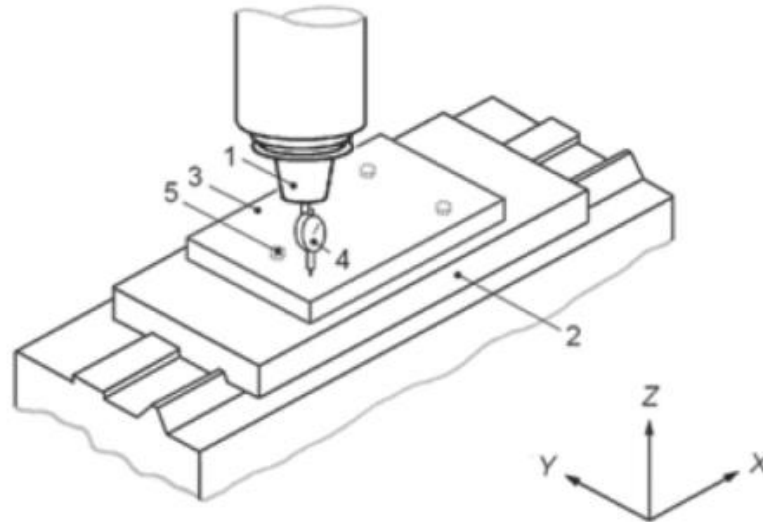
- 1 Detector de posición bidimensional
- 2 Escala cuadriculada
- 3 Cabezal del husillo de la máquina
- 4 Mesa de la máquina

Figura 51 Montaje escala digital bidimensional

4.3.9 Ensayo de planitud

Se puede realizar este ensayo tanto a una superficie virtual generada por dos ejes lineales o a una superficie funcional de la máquina herramienta. Para realizar estas mediciones se empleará dispositivos de referencia para, a partir de ellos, medir las desviaciones. Una vez se tengan los resultados de las desviaciones se genera un diagrama para ver la disposición del plano según las mediciones tomadas. Los puntos donde se realizará la toma de datos tendrán que estar uniformemente colocados para abarcar lo máximo el plano a medir.

- Placa como superficie de referencia y sensor de desplazamiento lineal: se sitúa una placa de referencia en el plano que se vaya a medir y el sensor de desplazamiento en la parte de la máquina que sujeta la herramienta. El sensor de desplazamiento se desplazará sobre esta superficie y será el encargado de medir cualquier tipo de desviación. El error de planitud es el rango de las desviaciones de planitud calculadas.

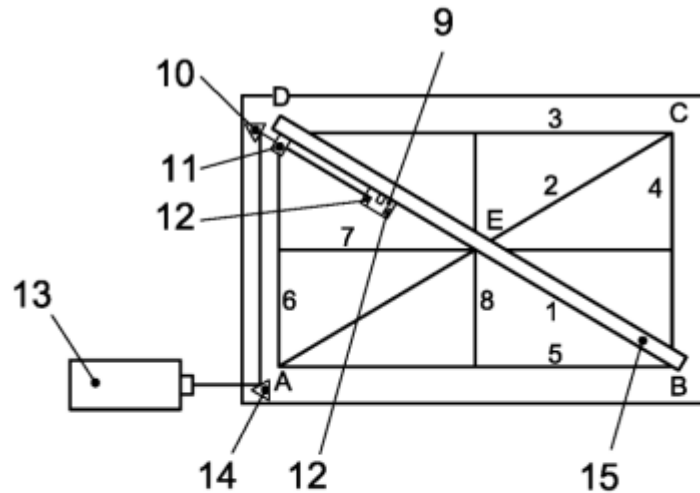


- Leyenda
- 1 Husillo
 - 2 Mesa
 - 3 Placa de referencia de la superficie
 - 4 Sensor de desplazamiento lineal
 - 5 Puntos de apoyo (3)

Figura 52 Montaje de placa y sensor de referencia

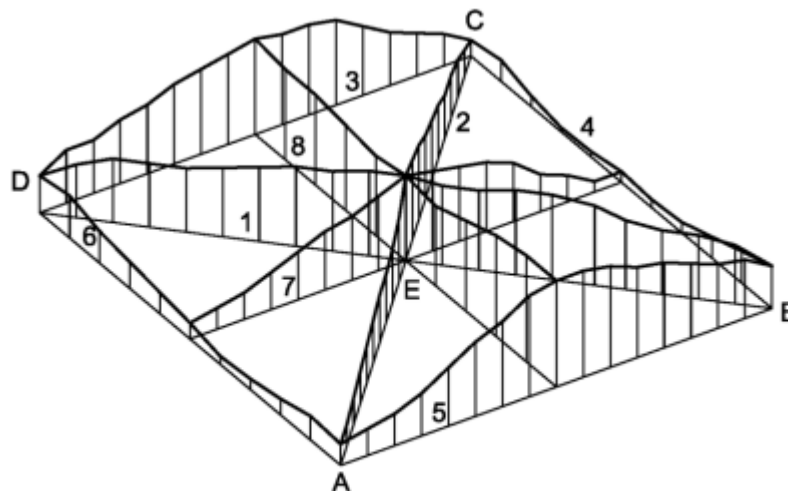
- Laser de barrido de alineamiento: este método tiene similitudes con el anteriormente descrito salvo que ahora la superficie de referencia se genera mediante un láser cuyo haz junto con un espejo giratorio crean la superficie de referencia. El láser va montado en la zona de la maquina donde se sitúa la pieza y en el husillo se instala un sensor fotodiódico. Este último es el encargado de detectar cualquier desviación en la posición del haz incidente.
- Interferómetro laser: este ensayo se basa en la comprobación de rectitud de varias líneas de la superficie, realizando mediciones de alteraciones angulares que pueden producirse a lo largo de estas. El software transforma estas alteraciones angulares en alturas incrementales en todos los puntos de medición, que luego se mostraran en un esquema de la superficie con todas las posibles desviaciones, véase la Figura 54.

Para llevar a cabo este ensayo se hará uso de dos espejos giratorios, regla guía, bases de planitud, cabezal láser, interferómetro y reflector angulares. Sobre los espejos giratorios se sitúa el interferómetro angular, que permanecerá inmóvil en una posición. Por otro lado, el reflector angular va montado sobre las bases de planitud y se moverá a lo largo de la línea a medir. Se hará uso de los dos espejos giratorios cuando el cabezal láser no se pueda mover y se necesite el haz láser en una determinada orientación. Antes de comenzar con la toma de datos debe de haberse definido una serie de líneas que formen un plano paralelo al plano a medir. Además, habrá que definir el orden de medición de las líneas marcadas. En la Figura 53 se puede ver un esquema muy completo del montaje de los diferentes elementos, así como del conjunto de líneas a medir y su orden.



- Leyenda
- 1 a 8 Líneas de medición
 - 9 Retroreflector
 - 10 Segundo espejo orientable
 - 11 Interferómetro
 - 12 Apoyo del retroreflector
 - 13 Cabezal del láser
 - 14 Primer espejo orientable
 - 15 Regla guía

Figura 53 Montaje del láser y sus ópticas



- Leyenda
- 1 a 8 Líneas de medición

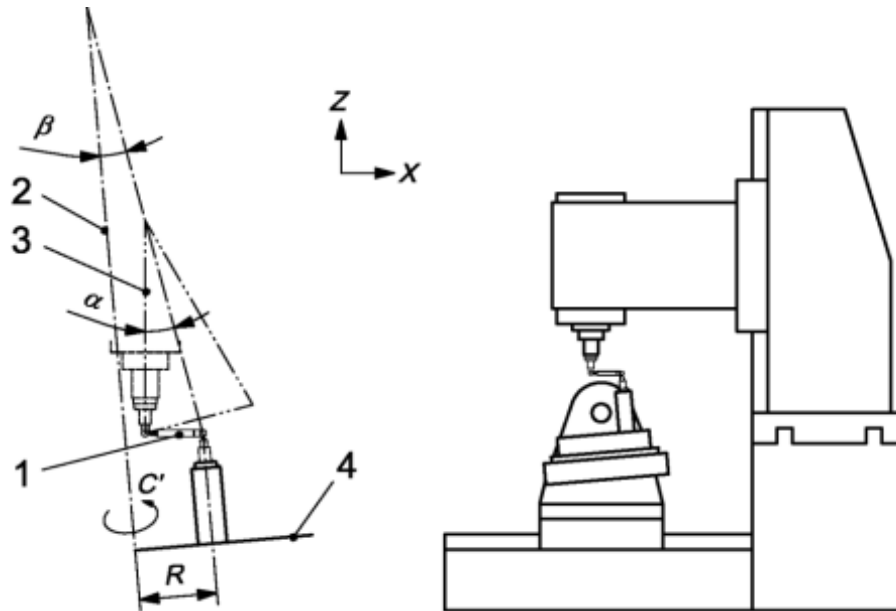
Figura 54 Presentación de los resultados

4.3.10 Otros ensayos

Se han presentado las principales calibraciones en las máquinas herramienta, pero también existen calibraciones muy específicas que se pueden tomar como calibraciones secundarias para ciertas máquinas herramienta. Todo dependerá del acuerdo o las exigencias que se lleven a cabo con el cliente.

- Ensayo de movimiento cónico: principalmente este ensayo es utilizado en máquinas de 5 ejes para

dar a conocer las desviaciones de la trayectoria del centro de la herramienta circular generada por los cinco ejes simultáneamente. Para esta medición se requiere de un Ball-bar que será el encargado de llevar a cabo la toma de datos y representar mediante un software el diagrama circular con las desviaciones que se detecten. Una de las esferas se monta en el husillo y la otra en la mesa de manera que se adapte al eje del cono. En la Figura 55 se puede observar todas las componentes a tener en cuenta para el correcto montaje del Ball-bar.

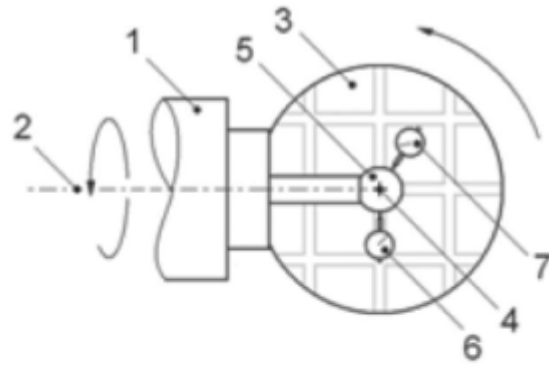


Leyenda

- 1 Ball bar
- 2 Eje de rotación de la mesa giratoria
- 3 Eje de rotación del husillo
- 4 Superficie de la mesa giratoria
- R Desplazamiento del eje del cono respecto al eje C'
- α Semi ángulo del vértice del cono
- β Angulo entre el eje de rotación del cono y el eje C'

Figura 55 Montaje del Ball-bar para medición cónica

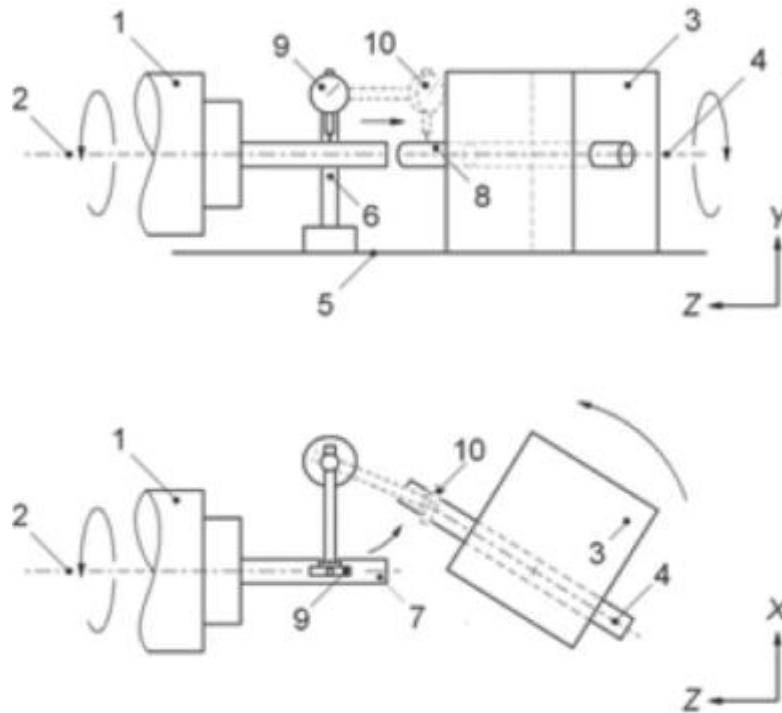
- Intersección entre líneas medias de eje: las máquinas herramienta pueden constar de varios ejes de revolución que pueden ser paralelos o perpendiculares entre sí. Por este motivo es interesante medir el punto de intersección de los ejes de revolución que se cruzan. El proceso de medición será diferente si los ejes de revolución son perpendiculares que si no lo son. Concretamente si los ejes de revolución son perpendiculares se utilizará un sensor de desplazamiento y una esfera patrón y si no lo son se usará un sensor de desplazamiento y dos Mandrinos de control. En la Figura 56 y Figura 57 se tiene el montaje con todos sus componentes identificados para estos dos casos. Las lecturas del sensor de desplazamiento dirán el error de intersección que existe entre los ejes que se estén midiendo.



Leyenda

- 1 Husillo
- 2 Eje de revolución del husillo
- 3 Mesa giratoria
- 4 Eje de revolución de la mesa giratoria
- 5 Esfera patrón
- 6 Sensor de desplazamiento lineal en posición inicial
- 7 Sensor de desplazamiento lineal en posición intermedia

Figura 56 Montaje en el caso de líneas medias perpendiculares



Leyenda

- 1 Husillo 1
- 2 Eje de revolución del husillo 1
- 3 Cabezal giratorio
- 4 Eje de revolución del cabezal giratorio
- 5 Superficie de referencia
- 6 Apoyo del sensor de desplazamiento lineal
- 7 Mandrino de control 1
- 8 Mandrino de control 2
- 9 Sensor de desplazamiento lineal en la posición de medición 1
- 10 Sensor de desplazamiento lineal en la posición de medición 2

Figura 57 Montaje en el caso de líneas medias no perpendiculares

- Pruebas de trayectorias lineal: este tipo de ensayos son una manera fácil de comprobar características volumétricas. Se tratan de probar multiaxiales sobre una cara o diagonales del volumen de trabajo que disminuyen los costes y el tiempo con respecto a las pruebas de comprobación volumétricas. El fin de esta prueba es comprobar que los ejes en cuestión, dos o más según la prueba, actúan de manera coordinada para obtener el resultado previsto. Para realizar las mediciones sobre estas trayectorias se puede aplicar lo descrito para los ejes individuales, pero teniendo en cuenta que ahora se compara con diagonales de los planos coordinados.

4.4. Incertidumbre

4.4.1. Introducción

Cuando se habla de realizar un proceso de medición se debe tener en mente que las medidas que se realice no serán exactas. Por ello siempre se tiene que dar un valor indicativo que cuantifique la calidad del resultado. A esta manera de indicar esa calidad de medición se le llama incertidumbre de medida, que ayuda a plantear un intervalo de posibles resultados que se puede obtener.

El mesurando se refiere a las magnitudes particulares que son objeto de medición. Hay que destacar que existen dos formas de obtener el mesurando y dependerá del tipo de medidas que se han realizado. Las medidas directas son en las cuales se obtiene una magnitud de medida a través de un solo instrumento. Por el contrario, se realiza una medición indirecta cuando se obtiene el valor de la magnitud a partir de una medida directa. Esta relación entre magnitudes directas e indirectas se suele dar a través de una fórmula.

En los procesos de medición siempre se comenten imperfecciones que actúan sobre un procedimiento sin que se pueda impedir. Esto conlleva que siempre exista un error en el resultado de medida. Tradicionalmente se han definido dos componentes que forman el error:

- Componente aleatorio: se ha estudiado que procede de variaciones de magnitudes que influyen y son impredecibles. Este tipo de error no se puede compensar y disminuirá con el incremento del número de mediciones.
- Componente sistemático: al igual que para la componente aleatoria no se puede eliminar, pero si se podrá corregir para disminuir su influencia. Se puede cuantificar y si es significativo se le aplicará un factor de corrección para compensarlo.

La incertidumbre de medida se ha convertido en un parámetro fundamental para la calidad y el diseño industrial ya que aporta información relacionada con los posibles resultados que se obtiene. Al final se después de obtener las correspondientes mediciones con sus incertidumbres asociadas se les aplicará criterios de aceptación para evaluar los resultados obtenidos.

4.4.2. Fuentes de incertidumbre

En la Guía para la expresión de la Incertidumbre de la Medida (GUM) se ha definido una serie de fuentes de incertidumbre con el fin de poder identificarlos para su respectivo ensayo de medición. A continuación, se lista algunas fuentes de incertidumbre:

- Definición incompleta del mesurando
- Realización imperfecta de la definición del mesurando
- Resolución del instrumento de medida
- Conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales
- Desviaciones en las lecturas por parte del operador
- Valores inexactos de los elementos de referencia utilizados
- Aproximaciones e hipótesis

- Valores inexactos de fuentes externas
- Variaciones en las observaciones repetidas del mesurando.

Además de estas posibles fuentes de incertidumbre existen muchas variantes más que pueden afectar al proceso de medición, instrumento, ambiente, etc. Un elemento muy importante en la identificación de incertidumbres es la experiencia del operario. No es una variable fácil de cuantificar, pero afecta tanto a la ejecución del ensayo como al diseño del ensayo. Debido a esto las fuentes de incertidumbre pueden variar significativamente de un ensayo a otro ya que no existe una regla que las defina en cada caso.

4.4.3. Cálculo de la incertidumbre

Una vez comprendida la definición de incertidumbre y los posibles elementos que pueden influir en su cálculo, se pasa a definir como se determina. Cuando se calibra es común que solo exista un mesurando o magnitud de salida Y . El mesurando en muchos de los casos no se obtiene directamente, sino que depende de magnitudes de entrada X_i que tienen una relación funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (10)$$

Con la función f el proceso de medición queda definido. Existen dos categorías según la manera en la que se haya obtenido el valor de la magnitud de entrada y su incertidumbre asociada:

- Por un lado, se encuentran las estimaciones de las magnitudes y su incertidumbre calculadas por medio directo de la medición. Se trata de valores que se han obtenido por medio de observaciones repetidas. Es necesario obtener las correcciones relacionadas con las lecturas de los instrumentos o magnitudes de influencia.
- Por otro lado, están las estimaciones de las magnitudes y su incertidumbre que se obtienen por fuentes externas. Cuando se habla de fuentes externas se refiere a magnitudes asociadas a patrones de medida calibrados, objetos de referencia certificados o datos de obtenidos de manuales.

Entonces se tiene que la estimación de salida y se obtiene a partir de las estimaciones de entrada x_i (). Dentro de las estimaciones de entrada x_i se encuentran las magnitudes que contribuyen en el resultado final y las posibles correcciones relacionadas con el ensayo. Se debe de tener en cuenta, aunque estas sean cero ya que luego se tendrán en cuenta para el cálculo de su incertidumbre asociada.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (11)$$

Una vez se haya definido el modelo para poder obtener la estimación de la magnitud de salida, se podrá calcular la incertidumbre asociada a la medición. Por lo que la desviación del mesurando vendrá representada mediante la incertidumbre típica de medida $u(y)$ que está asociada a la estimación de salida. Esta incertidumbre será el resultado de las incertidumbres típicas asociadas a las estimaciones de entrada.

$$u(y) = f(u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)) \quad (12)$$

4.4.4. Evaluación de la incertidumbre de las estimaciones de entrada

Existen dos métodos para evaluar la incertidumbre asociada a las estimaciones de entrada: “tipo A” y “tipo B”. La única diferencia entre estos dos grupos radica en la manera de realizar su análisis. Ambos tipos de evaluación se fundamentan en distribuciones de probabilidad y sus componentes resultantes se calculará por medio de varianzas o desviaciones típicas.

- Evaluación de la incertidumbre tipo A: se opta por este método cuando se tiene una serie de n observaciones para la estimación de entrada x_i que corresponda. Se utiliza una media aritmética o promedio de los valores obtenidos en las observaciones para calcular el valor estimado. Se pasa a definir la magnitud de entrada X_i como la magnitud Q . Por lo que sus distintos valores observados serán q_j ($j=1,2,3,4,\dots,n$) y el valor estimado \bar{q} .

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (13)$$

Una vez planteado el valor estimado \bar{q} , la incertidumbre de medida se evalúa mediante una de estas dos

opciones:

- a) Mediante la varianza experimental $s^2(q)$ de los valores q_j de la siguiente manera:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (14)$$

Se puede obtener una mejor estimación utilizando la varianza de la media aritmética, que se obtiene por medio de la varianza experimental:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (15)$$

La desviación típica experimental de la media $s(\bar{q})$ será la raíz cuadrada de la ecuación (14). La incertidumbre típica $u(\bar{q})$ asociada a la estimación de entrada \bar{q} se obtiene mediante la desviación típica experimental de la media $s^2(\bar{q})$. Cabe destacar que este método de cálculo resulta poco fiable cuando el número de observaciones es menor que diez ($n < 10$).

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (16)$$

- b) Si se tiene un procedimiento de medida bien caracterizado y controlado estadísticamente, se puede obtener la estimación combinada o acumulado de la varianza s_p^2 por medio de diseños experimentales de las magnitudes de las que depende. Esta estimación de la varianza resulta ser más precisa que la desviación típica estimada por el número de observaciones.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (17)$$

La incertidumbre típica se obtendrá de la misma manera que en la ecuación (16).

- Evaluación de la incertidumbre tipo B: se opta por este método cuando no se disponga de una serie de observaciones y haya que recurrir a toda la información posible para que quede definida la variabilidad de la magnitud de entrada. Algunos ejemplos del posible origen de la información pueden ser datos de mediciones anteriores, especificaciones del fabricante, datos de certificados de calibración u otros certificados, incertidumbres asignadas tomadas de manuales, etc.

Para este método de evaluación se necesita cierto grado de experiencia y entendimiento de los conocimientos generales. Normalmente esta capacidad se adquiere con la practica después de varias calibraciones. Habrá que distinguir varios casos según el origen de los valores:

- a) Se tiene solo un valor único de la magnitud de entrada X_i . Se utiliza ese valor como x_i y se obtiene la incertidumbre $u(x_i)$ asociada a ella, siempre que sea posible.
- b) Utilizar una distribución de probabilidad para la magnitud X_i .
- c) Si se tiene unos límites inferior y superior para la magnitud X_i , se debe suponer una distribución de probabilidad para poder definir los posibles valores de entrada. Existen varios tipos de distribuciones cada cual con sus ventajas dependiendo de las características de los valores. Si no se sabe nada más aparte de sus límites la mejor distribución es una distribución rectangular, figura 58 a), con una densidad de probabilidad constante entre los límites marcados. Si por el contrario se conoce que la distribución de los valores tiende al centro de variabilidad es más adecuado decantarse por una distribución triangular o normal, figura 58 b) o c). Por último, si existe el caso en que los valores se encuentren más probables en los extremos del intervalo se elige una distribución en U, figura 58 d). Se puede observar en la figura 58 cada distribución con su fórmula para calcular su incertidumbre asociada, siendo $\pm a$ los límites de la distribución.

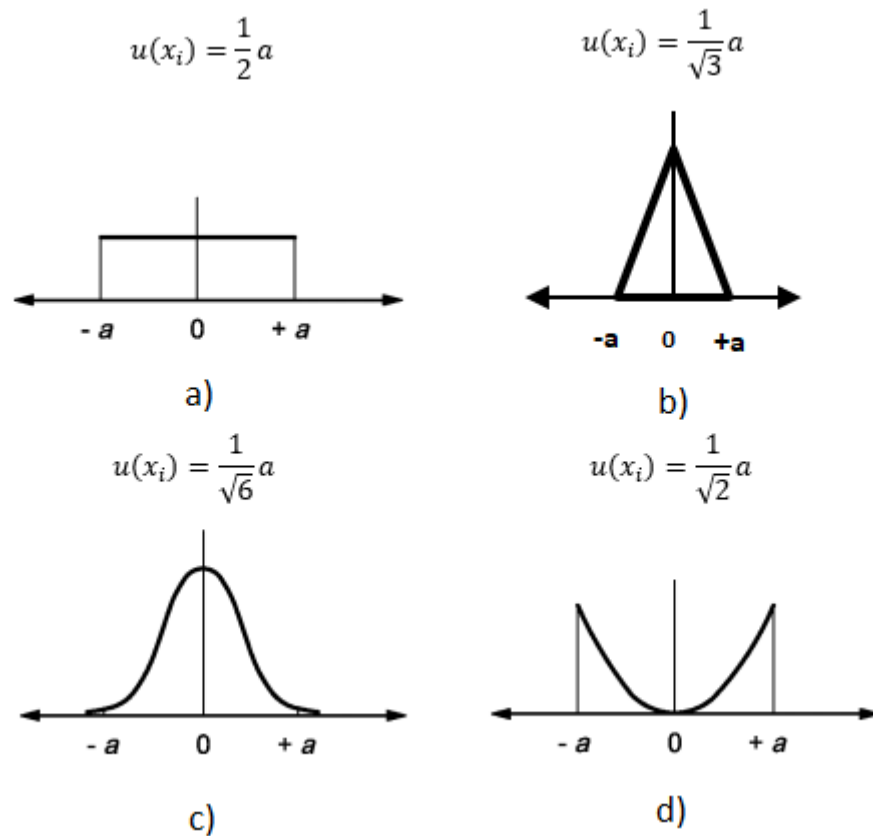


Figura 58 Diferentes tipos de distribuciones conociendo sus límites $\pm a$

4.4.5. Cálculo de la incertidumbre de la estimación de salida

Cuando se habla del cálculo de la incertidumbre de la estimación de salida, hay que tener en cuenta si se tratan de magnitudes correlacionadas o no correlacionadas. Como su propio nombre lo indica si dos valores presentan cierta relación a la hora de producirse una variación serán magnitudes correlacionadas. Por el contrario, los valores no correlacionados serán cuando no tienen ninguna relación entre ellos. En el caso de magnitudes no correlacionadas la incertidumbre típica, $u(y)$, viene definida por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (18)$$

Donde

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (19)$$

En la que c_i será el coeficiente de sensibilidad y $u(x_i)$ la incertidumbre típica de la estimación de la magnitud de entrada. El coeficiente de sensibilidad, c_i , representa cuanto influye esa magnitud de entrada en el mesurando. Para la obtención de este coeficiente se puede realizar derivadas parciales con respecto a las distintas magnitudes de entrada definidas en el modelo matemático (10). Si no se hubiera definido el modelo matemático se procede a realizar varios ensayos variando cada una de las magnitudes de entrada para ver cómo influye sobre el mesurando. Esa razón de cambio será el coeficiente de sensibilidad.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (20)$$

Cuando se tengan magnitudes correlacionadas, la incertidumbre típica, $u(y)$, varía para introducir una nueva componente relacionada con la correlación entre las magnitudes que correspondan. En este caso a la nueva incertidumbre se denomina incertidumbre típica combinada, $u_c(y)$, y se obtiene de la siguiente manera:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_j c_i u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (21)$$

Donde

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (22)$$

Siendo $r(x_i, x_j)$ el coeficiente de correlación que se debe de encontrar entre $-1 < r(x_i, x_j) < +1$. Se tomará como $r = 0$ cuando las magnitudes sean no correlacionadas por lo que un cambio en una de ellas no hará que cambie la otra.

Todos los datos se recogerán en una tabla para que sea más visible y se pueda realizar un análisis de la incertidumbre de medición con cierta rapidez. El formato de tabla sería el siguiente:

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$		c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$		c_2	$u_2(y)$
:	:	:		:	:
X_N	x_N	$u(x_N)$		c_N	$u_N(y)$
Y	y				$u(y)$

Figura 59. Formato tabla incertidumbre

4.4.6. Incertidumbre expandida

Debido a los procesos de calidad y los grandes requerimientos por parte de las empresas, se ha generado una incertidumbre que proporcione un intervalo donde el mesurando se puede encontrar. Para ello se ha definido la incertidumbre expandida, que se calcula a partir de la incertidumbre típica combinada, $u_c(y)$, aplicándole un factor de cobertura k . Este factor de cobertura muestra la probabilidad de que el mesurando se encuentre entre el intervalo definido $\pm U$.

$$U = k u_c(y) \quad (23)$$

Dependiendo del % de confianza que se requiera, el factor de cobertura disminuirá o aumentará. Para los centros de calibración y en general para el mundo de la metrología normalmente se usa un grado de confianza del 95% por lo que el factor de cobertura asociado es 2.

4.5. Certificado de calibración

El certificado de calibración es un documento que asegura que dicha máquina ha sido calibrada. En dicho documento está plasmada tanto la información relativa con el procedimiento de medición como información del laboratorio, de la máquina, etc. La parte fundamental de este documento son los resultados de medición sobre los cuales se decidirá si la máquina es apta y las correcciones que deberán de realizarse.

Según la norma ISO170025 este tipo de documento debe de contener cierta información básica, que se detalla a continuación (ref a Anexo I):

- Título
- Nombre y dirección del laboratorio
- Si el ensayo se realiza fuera de las instalaciones del laboratorio, se especificará el lugar donde se ha

realizado.

- Nombre e información del contacto del cliente.
- Identificación del método utilizado
- Identificación y descripción del objeto a calibrar.
- Fecha de recepción.
- Fecha de ejecución de la actividad del laboratorio.
- Fecha de emisión del informe.
- Referencia al plan y método de muestreo.
- aclaración de que los resultados se utilizaran solo para el objeto em cuestión.
- Resultados con unidades de medida.
- Identificación de las personas que autorizan el informe.

Con todo ello definido, el certificado de calibración quedará completo y el proceso de calibración totalmente definido, listo para enviarse al cliente.

4.6. Toma de Datos

En el certificado de calibración viene los resultados de las mediciones que se han realizado en el ensayo correspondiente. Esta toma de datos puede realizarse de diversas formas, dependiendo de la naturaleza del instrumento de medición. Con esto se refiere a la tecnología que caracteriza al instrumento que realiza la calibración. Como se ha visto anteriormente se puede utilizar instrumentos muy simples o más tecnológicos que van a acompañados de un software que realiza la toma de datos y su posterior análisis.

Habrán ensayos en donde el operario será el encargado de realizar la toma de datos durante todo el procedimiento. En este caso realiza una labor activa tanto en el montaje del instrumento en la zona de trabajo como durante el ensayo. El operario es el encargado de ir anotando todos los resultados en la hoja de trabajo para cada una de las posiciones que se hayan definido.

Existen otros ensayos en los que se utilizan instrumentos más avanzados tecnológicamente, que cuentan con un software que registra los resultados y los analiza. En este caso el operario actúa activamente durante el montaje del instrumento, pero luego para ciertos ensayos el software es el encargado de realizar la toma de datos. Una vez la toma de datos ha concluido el software puede tener la capacidad de realizar el análisis de los datos para presentar una hoja con el resumen del ensayo (mediciones en los puntos especificados, incertidumbres, diagramas de evolución, etc). Con ello el operario solo deberá interpretar este resumen para ver si la máquina cumple con los requisitos de calidad expuestos o no.

En resumen, la toma de datos automatizada es más precisa ya que se elimina una posible fuente de incertidumbre. El operario ya no interviene en el proceso de toma de datos por lo que los datos serán más fiables. Por el contrario, la toma de datos manual suele ser más fácil de llevar a cabo y con menos coste ya que los instrumentos que se utilizan no son caros. En el Anexo A se puede ver un ejemplo de software para la toma de datos y análisis de estos, utilizado con el láser XL-80 de Renishaw. Además, también se expone una hoja de trabajo típica para la toma de datos manual.

5 CONCLUSIÓN

A lo largo del presente estudio se ha dado a conocer todos los aspectos que intervienen en la calibración de una máquina herramienta. Para que una máquina herramienta quede completamente calibrada, normalmente se debe de elegir varios procesos de calibración. Como se ha visto anteriormente cada procedimiento de calibración afecta a una característica de la máquina herramienta (planitud, rectitud, perpendicularidad, etc.). El número de procedimientos de calibración que se le puede hacer a una máquina herramienta también está limitado por sus propias características (número de ejes, movimiento de la herramienta y/o mesa de ensayo, tamaño, etc.). Los aspectos económicos pueden influir sobre la elección de las herramientas ya que una misma calibración se puede hacer con distintas herramientas variando obviamente su manera de realizar la medida y su consiguiente toma de datos.

Al realizar el estudio sobre los procedimientos de calibración se ha visto que existe un número mínimo de mediciones para caracterizar una máquina herramienta. Esto quiere decir que algunos ensayos relacionados con la posición y orientación están relacionados entre sí, por lo que realizarlos para todos los ejes de la máquina herramienta sería redundante. Para ello tendrán que cumplirse las siguientes condiciones:

- Todas las posiciones iniciales de los ejes lineales pueden ponerse a cero.
- Se pueden emplear los ejes lineales para definir la orientación y posición del sistema coordenado. Esto quiere decir que coincidan los ejes lineales de la máquina con los ejes de referencia de las mediciones.

En este caso varias mediciones pueden suponerse cero y con ello eliminarlas de la lista de calibraciones a realizar. Esto variará dependiendo si se trata de una máquina de tres ejes o de cinco ejes. En las tablas 1 y 2 se puede ver las mediciones con las que quedaría caracterizado la máquina dependiendo de los ejes que tiene.

Eje Y	Eje X	Eje Z	Husillo (C)
-	(0)	-	0
(0)	-	-	0
-	-	(0)	-
0	-	E_{A0Z}	$E_{A0(C)}$
-	0	E_{B0Z}	$E_{B0(C)}$
0	E_{C0X}	-	-

Tabla 1. Número de mediciones necesarias para una máquina de tres ejes

Eje C	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje A	Husillo (C1)
0	(0)	-	-	-	$E_{X0(C1)}$
0	-	(0)	-	E_{Y0A}	$E_{Y0(C1)}$
-	-	-	(0)	0	-
E_{A0C}	-	0	E_{A0Z}	(0)	$E_{A0(C1)}$
E_{B0C}	0	-	E_{B0Z}	E_{B0A}	$E_{B0(C1)}$
(0)	0	E_{C0Y}	-	E_{C0A}	-

Tabla 2. Número de mediciones necesarias para una máquina herramienta de cinco ejes.

A continuación se expone una serie de máquinas representativas del mercado sobre las cuales se marca los

posibles ensayos a realizar. Este grupo de máquinas trata de englobar todas las características de las máquinas herramientas para que se pueda observar que ensayos se puede realizar sobre cada una de ellas. No es imprescindible realizar todos estos procedimientos de calibración para dichas máquinas herramientas. La decisión sobre los ensayos a realizar recae en las necesidades del cliente. La tabla 3 actúa a modo de orientación acerca de los ensayos que se pueden realizar sobre cada máquina herramienta. En particular para cada máquina herramienta le afectará a los ejes correspondientes según corresponda.

Tabla 3. Ensayos en diferentes máquinas herramientas

	GANTRY	CENTRO DE MECANIZADO	CENTRO DE TORNEADO	MÁQUINA DE CORTE PANEX	PUNTEADORA	RECTIFICADORA
1. RECTITUD	X	X	X	X	X	X
2. POSICIONAMIENTO LINEAL	X	X	X	X	X	X
3. MOVIMIENTO ANGULAR	X	X				
4. POSICIONAMIENTO ANGULAR	X	X	X			
5. PARALELISMO	X		X	X	X	
6. COAXIALIDAD	X	X	X	X	X	
7. PERPENDICULARIDAD	X		X	X	X	X
8. TRAYECTORIA CIRCULAR	X			X	X	
9. PLANITUD	X			X	X	X

El ensayo de movimiento cónico y el de intersección de líneas medias no se ha tenido en cuenta para la elaboración de esta tabla. Esto se debe a que son ensayos específicos para ciertas características de algunas máquinas herramientas. Por lo que estos ensayos irán a requerimiento del cliente si este así lo desea. Por ejemplo el ensayo de movimiento cónico está destinado para las herramientas que realizan este movimiento para el mecanizado de una pieza de forma cónica. Por otro lado, el ensayo de intersección entre líneas medias se realiza para estudiar el punto en el que se encuentran dos ejes de una máquina herramienta. Esto es interesante cuando los ejes a estudiar no son perpendiculares ni paralelos.

En la tabla 4 se puede ver un resumen de las distintas herramientas y los ensayos en los que se utiliza. Como se puede ver los instrumentos que utilizan interferometría son los más completos ya que pueden ser usados en múltiples ensayos con gran precisión. Con el sensor de desplazamiento también se pueden realizar múltiples mediciones pero en la mayoría de los casos se necesitarán elementos auxiliares como reglas, escuadras, superficie de referencia, etc. Para la elección del instrumento más adecuado habrá que fijarse no solo en el precio de este

sino en el procedo de medicion. Los instrumentos con una mayor tecnologia suelen ser mas fáciles de usar, mas rápidos y mas precisos. La decision del instrumentos a utilizar recae en el laboratio según el presupuesto que se disponga, y la calidad de resutlados que se quiera presentar.

Tabla 4. Herramientas en los distintos ensayos

	SENSOR DE DESPLAZAMIENTO	NIVEL DE PRESIÓN	MICROSCOPIO E HILO TENSO	TELESCOPIO DE ALINEAMIENTO	AUTOCOLIMADOR	LÁSER TRACKER	INTERFEROMETRIA	ENCODER ROTATIVO DE REFERENCIA
1. RECTITUD	X		X	X			X	
2. POSICIONAMINETO LINEAL						X	X	
3. MOVIMIENTO ANGULAR		X			X		X	
4. POSICIONAMIENTO ANGULAR					X		X	X
5. PARALELISMO	X						X	
6. COAXIALIDAD	X							
7. PERPENDICULARIDAD	X						X	
8. TRAYECTORIA CIRCULAR								
9. PLANITUD	X				X	X	X	

No se han incluido todos los procedimietnos de calibracion para máquinas herramientas ya que la lista seria demasiado extensa. Este trabajo se ha centrado en los principales procedimietnos de calibracion para que una máquina cumpla una seria de normas de calidad y requisitos de operación. Existen otras técnicas como los ensayos volumetricos que dan mas informacion sobre el estado de la máquina herramienta pero a su vez son mas complejos de realizar. Se podría profundizar más en el estudio de estas técnicas y de otras similares para englobar al máximo todas las posibles mediciones que se pueden realizar a las máquinas herramientas.

El campo de la metrologia avanza constantemente y se siguen perfeccionando o creando nuevos procedimietnos de calibración. La creación de nuevas máquinas herramientas o herramientas de medición pueden requerir nuevos procedimietnos de calibración o una adaptacion de los que ya existen. Todos aquellos nuevos procedimietnos son un interesante punto de estudio para poder continuar con este estudio y lograr englobar todas las principales mediciones en un solo documento.

ANEXO I PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

A.1 Características del equipo

Este documento es extensible a cualquier máquina herramienta del mercado destinada a ser calibrada por los métodos más adelante descritos. Estos procedimientos se verán afectados ligeramente para adaptarse a las características de cada máquina según corresponda.

A.2 Objeto

El procedimiento de calibración expuesto está destinado a describir los principales ensayos para realizar un mantenimiento preventivo de las diferentes máquinas herramientas existentes en el mercado. Se ha tenido en cuenta para ello las principales características de todas las clases de máquinas herramienta (torno, rectificadora, fresadora, máquina de 3/5 ejes, centro de mecanizado, etc.). Con esto se pretende que el presente documento pueda ser extensible al mayor número de máquinas herramientas.

A.3 Breve descripción

Las mediciones que se describen en el presente documento tienen en cuenta todos los posibles errores que se puede encontrar en una máquina herramienta. Dependiendo de la máquina se realizarán un conjunto de mediciones u otro para que esta quede totalmente calibrada y cumpla los requerimientos del cliente. Principalmente se tendrá en cuenta las características (número de ejes, tamaño, tecnología, etc.) de la máquina para la elección de las mediciones a realizar, además de las exigencias del cliente.

Los errores dentro de una máquina herramienta se pueden clasificar en muchos grupos dependiendo de su origen. Los más significativos o los que tienen más importancia para el acabado de la pieza son los errores geométricos. Estos errores afectan principalmente al funcionamiento de la máquina y por ello es indispensable realizar una calibración cada cierto tiempo para comprobar que se mantienen en unos límites marcados.

Debido a la gran cantidad de errores es recomendable agruparlos según al componente de la máquina herramienta que afecte directamente. Principalmente se tiene unos errores que afectan a los ejes lineales:

- Error de posicionamiento lineal
- Error de rectitud
- Error de movimiento angular

Del mismo modo se tiene errores que afectan a los ejes de rotación:

- Error de posicionamiento angular
- Error de movimiento de los ejes de rotación
- Error de movimiento coaxial
- Error de movimiento radial
- Error de oscilación del movimiento
- Error de desplazamiento de los ejes

- Error de desplazamiento radial de un eje de rotación en un punto dado

Por otro lado, se tienen errores de comparación para verificar que un eje se mantiene paralelo o perpendicular a cierto elemento según se requiera. Como se puede comprobar más adelante, los errores de paralelismo o perpendicularidad pueden comprobarse con respecto a diversos componentes. Pueden compararse con otros ejes de la máquina, otro plano, o un patrón.

Por último, se tienen los errores que se miden en un plano y de los que se puede extraer algo más de información sobre los fallos de la máquina herramienta:

- Error de trayectoria circular
- Planitud

A.4 Campo de aplicación

Los diferentes procedimientos de medición serán realizados en las instalaciones del fabricante debido a la magnitud de las máquinas herramientas. Se tendrá en cuenta todas las condiciones previas antes de realizar la toma de datos para asegurar que las condiciones de medición son óptimas.

A.5 Notas preliminares

Se tendrá en cuenta unas ciertas condiciones que tiene que cumplir el lugar donde se va a realizar el ensayo. Con ello se puede asegurar que las mediciones serán lo más exactas posibles y se pueda realizar los ensayos sin ningún problema. A continuación, se lista una serie de acciones a realizar:

- Comprobar el estado general, funcionamiento e identificación correcta de la máquina.
- Es importante conocer perfectamente todos los pasos descritos en el presente procedimiento de calibración antes de proceder a la calibración de un equipo.
- Antes de proceder a la calibración, dejar que la máquina se estabilice a la temperatura ambiente del laboratorio durante al menos doce horas, junto con los equipos que intervienen en la calibración.
- Limpiar las superficies de las zonas a ensayar.
- Situar los ejes de la máquina X, Y y Z en sus respectivas posiciones iniciales 0.
- Realizar las pruebas previas al ensayo descritas más adelante en este punto.
- Gradiente de temperatura debe de ser (del tipo de la tabla C.1 de la ISO230-3)

Es de vital importancia rellenar las hojas de trabajo con los datos identificativos del equipo, el nº de informe, la fecha y las condiciones ambientales (temperatura y humedad), debiendo estar estas últimas comprendidas entre $20.0\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ y $\leq 60\% \text{HR}$ para dar validez al proceso de calibración.

A.5.1 Prueba de histéresis de montaje

Con esta prueba principalmente lo que se quiere es cuantificar, si existiese, cualquier tipo de holgura de montaje que afecte a los resultados de la toma de datos final. Se puede deber a elementos de sujeción no instalados o que los soportes no posean la rigidez suficiente para soportar el proceso de medición. La pérdida en la repetibilidad de los resultados es un claro indicador de histéresis u holgura de montaje. En el caso que se obtenga una histéresis significativa y aun después de ajustar la estructura de medición no se reduce esta histéresis, quiere decir que el problema puede ser propio de la máquina. El límite de aceptación de histéresis es el 10% de la repetibilidad prevista.

Se debe de seguir los siguientes pasos para realizar esta prueba:

1. Se instala y se ajusta a cero el reloj comparador en las dos posiciones de la estructura de medición, El reloj comparador debe de situarse en la misma dirección y sentido que el eje que se vaya a medir.

2. Se aplica manualmente una fuerza sobre lo que soporta el punto de referencia. Esta fuerza puede variar entre 20 N y 200 N, pero se recomienda utilizar 40 N. No es necesario llevar un control exacto de la fuerza a aplicar.
3. Dejar de aplicar esta fuerza progresivamente hasta cero. Anotar lo que marca el reloj comparador.
4. Realizar los pasos 2) y 3) pero con una fuerza en una dirección opuesta.
5. Si se hace la diferencia de ambas mediciones se obtiene la histéresis del punto de referencia.
6. Realizar los pasos 2) hasta 5) para el otro punto de la estructura de medición.
7. La suma de ambas histéresis dará el valor total de histéresis para el montaje.

A.5.2 Prueba de estabilidad

En las máquinas herramienta se puede producir vibraciones de todo tipo las cuales provienen tanto de fuentes externas como internas. Un incorrecto montaje de los instrumentos de medición hace que los resultados de las mediciones sean muy sensibles a las vibraciones. Por ello se siguen estos pasos para realizar la prueba de estabilidad del montaje de los instrumentos de medición y así poder eliminar el impacto que pueda llegar a tener un incorrecto montaje en la incertidumbre de las mediciones.

1. Se monta el instrumento de la manera prevista para el ensayo de calibración.
2. Se coloca la máquina herramienta en la mitad del recorrido.
3. Sin mover la máquina se muestran los resultados de la prueba para un ritmo y tiempo iguales a los del ensayo.

A.6 Procedimiento

Dependiendo del error que se quiera medir se realizará el ensayo correspondiente con la herramienta que más le convenga. En cada punto se especifica el error que se mide, las características, el dispositivo de medición y su montaje.

A.6.1 Rectitud

Los ensayos de rectitud se realizan sobre trayectorias lineales para detectar posibles desviaciones o distorsiones en el movimiento. Dichas desviaciones se producen en las dos direcciones perpendiculares a la dirección de movimiento de la trayectoria lineal.

La base de estos ensayos se encuentra en medir los desplazamientos relativos con respecto a una referencia de rectitud. El dispositivo de medición proporciona la diferencia entre la referencia de rectitud y el desplazamiento lineal, que es paralelo a la referencia.

Cuando se haya definido el eje lineal sobre el que se medirá se procederá a determinar los puntos de medida sobre este. Estos puntos marcan las zonas donde el instrumento realizará las tomas de datos. El número de puntos dependerá de la longitud del eje que se mida ya que estos puntos de medición deben abarcar el máximo de su recorrido. Para ejes de hasta 250 mm los intervalos deberán de ser de 25 mm y para ejes más largos los intervalos no pueden superar el 1/10 de la longitud del eje. El número de repeticiones de estas mediciones a lo largo del eje queda a convenio entre el cliente/fabricante y el laboratorio.

A continuación, se distinguen los diferentes ensayos que se pueden realizar según el instrumento que se utilice:

- Regla y sensor de desplazamiento lineal: la referencia de rectitud es una regla sobre la cual se posiciona el sensor de desplazamiento, lo más próximo al punto funcional. Según las características de la máquina herramienta se moverá a las distintas posiciones, la regla o el sensor de desplazamiento. La regla va montada sobre la mesa móvil y el sensor de desplazamiento en el husillo, como se puede ver en la figura AI.1.

Para la medición del error de rectitud en el plano horizontal se instala el comparador paralelo al eje horizontal en el husillo y la regla de la misma manera, pero sobre la mesa. Se mueve el husillo con el reloj hasta que entre en contacto con la regla y se ajusta el reloj comparador a 0. A continuación, se procederá a mover el husillo por las diferentes posiciones marcadas y anotando el valor del comparador en cada una de ellas.

El borde de la regla por donde se desplaza el comparador puede tener imperfecciones que afecten a las mediciones. Por ello lo más conveniente es realizar dos repeticiones del grupo de mediciones. Uno de los grupos de medición se hará girando la regla 180 ° con respecto al montaje inicial. Una vez se haya obtenido la tabla con los resultados se podrá separar la desviación de la rectitud del eje a medir de la desviación de la rectitud del borde de la regla, según las siguientes ecuaciones:

$$M(x) = \frac{[E_1(x) + E_2(x)]}{2} \quad (AI.1)$$

$$S(x) = \frac{[E_1(x) - E_2(x)]}{2} \quad (AI.2)$$

Donde $M(x)$ representa la desviación de rectitud del borde de la regla y $S(x)$ es la desviación de la rectitud del eje en cuestión para una posición x . $E(x)$ son las gráficas de los datos obtenidos durante el ensayo en ambas posiciones de la regla.

Para la medición del error de rectitud en el plano vertical se procede de la misma manera, pero instalando la regla y el sensor perpendicular al eje de desplazamiento en el plano vertical.

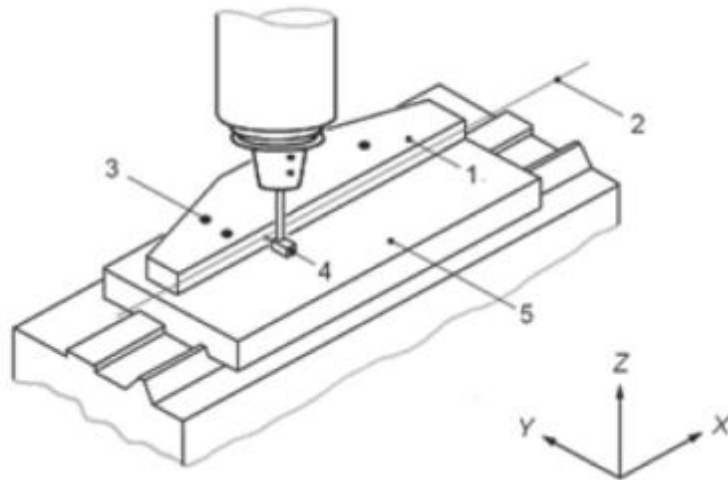


Figura AI. 1 Ensayo de rectitud con regla y comparador

- Interferómetro láser de rectitud: en este caso la referencia de rectitud se define con el eje de simetría del reflector de doble espejo. Para este ensayo se hará uso de los componentes que vienen dentro del kit del Laser XL-80 de Renishaw y en concreto: el interferómetro de rectitud, reflector de rectitud, base de rectilinealidad, bloques de fijación, reflector de gran tamaño, espejo giratorio vertical y obturador de rectilinealidad. Dependiendo de la longitud del eje se deberá utilizar el conjunto de montaje de largo alcance (hasta 29 m) o de corto alcance (hasta 3.9 m), esto también afectará al programa que se utilice dentro del software de Renishaw.

Si se procede a realizar la medición de la rectitud sobre un eje horizontal se monta el interferómetro de rectitud sobre el husillo, el cual va a describir el movimiento lineal que se va a comprobar. Por otro lado, se fija el reflector de rectitud en la parte de la máquina herramienta que sujeta la pieza. El láser va instalado sobre un trípode que debe estar alineado con la mesa de la máquina herramienta de tal manera que tenga rigidez y no presente vibraciones. Según la posición en la que se coloque el reflector de rectitud (horizontal o vertical) se medirá la rectitud en un plano u otro. En la figura AI.2 se muestra un

ensayo de rectitud del eje horizontal en el plano vertical. Si interesa realizar luego el ensayo de rectitud del eje horizontal en el plano horizontal se procederá a mover el reflector de rectitud 90°.

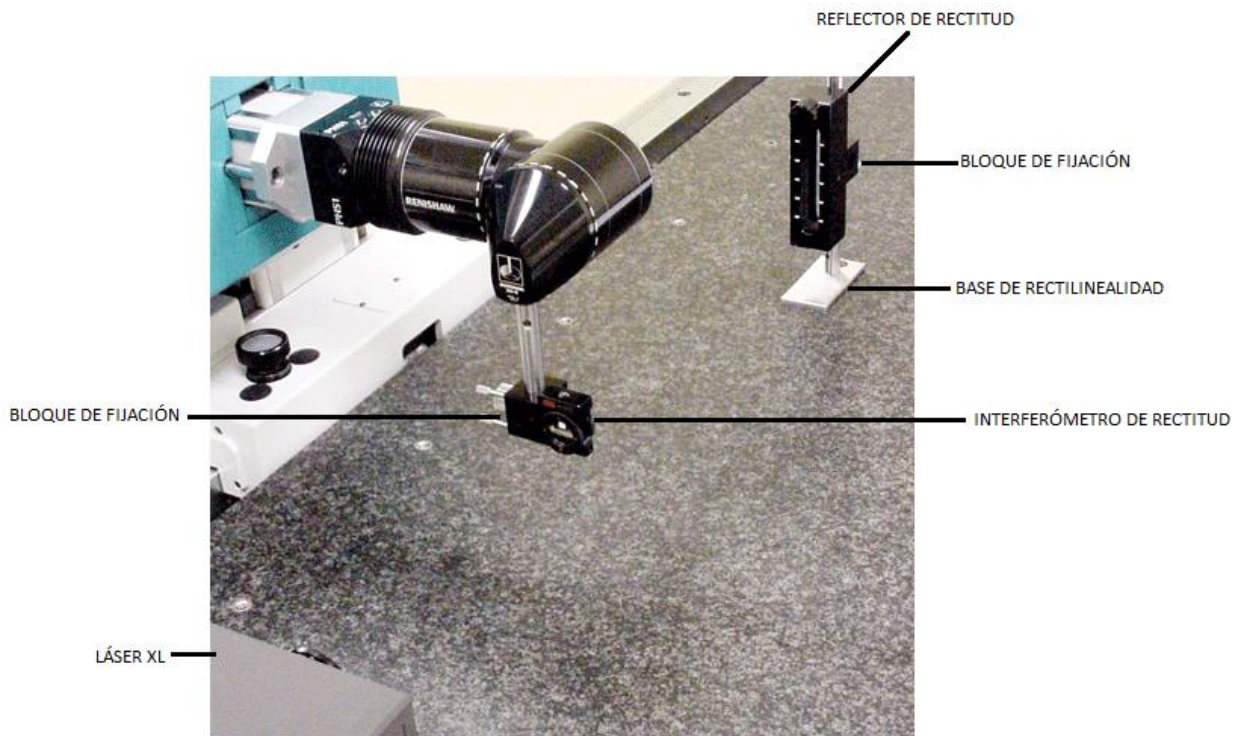


Figura AI. 2 Ensayo de rectitud con interferómetro láser (opción 1)

Puede darse el caso de un ensayo en el que no se pueda colocar el reflector detrás del interferómetro por falta de espacio o porque el movimiento del eje no lo permita. En ese caso se debe de realizar un montaje diferente haciendo uso, además de los componentes comentados anteriormente, el retroreflector de gran tamaño. El retroreflector de gran tamaño se monta en el husillo con el adaptador M8, proporcionado en el kit. Adosado al reflector de gran tamaño se instala el interferómetro láser. El reflector de rectitud permanecerá estático montado en la mesa de la máquina con el bloque de fijación y la placa de rectilinealidad. En la figura AI.3 se puede ver un esquema de este montaje.

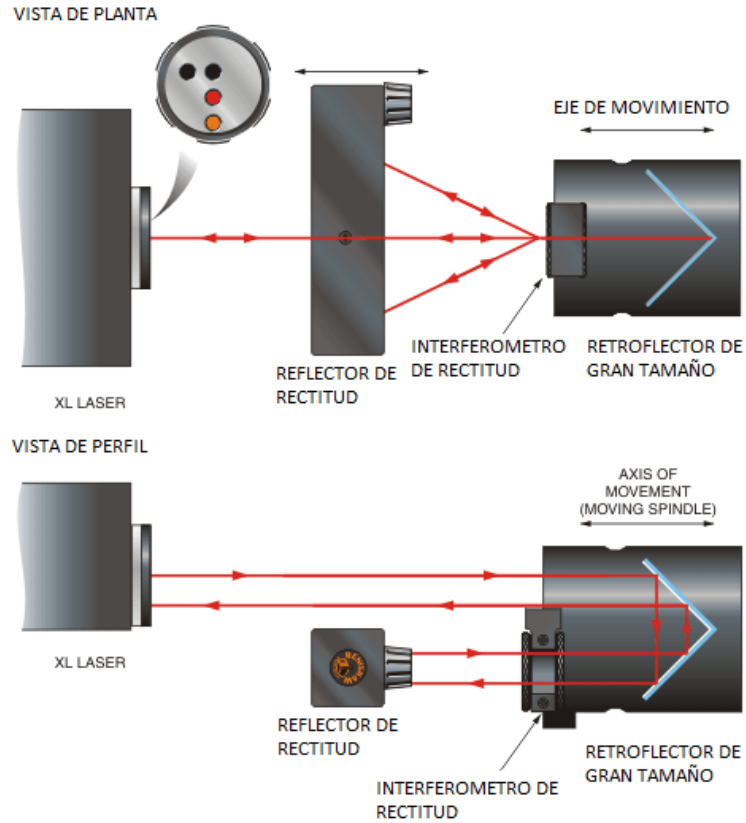


Figura AI. 3 Ensayo de rectitud con interferómetro láser (opción 2)

En el ensayo sobre el eje vertical se hará uso de todos los accesorios comentados anteriormente y además del espejo giratorio. Sobre la base de rectilinealidad se instala el espejo giratorio y el reflector de rectitud. La base de rectilinealidad junto con ambos accesorios se debe instalar sobre la mesa en la posición justo debajo del retroreflector de gran tamaño. El retroreflector se montará en el husillo con el adaptador M8 junto con el interferómetro de rectitud. El retroreflector debe de estar orientado de tal manera que la abertura objetivo este encima del espejo giratorio y el interferómetro laser encima del reflector de rectitud. El haz emitido por el láser deberá estar 35 mm por encima de la mesa de la máquina. En las figuras AI.4 y AI.5 se pueden ver las opciones de montaje cuando se trata del eje vertical.

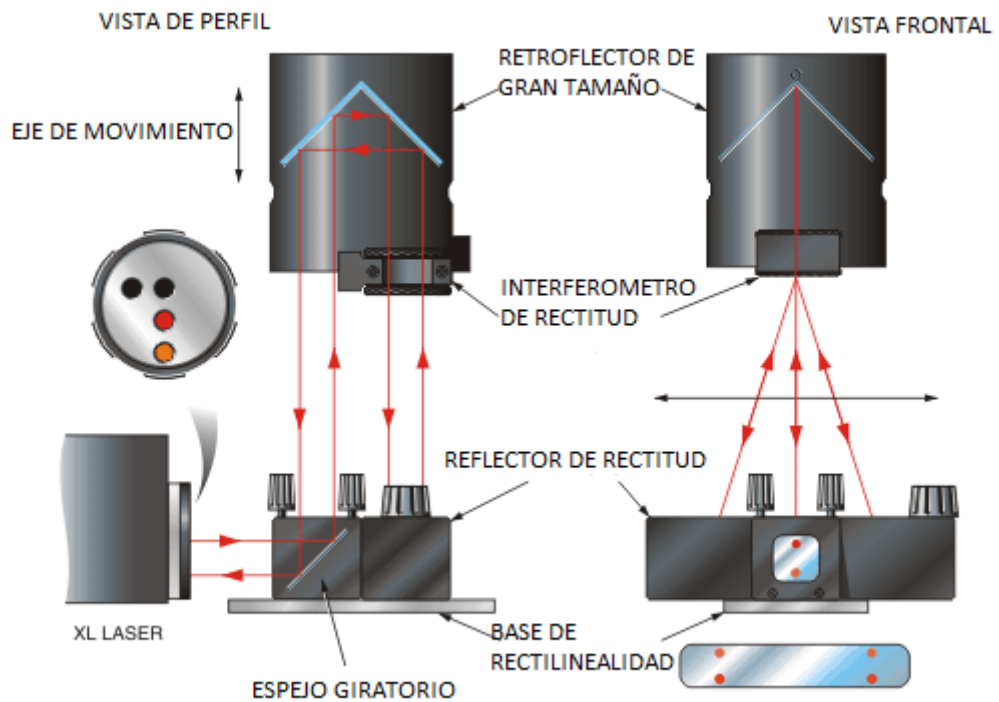


Figura AI. 4 Ensayo de rectitud (eje vertical) con interferómetro láser (opción 1)

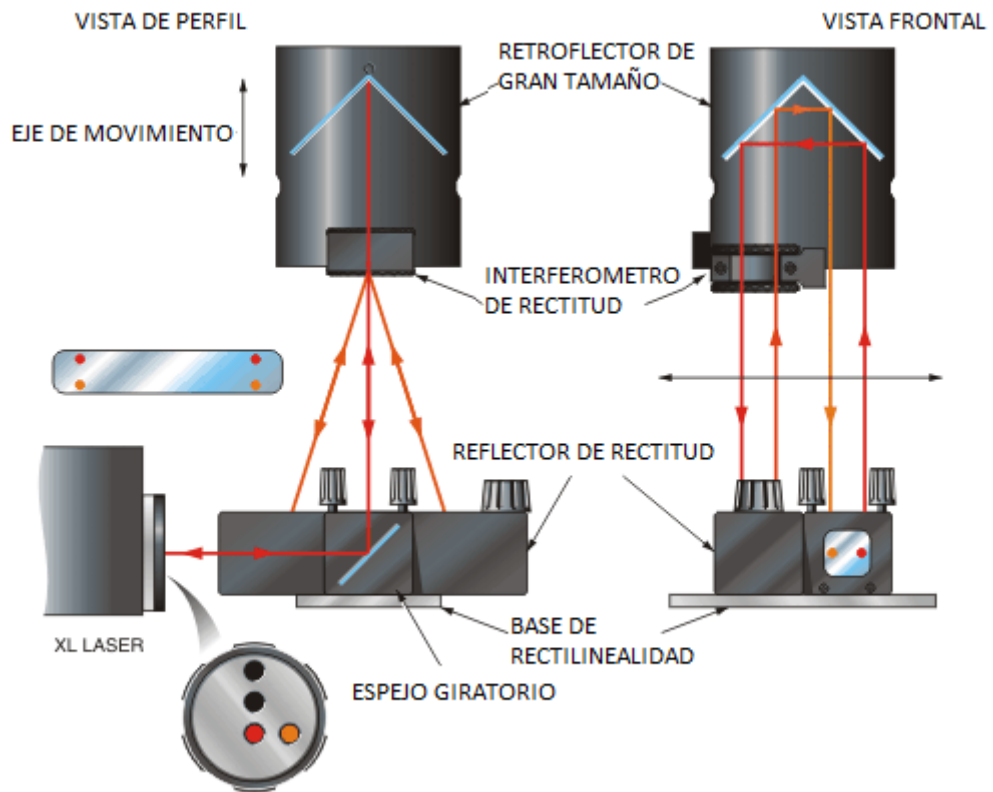


Figura AI. 5 Ensayo de rectitud (eje vertical) con interferómetro láser (opción 2)

Se realizará una serie de ajustes en el montaje realizado para que los resultados sean los más precisos posibles. Con estos ajustes se conseguirá alinear el haz del láser con el eje de la máquina a medir para que ambos estén lo más paralelo posible y así asegurar que le llega la máxima intensidad de señal. Si la

toma de datos se hace sobre un eje horizontal el ajuste se realizará de la siguiente manera:

1. Se coloca el obturador del láser en la configuración de diámetro reducido. Girar el obturador hasta conseguir algo parecido a la figura AI.6.



Figura AI. 6 Obturador del cabezal láser con haz reducido

2. Se posiciona el interferómetro cerca del láser y ortogonal a la máquina. El interferómetro debe de quedar con el objetivo blanco al lado derecho como se muestra en la figura AI.7. El haz debe de incidir sobre este objetivo lo más céntricamente posible, para ello se ajustará el láser según convenga.



Figura AI. 7 Interferómetro de rectitud (posición 1)

3. Se procede a girar el interferómetro de tal manera que el haz del láser indica sobre la parte derecha de este tal como se puede ver en la figura AI.8.



Figura AI. 8 Interferómetro de rectitud (posición 2)

4. A continuación, se procede a comprobar que el reflector de rectitud este verticalmente instalado y sea perpendicular al haz del láser. El reflector se debe de encontrar a 0.1 m o a 1 m del interferómetro según si se trate de corto alcance o largo alcance respectivamente.
5. Se coloca el interferómetro a mitad del recorrido.
6. Se procede a ajustar la posición y altura del reflector para que los haces divergentes incidan sobre la mitad de la parte derecha del reflector. Además, se tiene que comprobar que los haces se encuentran a 0.6 mm con respecto al eje del reflector como se puede ver en la figura AI.9.

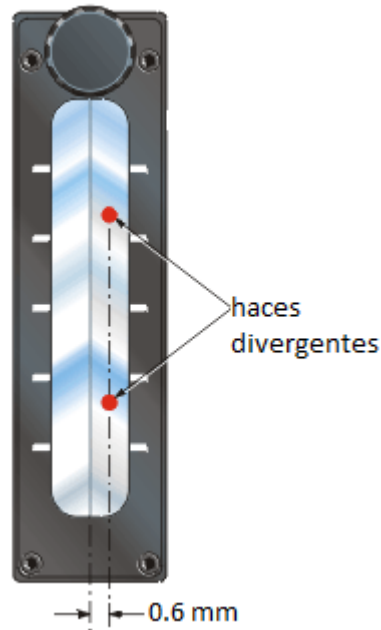


Figura AI. 9 Reflector de rectitud

- Se verifica que los haces de vuelta inciden sobre el obturador como se indica en la figura AI.10 y además pasan por la abertura de retorno del interferómetro.



Figura AI. 10 Obturador del cabezal láser

En este punto se debe de comprobar que los haces inciden simultáneamente sobre el punto que se indica en el paso anterior. Se pueden dar algunos casos de desalineación: los haces se encuentran por debajo o por encima del centro del objetivo para lo cual se debe de ajustar la inclinación del reflector. Si los haces no se superponen hay que girar el interferómetro. Si los haces se encuentran a la izquierda o derecha se ajusta el reflector de rectitud o el láser de manera horizontal. En la figura AI.11 se pueden ver gráficamente estos tres casos de desalineación.



Figura AI. 11 Diferentes casos de desalineación en el objetivo del obturador

- Cuando se consiga que incidan sobre el centro del objetivo se gira el obturador para que genere el haz completo y posicionar el láser en modo medición como en la figura AI.12.



Figura AI. 12 Obturador del cabezal láser con haz completo

9. En el software se debe de comprobar que la intensidad de la señal del haz es la correcta. Si se da el caso que apareciese “Signal Low” o “Beam Obstructed” se examina que el interferómetro no obstruye el haz y si es así se ajustarlo para que se muestre como en la figura AI.13. Esta comprobación se debe de realizar sobre todo el eje del recorrido. Si se vuelven a mostrar los resultados de fallo se procederá a realizar el paso 1 y repetir todos los pasos nuevamente.



Figura AI. 13 Interferómetro de rectitud

Si el eje sobre el que se hace la toma de datos es el eje vertical, se deberá realizar el siguiente ajuste:

1. Realizar la alineación del eje del haz del láser con un eje horizontal de la máquina siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.
2. Se gira el obturador del láser hasta conseguir la configuración de laser reducido como en la figura AI.14.



Figura AI. 14 Obturador del cabezal láser con haz reducido

3. Se coloca un objetivo en la parte superior del espejo giratorio y se mueve el láser para que el haz reducido incida en la parte blanca de este. En la figura AI.15 se puede ver un ejemplo de este paso.

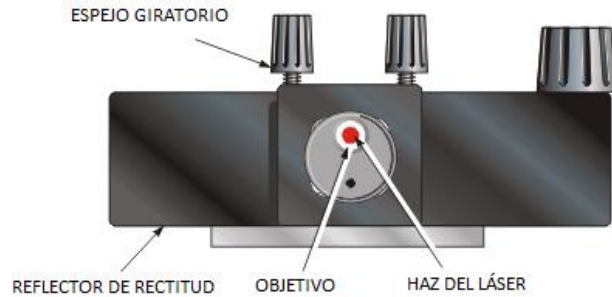


Figura AI. 15 Espejo giratorio

4. Colocar el objetivo en la abertura objetivo del retroreflector de gran tamaño de tal manera que la parte blanca queda en la parte interior de este, como se ve en la figura AI.16.

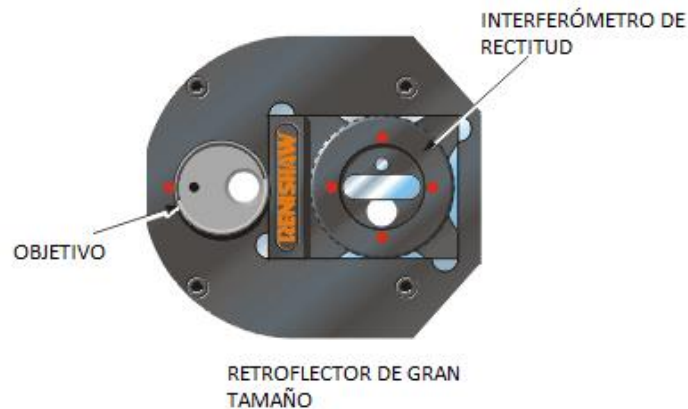


Figura AI. 16 Retroreflector de gran tamaño

5. Trasladar el retroreflector de gran tamaño lo más cerca posible del espejo giratorio, asegurándose que se pueda ver el objetivo. Mover el retroreflector de gran tamaño para hacer coincidir el haz del láser con el objetivo. Si en un caso no se puede mover el retroreflector de gran tamaño se procede a mover la mesa, el láser o la base de rectilinealidad. Para alinear perpendicularmente al haz del láser, se moverá horizontalmente el láser y precedido de este se moverá en paralelo la base de rectilinealidad. Para alinear paralelo al haz del láser se alejará o acercará la base de rectilinealidad al cabezal de láser según convenga.
6. Subir el retroreflector de gran tamaño hasta su máximo recorrido y comprobar que el haz del láser esta alineado con el objetivo. Se procederá a ajustar los mandos de control del espejo giratorio si es necesario ajustar la posición del haz del láser. En la figura AI.17 se tiene una vista en planta del espejo giratorio y de sus mandos de control para realizar la alineación.

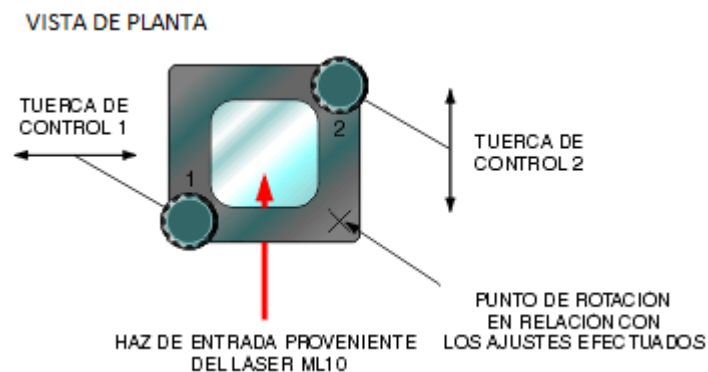


Figura AI. 17 Espejo giratorio

7. Bajar el retroreflector de gran tamaño hasta su mínimo recorrido y comprobar que el haz sigue incidiendo sobre el objetivo. Se moverá el retroreflector de gran tamaño en los ejes horizontales

para ajustar el haz en el objetivo. En el caso que no se pueda mover el retroreflector se moverá la mesa, el láser o la base de rectilinealidad según se ha descrito en el punto 5.

8. Repetir los pasos 6 y 7 hasta que no se necesite más ajuste.
9. Se retira el objetivo y se sube el retroreflector hasta su máximo recorrido. Comprobar el recorrido del haz como se indica en la figura AI.18.

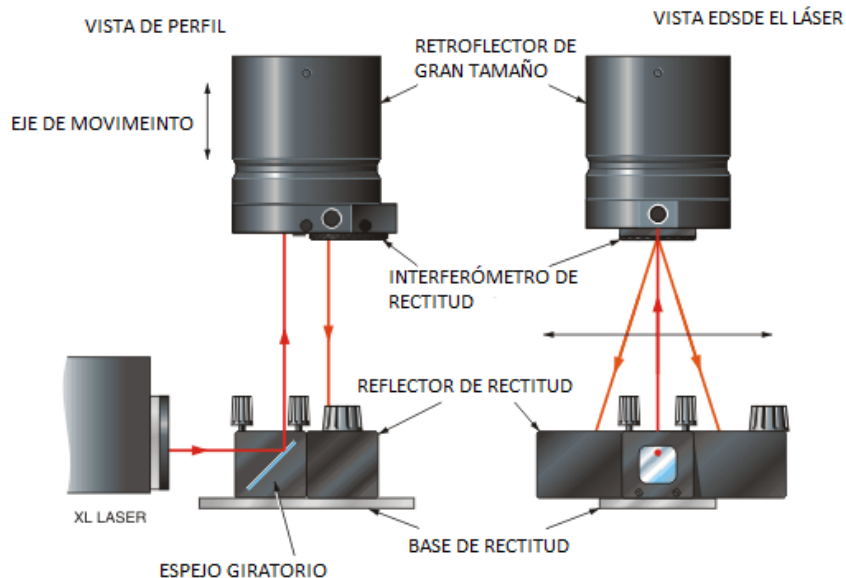


Figura AI. 18 Recorrido haz de láser

10. Girar la cara del interferómetro de rectitud para que los haces divergentes incidan sobre la mitad interior del reflector de rectitud. Se comprobará que ambos haces son simétricos y distan 6 mm del eje del reflector de rectitud. Si los haces no inciden de la manera correcta se debe de ajustar el retroreflector de gran tamaño o la base de rectilinealidad para que sean perpendiculares al eje de la máquina. Si aun así no se consigue que los haces incidan de la manera correcta se procede a mover el retroreflector de gran tamaño o la base de rectilinealidad para conseguir alineación correcta. En el caso que no se puedan mover ninguno de los dos componentes se moverá solo el láser.
11. Ajustar la inclinación del reflector de rectitud para que los haces de retorno pasen por la abertura de retorno del interferómetro de rectitud.
12. Girar el obturador para que los haces de retorno se superpongan.
13. Si el haz de retorno se encuentra a la izquierda o derecha del centro, como se observa en la figura AI.19, se debe de ajustar el reflector de rectitud con su control de inclinación para centrarlo. Si se encuentra por encima o por debajo se debe de mover el retroreflector de gran tamaño o la base de rectilinealidad para alinear el haz de retorno en el centro.



Figura AI. 19 Desalineación del objetivo del obturador

14. Trasladar el retroreflector de gran tamaño hasta el mínimo recorrido comprobando que el haz del láser incide sobre el objetivo durante todo el recorrido. Para alinear el láser en posiciones cercanas se moverá el retroreflector de gran tamaño o la base de rectilinealidad y para posiciones lejanas se ajustará los mandos de control del espejo giratorio.

15. Girar el obturador para conseguir un haz normal.
16. Trasladar el retroreflector por todo el recorrido y comprobar la señal del haz del láser. Repetir los pasos 12 y 14 si se tiene una intensidad de señal baja.

El siguiente ajuste trata de eliminar el posible error de inclinación que pueda existir entre el eje de la máquina y el eje del reflector de rectitud. El fabricante del láser marca que para obtener unos resultados precisos el error de inclinación para ejes de largo alcance debe de disminuir a más de 100 μm y para ejes de corto alcance a más de 20 μm. Para realizar un correcto ajuste se seguirán los siguientes pasos:

1. Anotar la lectura de la medición en una posición cuando el reflector de rectitud y el interferómetro de rectitud se encuentran lo más próximos posible. También se anotará la separación entre ambos elementos.
2. Mover el eje de movimiento hasta conseguir la máxima separación entre el interferómetro de rectitud y el reflector de rectitud. Una vez conseguida, anotar la lectura del dispositivo y la distancia recorrida.
3. Se debe de ajustar el control de inclinación del reflector de rectitud hasta conseguir que R_c cambie de valor según el calculado en la ecuación (AI.3). Para seguir adelante se debe verificar que se encuentra en los límites marcados al principio según se trate de ejes de largo alcance y corto alcance.

$$R_c = -\frac{A \cdot R_0}{B} \quad (AI.3)$$

Se identifica A como la separación de las ópticas medidas en el paso 1, B es la distancia del punto de máxima aproximación al de máxima separación y R_0 es la medida de la posición anotada en el paso 2.


4. Al mover el reflector para inclinarlo y así conseguir el error propuesto puede que la intensidad de la señal se vea afectada. Si por el contrario no se produce esta reducción de la intensidad se ira al paso 8.
5. Rotar el obturador del láser para reducir el haz y comprobar que el haz de retorno cae sobre el objetivo como se indica en la figura AI.20.



Figura AI. 20 Obturador del cabezal láser con haz reducido

6. Mover y girar el cabezal del láser horizontal o verticalmente según la rectitud que se esté calculando, hasta que el haz de retorno este en el centro del objetivo. Además, se debe comprobar que los haces de salida y retorno pasan por el interferómetro sin cortes y son simétricos en el reflector de rectitud con respecto a su línea media.
7. Girar de nuevo el obturador para ponerlo en su posición inicial y volver al paso 1.
8. Por último, se moverá el interferómetro de rectitud a la posición de máxima aproximación entre ambas óptica y se anotará la medición. Se debe de comprobar que la lectura es menor que la tolerancia indicada al comienzo (20 μm para ejes de corto alcance y 100 μm para ejes de largo alcance). Si no se consiguen los objetivos marcados se debe de repetir el proceso de nuevo.

Una vez se haya realizado todos los ajustes descritos entre la maquina y el dispositivo, estarán casi listos para empezar la toma de datos. Pero antes es importante fijar un criterio de signos para las desviaciones, para que no exista diferencia entre las desviaciones que se producen y las medidas por el láser. Para ello

se coge el criterio de signos de la figura AI.21. Para comprobar que el criterio de signos concuerda, se debe de empujar el interferómetro en la dirección positiva de las desviaciones tal como se haya definido. Si en la pantalla principal del software de rectitud no se muestra una desviación positiva se pulsa  , en la barra de tareas de la misma pantalla, para cambiar el criterio de signos y se vuelve a comprobar de la misma manera.

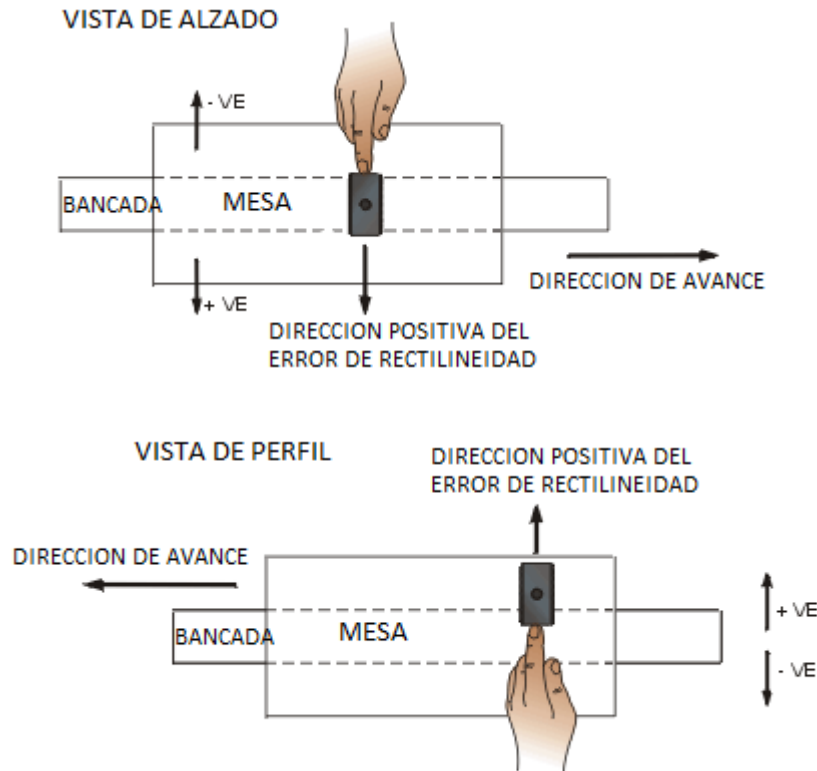


Figura AI. 21 Criterio de signos para el ensayo de rectitud

A.6.2 Movimiento de posicionamiento lineal

La calibración de posicionamiento lineal se basa en medir la distancia recorrida por el componente móvil de la máquina herramienta según el eje que se requiera. Se posiciona de manera manual o mediante control numérico y la diferencia entre el valor previsto y el dato real es la desviación lineal de posicionamiento.

Los elementos que se utilizaran son:

- Laser XL-80 de Renishaw
- Desdoblador de haz
- Dos reflectores lineales
- Dos objetivos
- Los correspondientes montajes para las ópticas.

A la hora de la elección de las posiciones donde se realizará las medidas, estas pueden estar acordadas con el cliente o pueden ser de elección libre. En este último caso habrá que tener en cuenta la ecuación (AI.4) para el cálculo de las posiciones de medición.

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (AI.4)$$

Donde i se refiere al número de la posición, p es un intervalo equiespaciado a lo largo del recorrido de

medición y r es un número que debe encontrarse entre $\pm 30\%$ de p . La longitud del eje lineal influye en este cálculo ya que si mide hasta 2000 mm el número mínimo de posiciones seleccionadas es de 5 realizando un ciclo de ensayo normal. Con esto se refiere a realizar un grupo de mediciones en un solo sentido. Para ejes con una longitud mayor el intervalo puede tener un promedio de 250 mm y debe de realizarse una medición en cada sentido de aproximación. En el caso de máquinas de gran tamaño con ejes de más de 4000 mm las posiciones de medición deben de ser acordada entre fabricante/suministrador y el usuario.

Primero se debe instalar el desdoblador de haz sobre un reflector lineal y ajustarlos usando los dos tornillos del reflector. Este conjunto actuará como interferómetro lineal y puede instalarse tanto en la parte móvil como en la parte estacionaria de la máquina. Normalmente el interferómetro se instalará de manera estacionaria para así poder realizar mediciones a ejes con un recorrido largo (40 m) y además evitar algunos posibles errores. Al interferómetro lineal se le instala un bloque de fijación junto con un pilar los cuales se fijarán a la máquina gracias a un bloque magnético. Por otro lado, se tiene el otro reflector lineal que se montará con otro bloque de fijación y pilar a un bloque magnético para sujetarlo rígidamente a la máquina. La figura AI.22 es un ejemplo de este montaje.

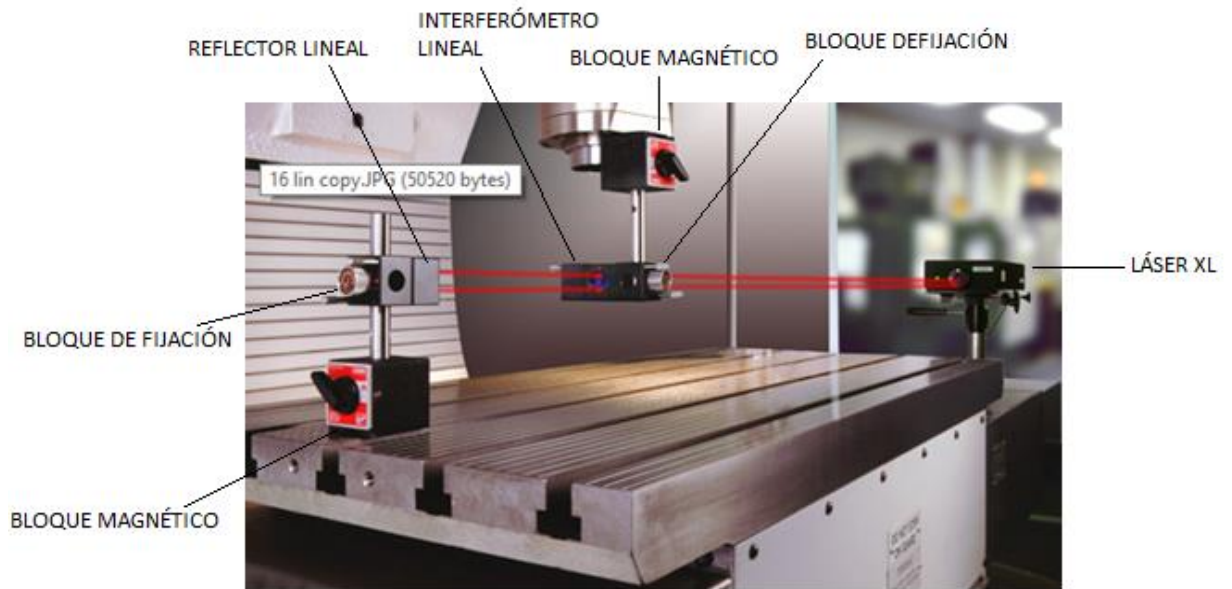


Figura AI. 22 Ensayo de posicionamiento lineal

A continuación, en las figuras AI.23 hasta AI.27 se muestra varios esquemas de montaje que se pueden realizar según las características de la máquina o según el criterio del operador. En cada una de ellas se puede ver los elementos necesarios para llevar a cabo dicho montaje.

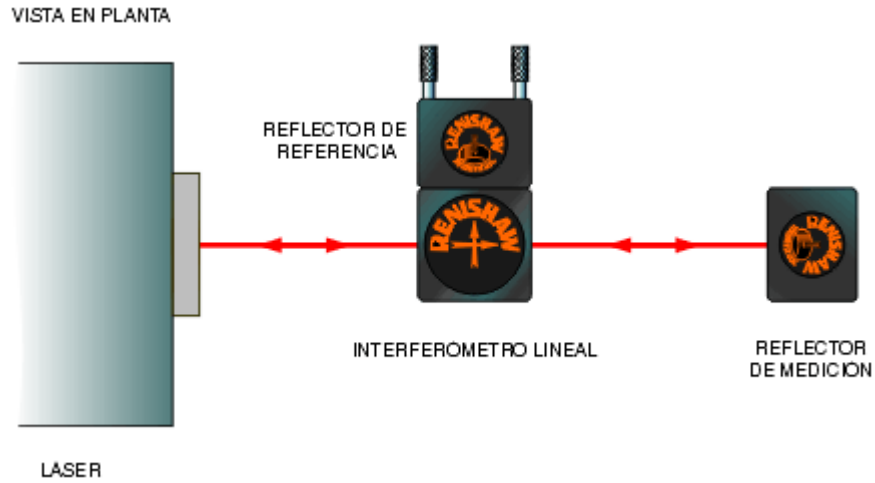


Figura AI. 23 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 1)

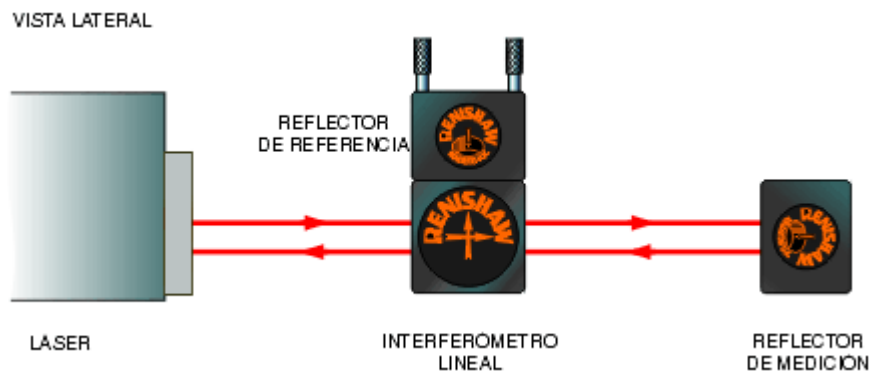


Figura AI. 24 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 2)

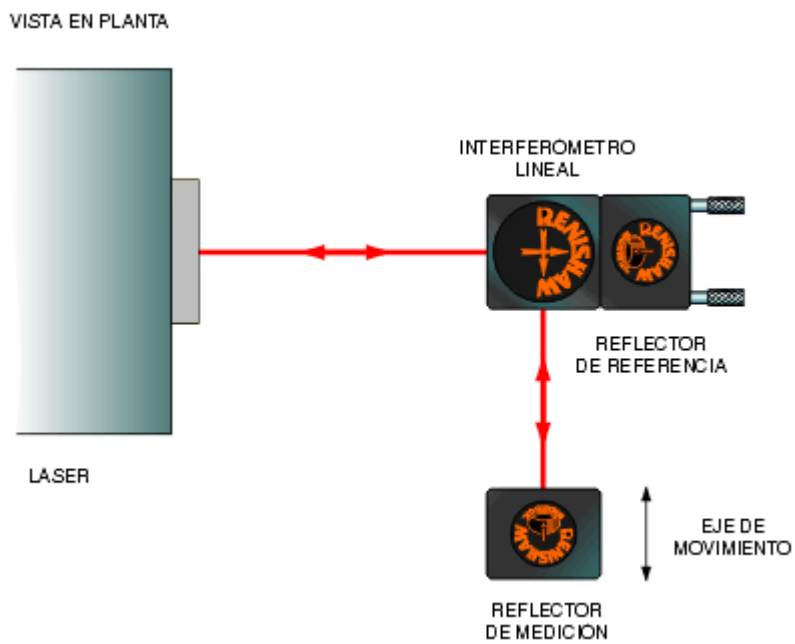


Figura AI. 25 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 3)

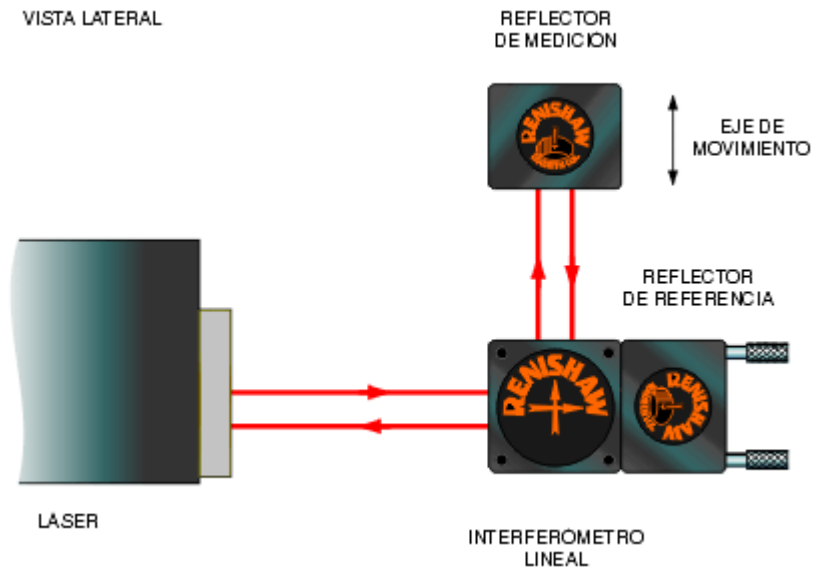


Figura AI. 26 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 4)

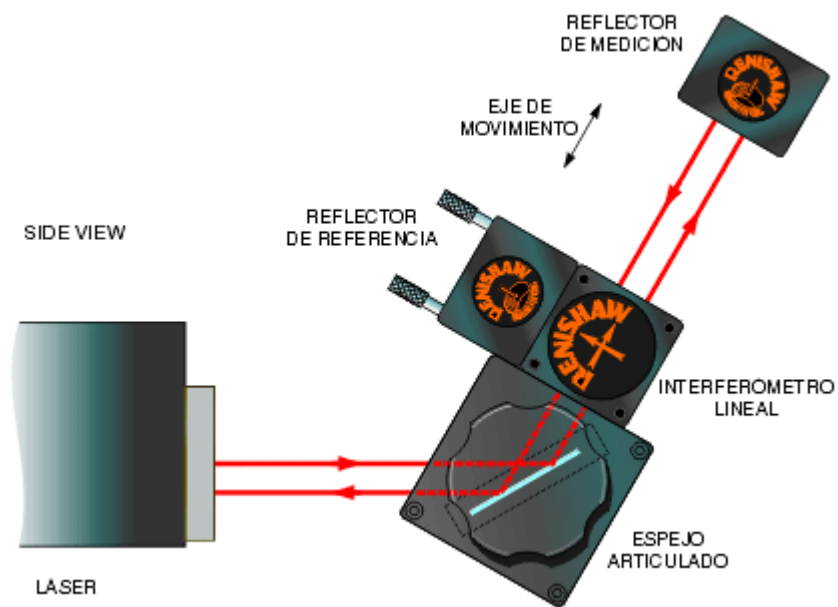


Figura AI. 27 Ensayo de posicionamiento lineal (opción 5)

La óptica del reflector lineal está dividida en seis caras como se puede observar en la figura AI.28. Esto ayuda a que a la hora de alinear el láser tener una referencia de donde debe estar situado el haz del láser. Concretamente el haz del láser debe de situarse en la mitad de una de las caras y no sobre las líneas que lo separan. Además, consta de un punto rojo marcado en el frontal que ayuda a su alineación.

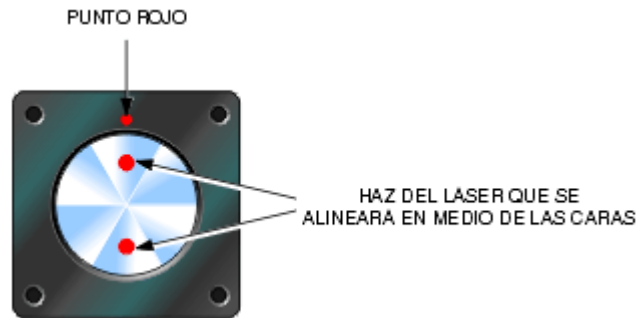


Figura AI. 28 Reflector lineal

Se deberá realizar la alineación del haz del láser con el eje de movimiento y para ello se realizará una serie de ajustes. Primero se va a ajustar el posicionamiento del interferómetro y el reflector lineal siguiendo los siguientes pasos:

1. Instalar el láser sobre el trípode en la posición que mejor convenga para alinearlo con el eje de movimiento.
2. Girar el obturador del cabezal láser para conseguir un haz de diámetro reducido.
3. Con el reflector lineal montado sobre la parte móvil de la herramienta, colocarla lo más cerca posible del láser e instalar un objetivo de tal manera que quede el punto blanco en la parte superior. Mover el láser hasta conseguir que incida en la parte central del punto blanco como se ve en la figura AI.29.

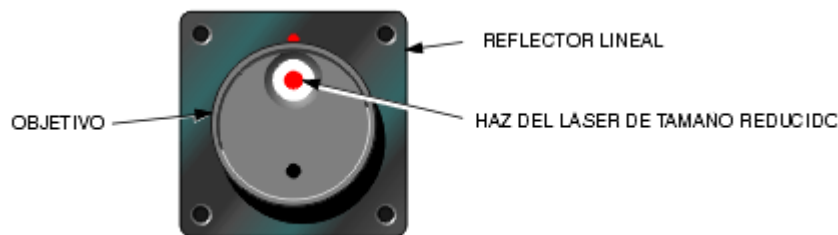


Figura AI. 29 Reflector lineal

4. Quitar el objetivo y comprobar que el haz de retorno incide en el centro del objetivo del obturador. Si no coincide se debe de mover el láser hasta conseguir que el haz de retorno indica en el centro del objetivo como se muestra en la figura AI.30.



Figura AI. 30 Obturador del cabezal láser

5. Montar el interferómetro lineal lo más cerca del reflector lineal comprobando que las caras de estos queden paralelas. Ambos elementos deberán quedar perpendiculares a la máquina. En la figura AI.31 se ve un esquema del montaje.

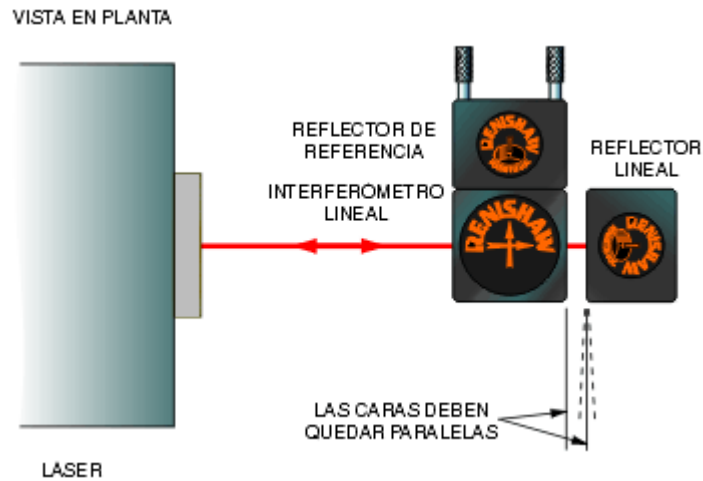


Figura AI. 31 Montaje interferómetro lineal

6. Instalar un objetivo en el interferómetro lineal con el punto blanco en la parte superior. Mover el interferómetro lineal para conseguir que el haz incida en la parte central del punto blanco como en la figura AI.32.

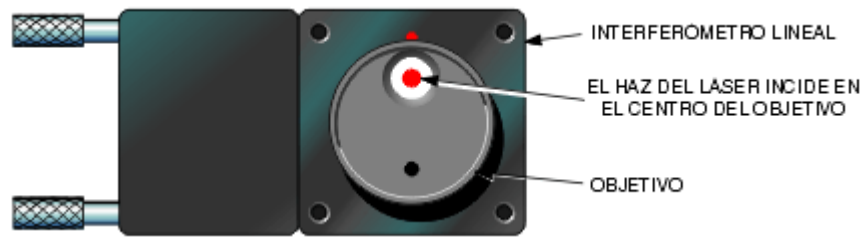


Figura AI. 32 Interferómetro lineal con objetivo

7. Quitar el objetivo del interferómetro y dejar que el haz de retorno incida sobre el objetivo del obturador. Se juntarán tanto el haz de retorno del interferómetro como del reflector lineal. Mover el interferómetro si es necesario para que el haz de retorno incida en el centro del punto blanco del obturador del láser. Para ello es aconsejable colocar una tarjeta que impida que vuelva el haz del reflector lineal para que se pueda ver solo el haz del interferómetro en el obturador del láser. La figura AI.33 es un claro ejemplo de este caso.

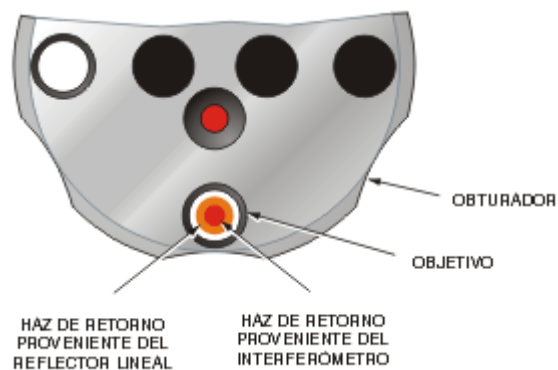


Figura AI. 33 Obturador del cabezal láser

Después de realizar el correcto posicionado del interferómetro y reflector lineal se realiza el alineamiento del haz del láser con el eje de movimiento y para ello se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Mover el reflector de la máquina a lo largo del eje de modo que se aleje del interferómetro lineal. Parar la máquina cuando se vea que uno de los haces toca con el borde del objetivo del obturador como en la figura AI.34.

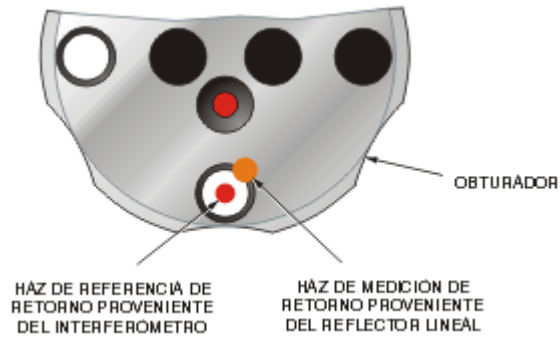


Figura AI. 34 Obturador del cabezal láser

2. Ajustar el cabeceo del cabezal láser con la perilla situada en parte trasera del mismo, hasta conseguir que el haz proveniente del interferómetro y del reflector lineal estén a la misma altura. En la figura AI.35 se puede observar este caso gráficamente.



Figura AI. 35 Ajuste de cabeceo en el obturador del cabezal láser

3. Mover el cabezal del láser para ajustar su altura hasta que ambos haces estén en el centro del objetivo como en la figura AI.36.



Figura AI. 36 Ajuste de altura en el obturador del cabezal láser

4. Ajustar el ladeo angular hasta conseguir que los haces de retorno se coloquen uno sobre el otro como en la figura AI.37.



Figura AI. 37 Ajuste de ladeo en el obturador del cabezal láser

5. Trasladar el cabezal de laser horizontalmente para situar los haces de retorno en el centro del objetivo como en la figura AI.38.



Figura AI. 38 Ajuste de horizontal en el obturador del cabezal láser

6. Una vez alineado ambos haces se vuelve a trasladar la máquina a lo largo del eje de movimiento hasta su máximo recorrido. Si el haz del láser se vuelve a mover fuera del objetivo, parar la máquina y repetir los pasos 2 a 5.
7. Cuando se llegue al extremo del recorrido desplazar el reflector lineal de vuelta hasta colocarlo junto con el interferómetro lineal. Si en la vuelta se produce un movimiento de los haces en el objetivo se procede a mover el reflector arriba, abajo, horizontal o verticalmente hasta hacer coincidir con el haz de retorno del interferómetro lineal.
8. Girar el obturador del láser para producir un haz normal y comprobar la intensidad de este en todo el recorrido. En la figura AI.39 se puede ver el obturador con un haz normal.



Figura AI. 39 Ajuste de intensidad en el obturador del cabezal láser

Este ensayo cuenta con unas unidades de compensación que se encarga de tomar datos de la temperatura, presión y humedad para calcular el índice de refracción del aire y así poder calcular los resultados conforme cualquier variación ambiental. A continuación, se expone las tres opciones de compensación que se tiene:

- Compensación automática: se deja que los datos obtenidos por los sensores sean utilizados para compensar los datos que se van midiendo. Si el ambiente en el que se realiza el ensayo es muy cambiante se sugiere utilizar esta opción ya que tiene una tasa de actualización de 7 segundos. En la ventana principal se selecciona la casilla de compensación automática y se rellena el campo de expansión térmica del material según corresponda.
- Compensación actualizada manualmente: conectado la unidad de compensación no se seleccionará el modo compensación automática en la ventana inicial. Con ello se obtiene un modo de actualización manual cuando se ejecute el comando Ctrl+L.
- Compensación introduciendo los datos manualmente: en este caso se ingresará todos los datos ambientales de manera manual. Esto suele ocurrir cuando se tiene otros elementos de medición de las condiciones ambientales más precisos. Se puede utilizar este modo cuando el ensayo se pueda realizar rápidamente o se disponga de una sala con temperatura controlada. En cualquier instante del ensayo se puede parar la toma de datos dando al botón de Finalizar para cambiar los datos que corresponda y pinchar en Continuar para seguir con la toma de datos.

Los sensores de temperatura del aire se situarán sobre la mitad del recorrido lo más cerca posible del recorrido del haz del láser. En el caso que se mida ejes largos se tendrá que comprobar la existencia de gradientes de temperatura. Esto será más probable en ejes verticales y en este caso se usará un ventilador para mover el aire. Los sensores tienen un agujero pasante por el cual se instala un tornillo para fijarlos a la superficie.

Los sensores de humedad relativa y presión del aire vienen incorporados dentro de la unidad de

compensación ambiental, por lo que no es necesario que esta unidad este cerca del recorrido del haz del láser. Cuando se haga mediciones en ejes verticales de más de 10 m si se debe colocar la unidad de compensación ambiental en la mitad del recorrido. En la figura AI.40 aparecen representados los sensores antes mencionados y el compensador ambiental.



Figura AI. 40 Compensador ambiental y sensores de temperatura

La temperatura de ensayo estandarizada para cualquier proceso de calibración suele ser de 20 °. El software de Renishaw tiene en cuenta esto y hace una corrección dependiendo del coeficiente de expansión térmica del material y de un promedio de temperatura de la máquina obtenido por la unidad de compensación ambiental. Es fundamental definir correctamente el coeficiente de expansión del material y en caso de duda se consultará con el fabricante para concretar este dato. Los sensores de temperatura del material encargados de enviar los datos a la unidad de compensación ambiental se colocarán en la mesa de la máquina herramienta. Estos cuentan con una potente base magnética que hace posible fijarlos a cualquier superficie. Estos sensores deben de ser instalados como mínimo 25 minutos antes de empezar el ensayo.

Cuando se haya llegado a este punto y antes de empezar con la toma de datos y la pantalla de configuración de las posiciones, se debe de poner a 0 los valores de pantalla pulsando sobre el botón



ubicado en la barra de herramientas en la pantalla principal del software de ensayo de posicionamiento.

Por último, hacer una serie de pruebas de movimiento con las ópticas para ver si coinciden con la lectura de la máquina. Si no coinciden se puede ajustar la lectura del láser pulsando sobre el siguiente botón



, situado en la barra de herramientas de la pantalla principal para introducir el valor que sea necesario.

A.6.3 Movimientos angulares

Un eje lineal de movimiento puede tener 3 errores debido a los giros angulares durante su movimiento lineal: alabeo, balanceo y cabeceo. Para poder hallar estas inexactitudes sobre una trayectoria lineal se instala los correspondientes dispositivos de medición de ángulos entre la parte de la máquina que sujeta la pieza y la parte de la herramienta que sujeta la herramienta. La medición se realizará en una serie de posiciones programadas mientras el componente móvil se desplaza a lo largo de su eje lineal.

Para la elección de las posiciones a medir se tendrá en cuenta que para ejes de hasta 250 mm los intervalos no serán mayores a 25 mm y para ejes de mayor envergadura el intervalo no será más grande que 1/10 de la longitud del eje. Se debe cerciorar que la maquina se mantiene en reposo el tiempo necesario para la toma de datos en cada posición. Por lo menos se realizará un conjunto de mediciones unidireccionales de todas las posiciones.

Se utilizará los siguientes dispositivos de medición según el error angular que se quiera medir en el

correspondiente eje lineal:

- Nivel de precisión: se precisará de dos niveles de precisión puesto que uno actúa a modo de referencia y el otro se situará en la parte móvil de la máquina, como se observa en la figura AI.41. Ambos niveles de precisión se instalarán en dirección perpendicular al eje de desplazamiento si se quiere medir el balanceo y se colocará en dirección del eje de desplazamiento si se quiere medir el cabeceo. Se realizará mediciones diferenciales entre ambos niveles de precisión a lo largo de unos puntos definidos en la trayectoria lineal. Se bloquean los dos ejes que no se van a mover y se anotan sus posiciones en la hoja de calibración. Seguidamente se procederá a mover el cabezal de la máquina por todo el recorrido del eje. El error de balanceo será el rango total de todas las desviaciones medidas.

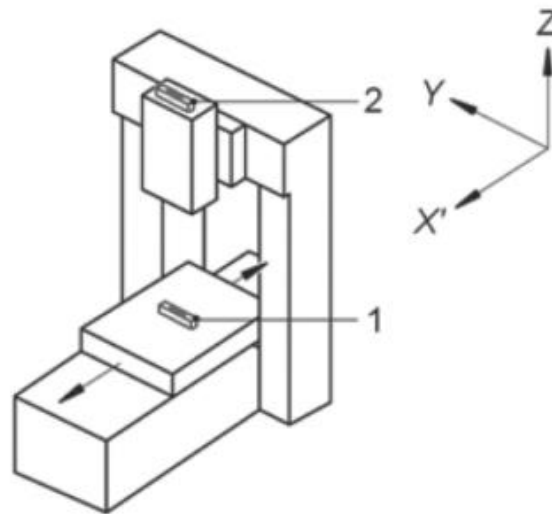


Figura AI. 41 Ensayo de movimiento angular

- Interferómetro láser: se utilizará este dispositivo para medir el error angular de cabeceo y guiñada a lo largo del eje de movimiento. Se hará uso de los siguientes componentes del kit Láser XL-80:
 - Láser XL-80
 - Interferómetro angular
 - Reflector angular
 - Dos objetivos
 - Fijaciones para las ópticas y el cabezal del láser.

El reflector angular se monta sobre la parte móvil de la máquina herramienta y el interferómetro sobre la parte estática, como se ve en la figura AI.42. La figura AI.43 muestra un montaje opcional a la inversa que la anterior, interferómetro en la parte móvil y reflector angular en la parte estática. Ambos elementos se apoyarán sobre los bloques de fijación que van fijados a las ópticas mientras que los pilares los conectan a las placas base que los unen con la máquina, si fuese necesario. Las placas base pueden ser de acero o magnéticas. El interferómetro se debe orientar de tal manera que la cara que contiene dos ópticas debe quedar al lado contrario del cabezal láser y alineada con la cara del reflector angular, que contenga asimismo dos ópticas. El reflector angular es el encargado de medir las rotaciones angulares que se produzcan durante el recorrido. Si las ópticas se montan horizontalmente se procederá a medir el ladeo del eje y si se montan verticalmente se medirá el cabeceo del eje.

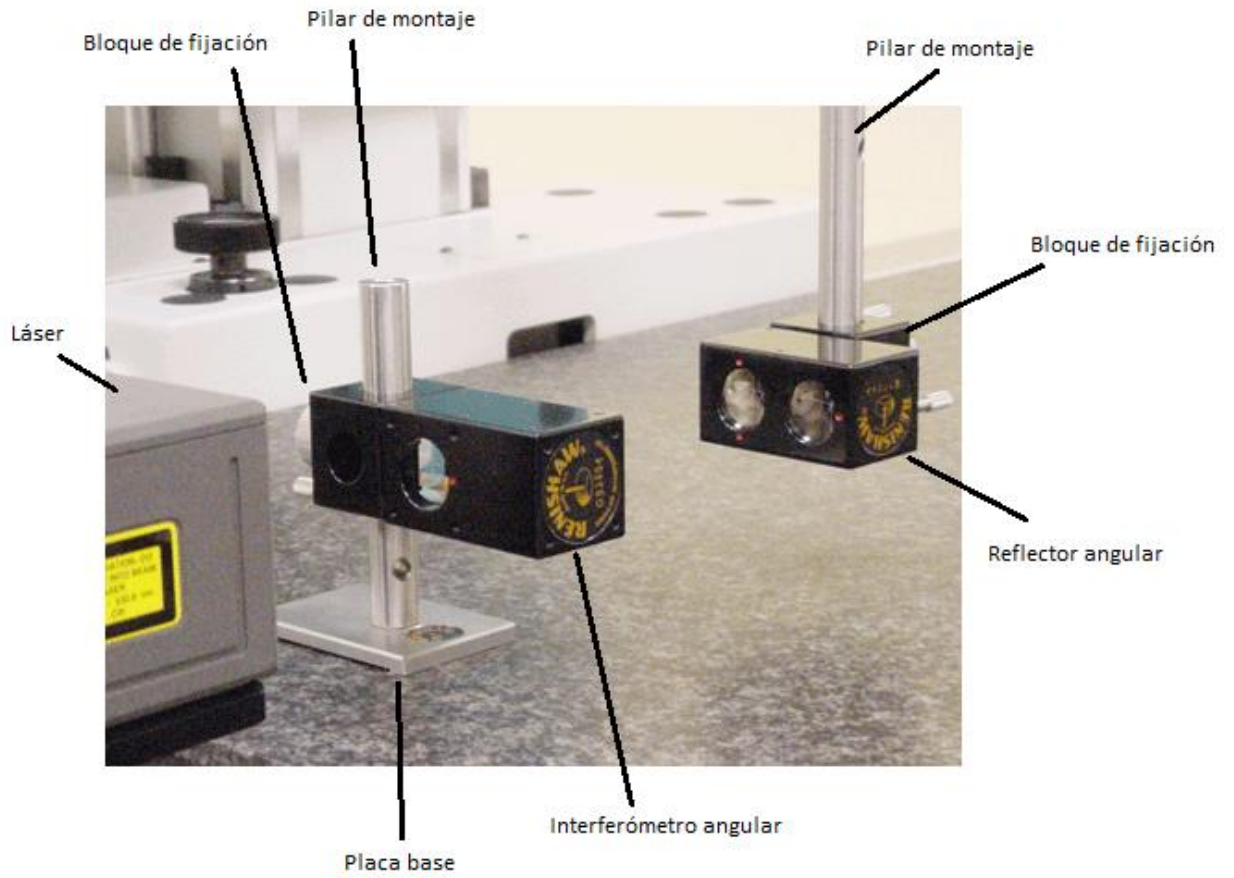


Figura AI. 42 Ensayo de movimiento angular (opción 1)

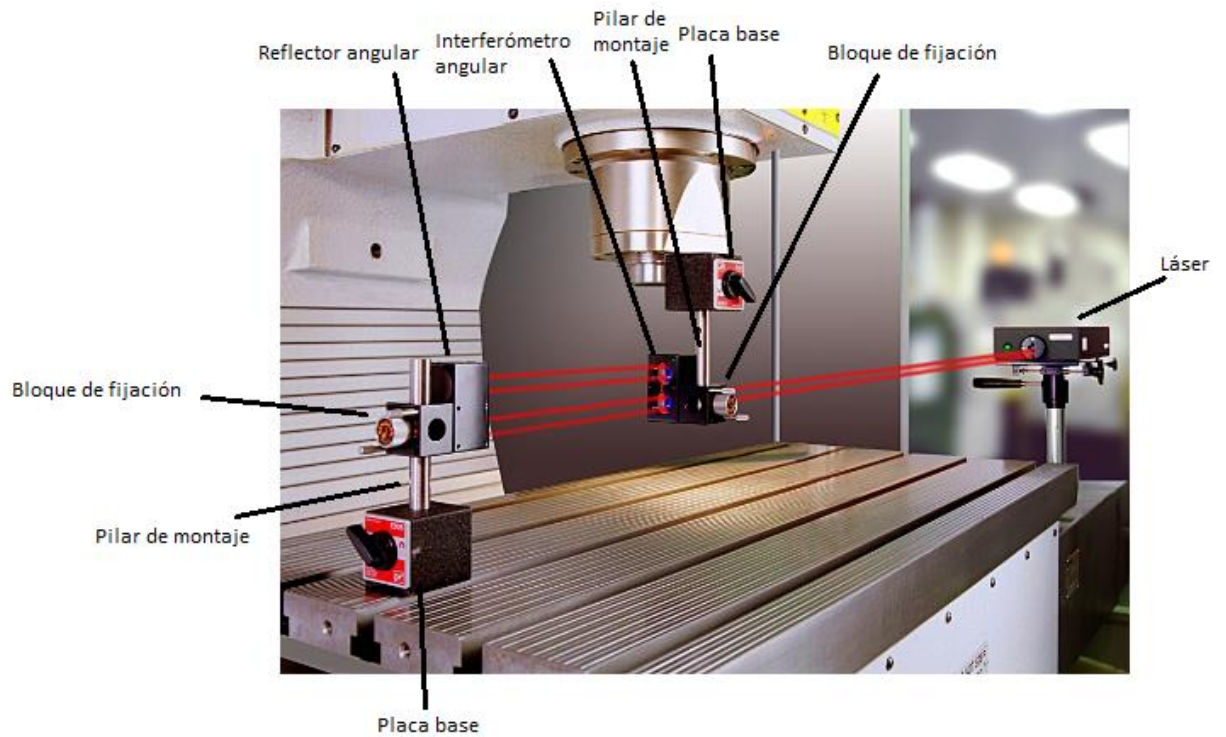


Figura AI. 43 Ensayo de movimiento angular (opción 2)

En el caso que el cabezal láser no se pueda poner en línea con las ópticas se puede realizar los siguientes montajes, representados en las figuras AI.44 y AI.45, para la medición del error de lado. Se puede colocar perpendicular a las ópticas o hacer uso del espejo giratorio. Para el caso de medición del error de cabeceo se deberá hacer uso obligatorio del espejo giratorio. Este elemento será de ayuda también para el caso de medición del eje vertical. La figura AI.46 muestra un ejemplo de un montaje para el eje vertical.

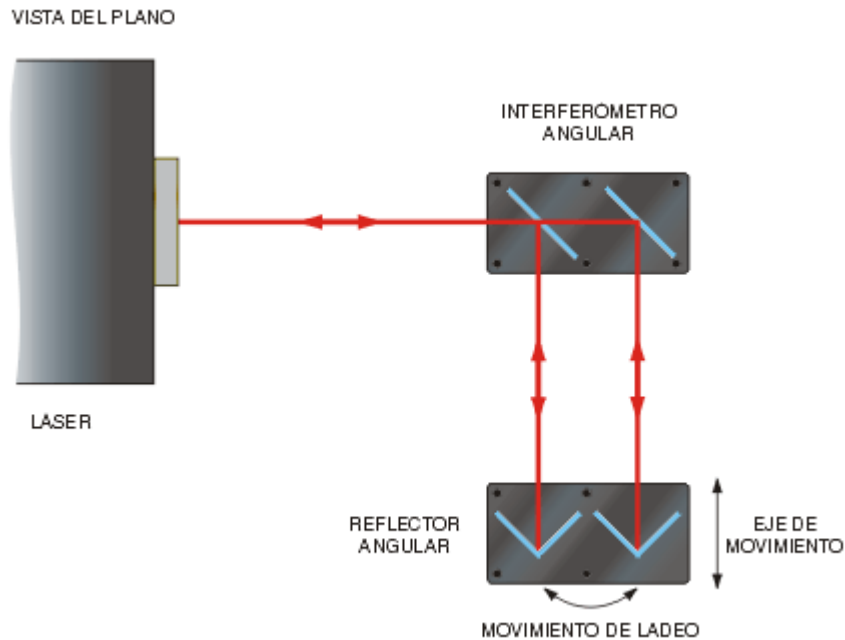


Figura AI. 44 Montaje para error de lado (opción 1)

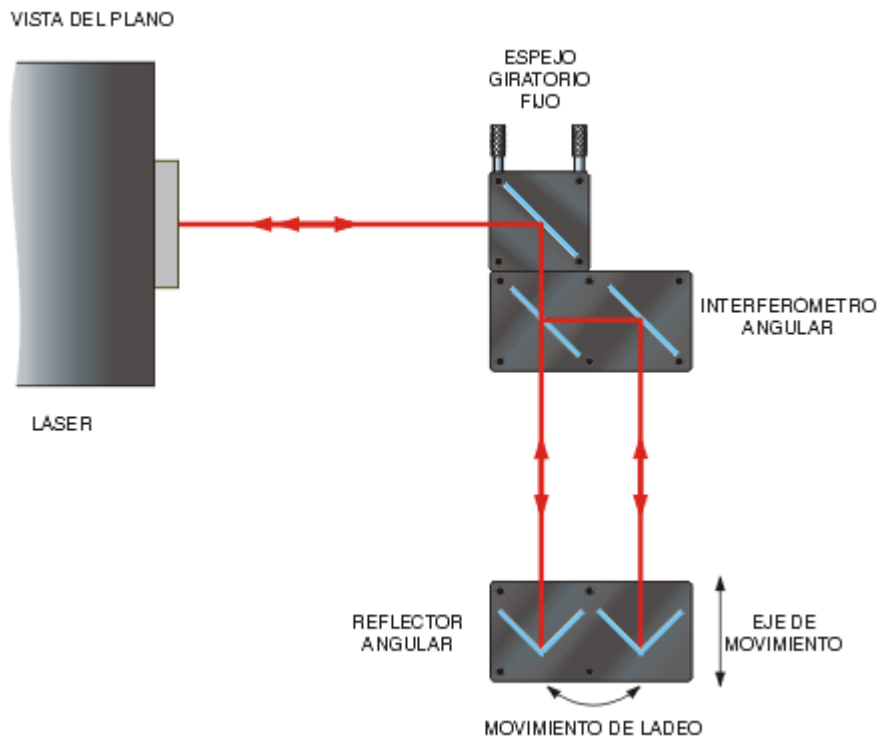


Figura AI. 45 Montaje para error de lado (opción 2)

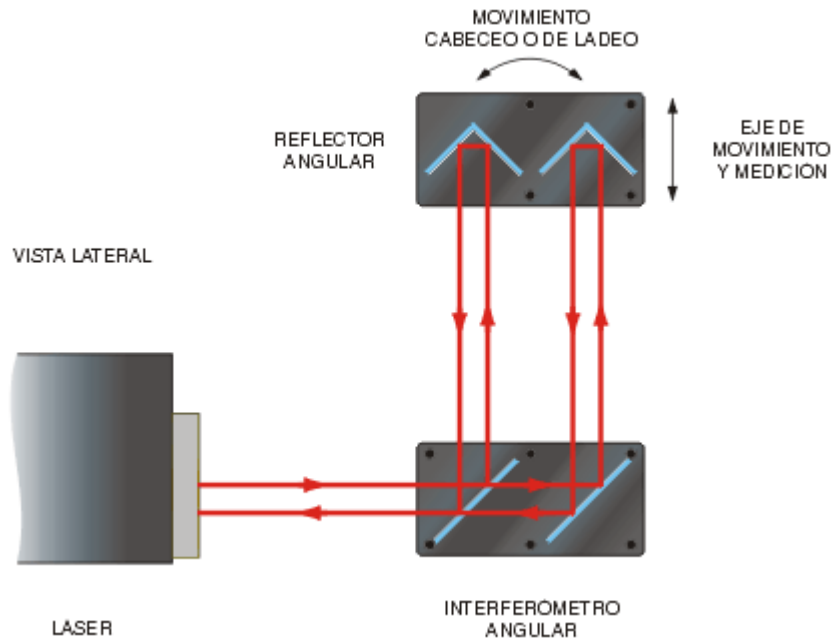


Figura AI. 46 Montaje para error de ladeo o cabeceo en eje vertical

A continuación, se realiza el procedimiento de alineación del haz del láser con el eje de desplazamiento. Esto ayuda a tener una intensidad de señal buena y no se produzcan alteraciones indeseables. Se seguirá los siguientes pasos:

1. Comprobar que todos los componentes se encuentran correctamente montados.
2. Girar el obturador para que se emita un haz reducido como en la figura AI.47.

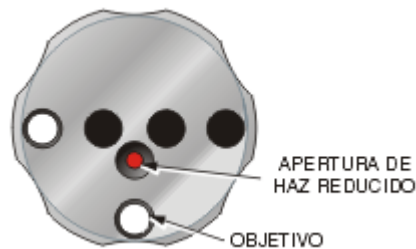


Figura AI. 47 Obturador del cabezal láser

3. Situar el reflector lo más cerca posible del láser y comprobar que esta perpendicular a la máquina.
4. Colocar un objetivo en la cara frontal del reflector angular con dos puntos rojos, de tal manera que el punto blanco quede en la parte superior. Mover el láser hasta que el haz incida en el centro del punto blanco como en la figura AI.48.

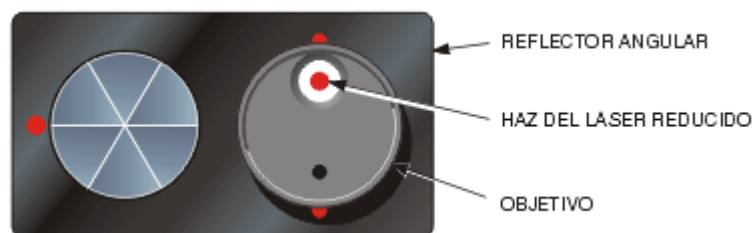


Figura AI. 48 Reflector angular con objetivo

5. Quitar el objetivo y comprobar en el obturador del láser que el haz de retorno índice en el centro

del objetivo como en la figura AI.49. Si es necesario mover el láser para conseguir que el haz incida sobre el centro del objetivo del obturador.



Figura AI. 49 Obturador del cabezal láser

6. Colocar el interferómetro lo más cerca que se pueda del reflector angular. Comprobar que ambas ópticas se encuentran perpendiculares a la máquina y alineadas entre sí. Se puede tomar como ejemplo de esto la figura AI.50.

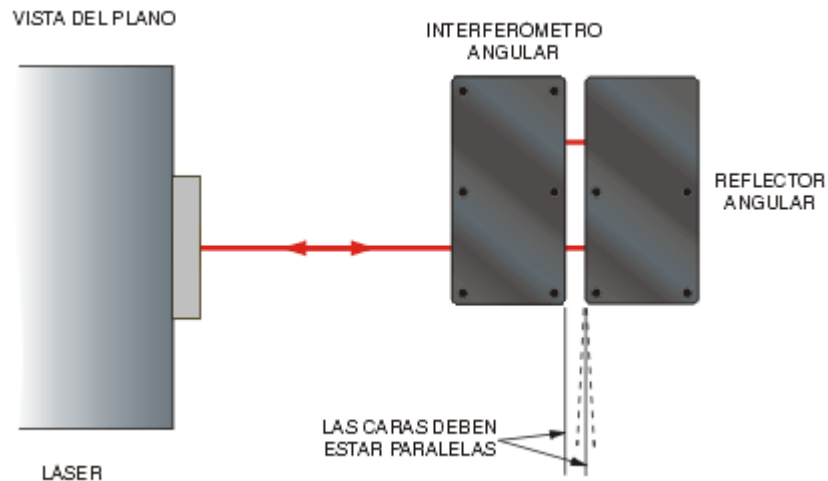


Figura AI. 50 Montaje interferómetro angular

7. Colocar un objetivo en la apertura de entrada del interferómetro de manera que el punto blanco este en la parte superior. Mover el interferómetro hasta que el haz incida sobre el punto blanco como en la figura AI.51.

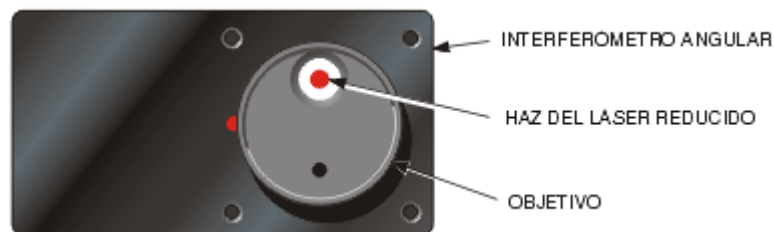


Figura AI. 51 Interferómetro angular

8. Quitar el objetivo y comprobar que ahora se tiene dos haces de retorno. En la figura AI.52 se puede observar esta situación. Ajustar el cabezal del láser hasta que ambos haces incidán sobre el centro del objetivo del obturador. Si los dos haces no se encuentran superpuestos se debe girar el interferómetro y el reflector angular para alinearlos. Se recomienda dejar uno bloqueado para identificar cada haz de su origen.

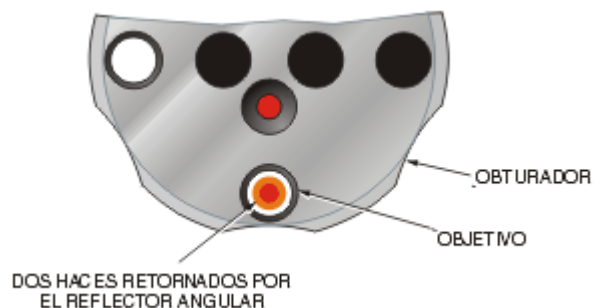


Figura AI. 52 Obturador del cabezal láser

9. Mover la máquina una pequeña distancia y volver a colocar el objetivo sobre el reflector como se hizo en el paso 4. Mover el láser para que el haz indica en centro del punto blanco.
10. Quitar el objetivo del reflector. Comprobar que los haces de retorno indiquen en centro del objetivo del obturador. Si es necesario mover el cabezal de láser horizontalmente para colocar los haces en la línea central del objetivo como en la figura AI.53.



Figura AI. 53 Ajuste horizontal del cabezal láser

11. Mover el cabezal de láser verticalmente para colocar los haces en centro del objetivo como en la figura AI.54. Puede que sea necesario otro ajuste horizontal del cabezal láser para afinarlo en el centro del objetivo.



Figura AI. 54 Ajuste vertical del cabezal láser

12. Comprobar que ambos haces de retorno permanecen alineados en el centro durante todo el recorrido del eje.
13. Girar el obturador para ponerlo que posición de medición. En la figura AI.55 se puede ver el obturador con el haz completo. Comprobar la intensidad de señal del haz, en el software y en la superior del cabezal de láser, durante todo el recorrido.

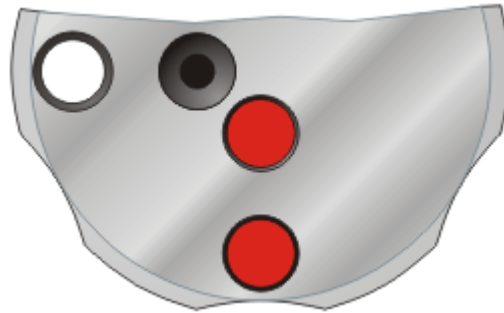





Figura AI. 55 Obturador del cabezal láser con haz completo

14. Se introduce unos datos iniciales pulsando el botón , situado en la barra de herramientas de la ventana principal de medición. Se comprueba que el mensaje “Haz obstruido” no aparece en la ventana principal.
15. Se bloquea uno de los haces entre el interferómetro y el reflector angular y se comprueba que aparece el mensaje “Haz obstruido”. Si no aparece el mensaje se realiza el paso 6 de nuevo.

Por último, se debe de comprobar que el criterio de signos de la máquina herramienta y el software coinciden. Si se da el caso que fuesen contrarios se pulsa el botón , situado en la barra de herramientas, y se vuelve a comprobar si los signos coinciden. A continuación, se procede a definir las

características del ensayo pulsando en el botón  en la barra de herramientas.

A.6.4 Movimientos angular de posicionamiento

Hay que diferenciar entre dos tipos de máquinas según la capacidad de posicionamiento: discreto o continuo. Una máquina discreta no tiene la posibilidad de situarse entre dos valores consecutivos, todo lo contrario, a una máquina continua la cual puede situarse en cualquier punto de un intervalo. Ambos tipos de posicionamiento de los ejes giratorios pueden ser ejecutados mediante CNC y en concreto para los ejes de posicionamiento discreto pueden ser ejecutados mediante control manual o controlador lógico programable.

Se utilizará los siguientes componentes del kit de Renishaw:

- Láser XL-80
- Indexador RX-10
- Controlador/Alimentación del indexador RX-10
- Placa de sujeción para montar el indexador en el eje correspondiente
- Conjunto de placa de montaje para montar el reflector en el indexador
- Reflector angular
- Interferómetro angular.

La medición se realizará entre la parte de la máquina que sujeta la herramienta y la parte de la herramienta que sujeta la pieza. El indexador RX-10 puede realizar mediciones en intervalos de 5° ya que consta con 72 posiciones en el rango de 0° a 360° donde poder realizar la calibración. El reflector angular se instala sobre el indexador junto con la placa de montaje que hace posible ajustarlo para que giren juntos o liberarlo para ajustarlo según corresponda. El indexador se coloca en el eje de giro que se vaya a calibrar con la placa de sujeción. Por otro lado, el interferómetro angular se monta sobre la máquina o sobre el husillo según convenga con sus correspondientes soportes de fijación. Se debe asegurar que el interferómetro y el reflector angular quedan lo más próximos posible. El controlador/alimentación del indexador se puede instalar fuera de la zona de medición ya que se conecta al indexador a través de un cable. La figura AI.56 muestra un esquema del montaje para este ensayo.

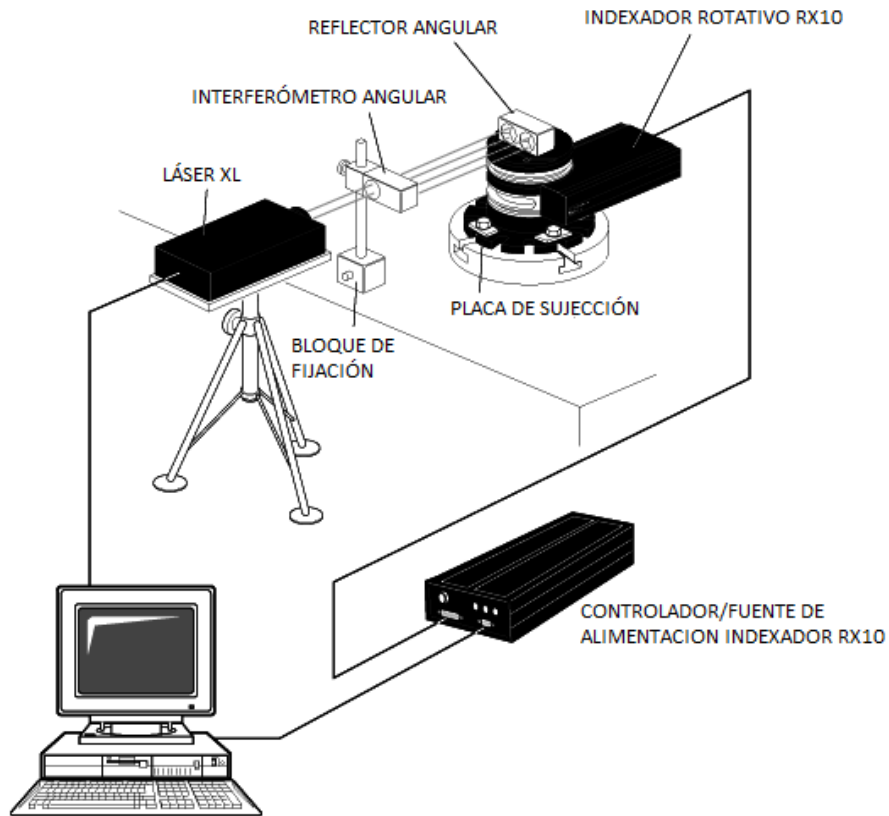


Figura AI. 56 Ensayo de posicionamiento angular

El indexador rotativo consta de varias partes y configuraciones importantes de mencionar. El indexador cuenta con dos caras, A y B, sobre las que se instalarán el reflector angular y la placa de sujeción respectivamente. Para distinguir una de la otra hay que fijarse en la cara que sobresale de la carcasa del indexador, la cual será la cara A. El indexador tiene una posición de bloqueo y desbloqueo que se identificará si tiene o no un hueco como se indica en la figura AI.57. Además, posee unas marcas las cuales cuando están alineadas marcan la posición de referencia del indexador es decir la posición 0° . Las sujeciones para instalar el reflector sobre este y ambos sobre el eje giratorio ya vienen instaladas en el indexador para que sea más fácil y rápida su distinción. En la figura AI.58 se puede ver de cerca el montaje del indexador en el eje giratorio.

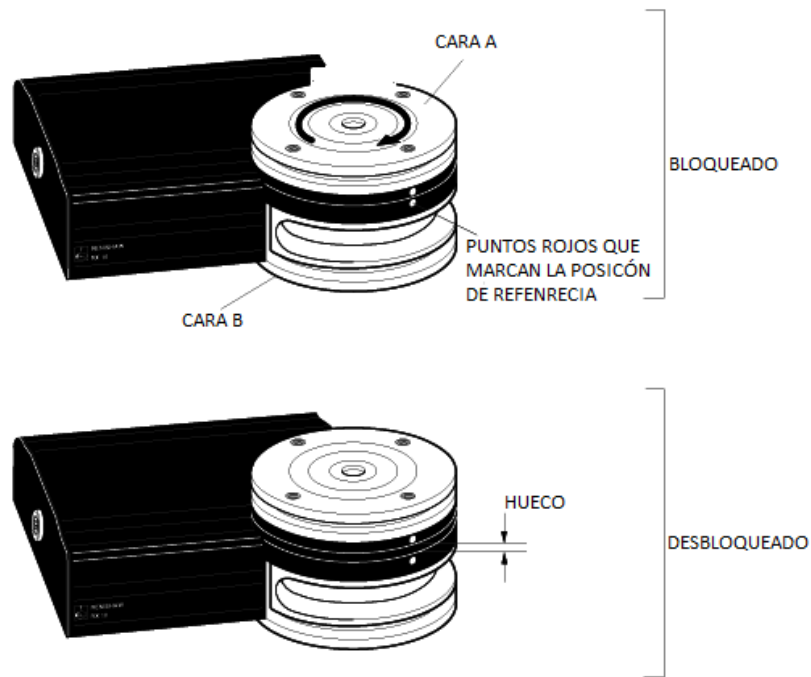


Figura AI. 57 Posición bloqueado/desbloqueado del indexador

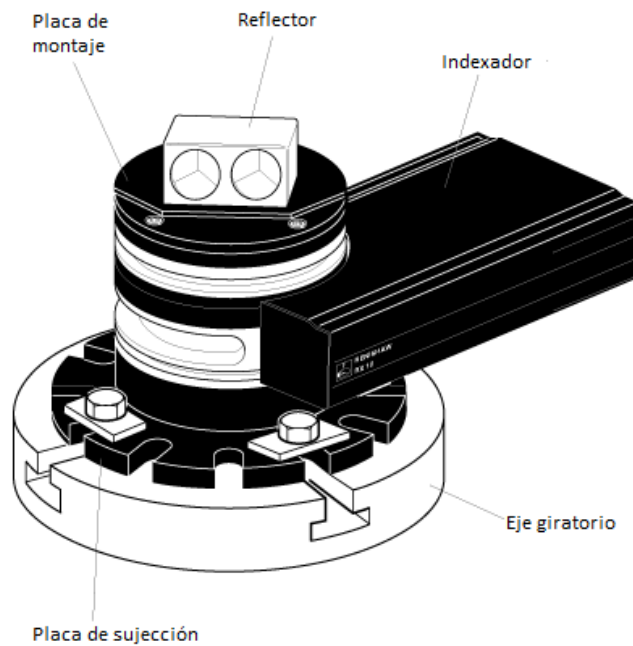


Figura AI. 58 Montaje del indexador (opción 1)

Si se realiza un ensayo de giro completo, se debe de asegurar que el indexador puede girar los 360° sin encontrarse ningún obstáculo por medio. En cuyo caso se debe de optar por la segunda opción de montaje en la que se invertirá el montaje de las caras. En este caso sobre la cara B se monta el reflector y la cara A servirá para instalar ambos dispositivos sobre el eje giratorio, junto con la placa de sujeción. La figura AI.59 muestra un esquema de este montaje opcional. Una vez esté todo el conjunto fijo sobre el eje giratorio se procede a mover el reflector para colocar las ópticas hacia el láser. Para esto el montaje del reflector tiene unos componentes que le permite aflojar el reflector para poder moverlo.

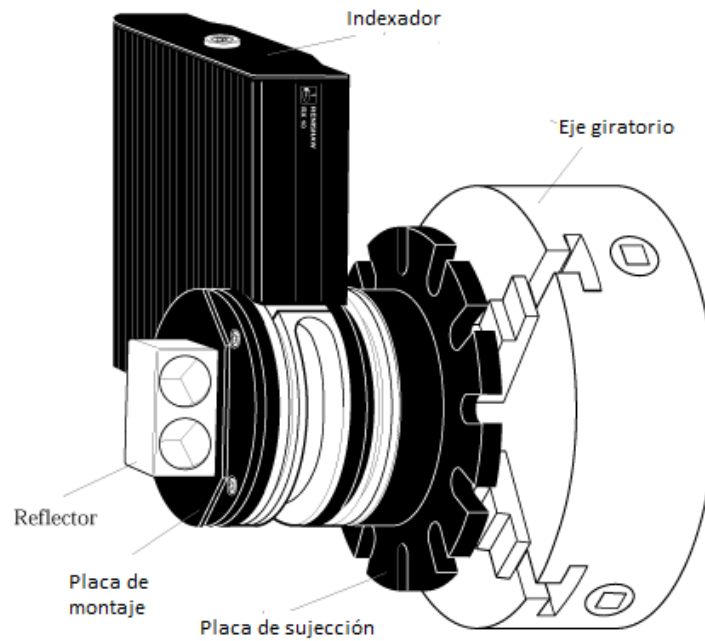


Figura AI. 59 Montaje del indexador (opción 2)

Primero se debe de definir un rango que mejor se acople al rango de trabajo real del ensayo. El software tiene unas opciones fijadas sobre las cuales se deberá seleccionar la más adecuada. El rango de trabajo debe de estar contenido en el rango que se elija y además se debe de tener en cuenta que la cifra superior del rango no se alcanzará nunca ya que el software pasa al valor inferior cuando se encuentre a $0,00001^\circ$


del valor superior. Pulsando en el botón , situado en la barra de herramientas de la ventana principal, se abre la ventana representada en la figura AI.60 para seleccionar el rango.



Figura AI. 60 Ventana de selección de rango en el software

En la figura AI.61 se puede ver un esquema de los rangos preestablecidos para elegir la correcta según los intervalos de medición que se planteen. De todas maneras, el software comprobará que el rango de trabajo concuerda con el intervalo real y si no es así mostrará un mensaje de error.

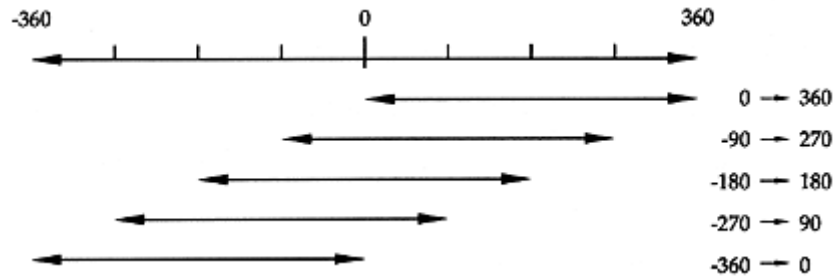


Figura AI. 61 Rangos según intervalos de medición

Otra de las opciones a definir es el tipo de recorrido que se va a realizar durante todo el proceso de calibración. El recorrido puede ser unidireccional, si las posiciones seleccionadas se recorren solo en una dirección, y bidireccional, si las posiciones se alcanzan en ambas direcciones de movimiento. Si el proceso de calibración consta de dos o más recorridos es fundamental determinar la secuencia en la que se van a recorrer. Se elegirá una secuencia alternativa cuando después de realizar un primer recorrido vuelve a la primera posición para iniciar el siguiente recorrido. También existe una secuencia secuencial en la que todos los recorridos se hacen en una dirección para luego cambiar de dirección. Se pueden observar estos recorridos en las figuras AI.62 a AI.65 para su mejor comprensión.

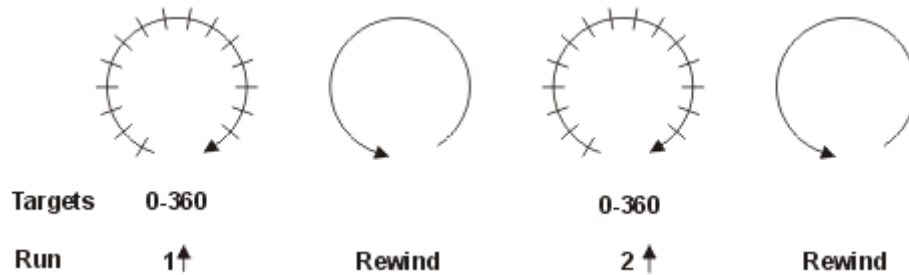


Figura AI. 62 Recorrido unidireccional

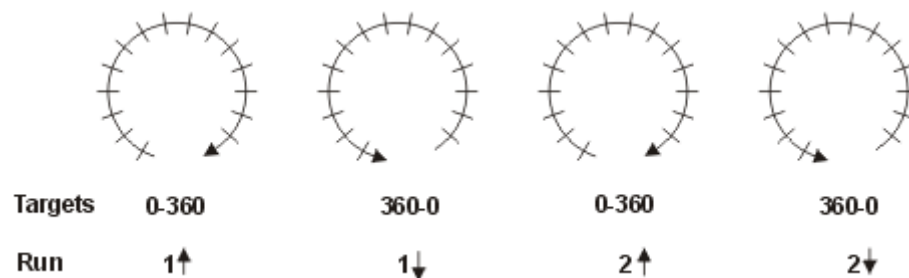


Figura AI. 63 Recorrido bidireccional

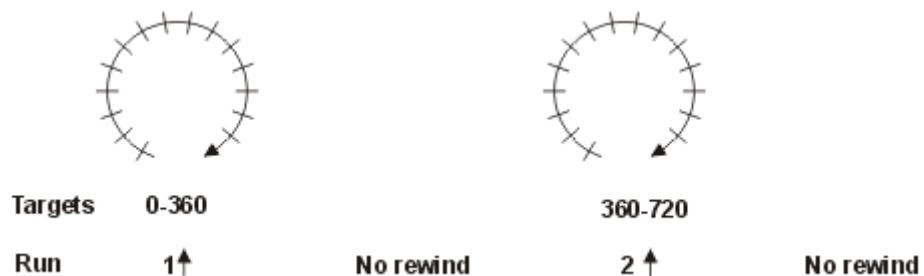


Figura AI. 64 Secuencia alternativa (opción 1)

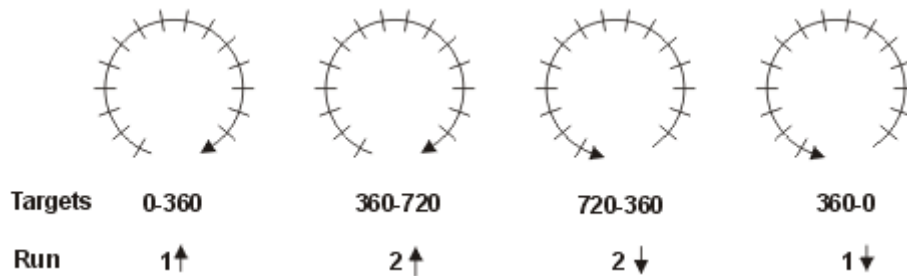


Figura AI. 65 Secuencia alternativa (opción 2)

Otro paso para definir antes de empezar el proceso de calibración es referenciar al indexador. Con esto se consigue colocar el indexador en una posición de referencia. La configuración de esta referencia se realiza desde el menú de herramientas RX10>Mover indexador. Se puede elegir entre la lista desplegable que se abre o iniciar el cuadro de dialogo para otras opciones. Si el indexador se encuentra en la posición deseada no se producirá ningún movimiento. En la figura AI.66 se puede ver una captura de esta ventana.

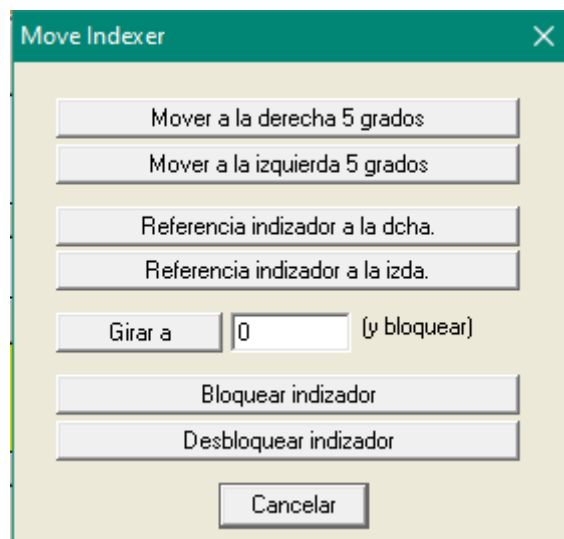


Figura AI. 66 Ventana del software para mover el indexador a posición de referencia

A continuación, se alinea el eje giratorio y el indexador para situarlos en la primera posición objetivo. Si el primer objetivo se encuentra en 0° se debería de mover solo el eje giratorio para colocarlo en esta posición ya que el indexador después de realizar la referencia ya se encuentra en esta posición. Si el primer objetivo se encuentra en una posición diferente se deberá de alinear ambos ejes a la posición que corresponda. Para ello se puede utilizar el cuadro de dialogo de Mover Indexer para seleccionar la posición del indexador que sea necesaria. Se intentará que la primera posición se encuentre entre las disponibles por el indexador (0° , 5° , 10° , ... 350° , 355° y 360°), por el contrario, el indexador se colocará en la posición más cercana de la posición deseada.

La intensidad de señal del haz del láser no puede estar por debajo de un cierto valor ya que si no se producirá el bloqueo del haz y se deberá de reiniciar el proceso para conseguir una intensidad adecuada. Habrá que realizar las siguientes comprobaciones para asegurar la intensidad de haz durante la toma de datos:


- Bloquear y desbloquear el indexador. Esto hace que el indexador suba o baje y haga que en una posición u otra pueda haber menos intensidad. Por lo que se debe de comprobar que los haces de retorno en ambas posiciones se encuentren dentro del objetivo del obturador del láser.
- Girar el reflector a las posiciones 90° , 180° , 270° y 360° en sentido positivo. Comprobar que en todas estas posiciones la intensidad de señal es la adecuada y no se produce una obstrucción del haz.

Además de estos procesos de alineación el software tiene un proceso de calibración que se puede ejecutar para corregir los desajustes que exista entre el láser, el indexador y las ópticas. Esta calibración se seleccionará desde el menú de herramientas RX10>Calibrar configuración óptica. Si durante el proceso de calibración se supera el valor de repetibilidad definido por el usuario, este se detendrá.

Los objetivos se pueden definir de varios modos: automático, manual o aleatorio. Cuando se habla de objetivos se refiere a las posiciones donde se realiza la toma de datos. Se puede elegir entre alguna de estas opciones en el menú de herramientas en la pestaña de Objetivos. Dentro del modo automático se debe de definir los valores inicial y final del rango de medición y el número de objetivos o los intervalos entre mediciones. El software calcula las posiciones de los objetivos automáticamente. En el modo aleatorio además de los valores anteriores hay una casilla para definir el intervalo en el que se quiere que este el objetivo. Por último, en el modo manual solo se requerirá el número de objetivos y luego en la lista que se genere se podrá cambiar los objetivos como se desee.

El modo de capturar los datos también tiene varias opciones. En este caso se debe de seleccionar configuración automática de captura dentro de RX10 en el menú de herramientas. El modo automático se utiliza cuando se hace uso de un programa automático que define el proceso de calibración. El semiautomático se utiliza cuando el operador es el encargado de mover el eje de medición. El modo manual se utilizará cuando el movimiento de elevación del eje y de desbloqueo del indexador pueda producir una pérdida de la intensidad de señal del haz del láser.

Durante el proceso de toma de datos el indexador girará y esto hará que el cable que conecta con la alimentación se enrolle sobre este. Por este motivo se debe inspeccionar en cada momento el correcto enrollamiento del cable en el indexador para que no se produzca ninguna rotura o bloqueo. Si durante el proceso de toma de datos surgiera algún problema se puede pulsar el botón de para de emergencia ubicado en la parte trasera del indexador.

Por último, se debe de comprobar que los signos coinciden con el desplazamiento del eje giratorio. Para ello se gira el eje entre 1° y 2° y se compruebe que el software marca lo mismo. Si en un caso marcase el signo contrario se debe pulsar el botón , situado en la barra de herramientas de la ventana principal. Se vuelve a girar el eje en ambas direcciones y se comprueba que ahora marca el signo correcto en ambas direcciones.

A.6.5 Paralelismo de los ejes de movimiento

Se tratará las posibles desviaciones de paralelismo que puede existir sobre dos ejes lineales de movimiento. Existen varias mediciones de paralelismo según los ejes que se vayan a medir.

La medición se realizará en varios puntos a lo largo de la longitud del desplazamiento del eje lineal en cuestión. Para ejes de hasta 250 mm de longitud los intervalos donde se realizará la medición deberán de ser de 25 mm y para ejes más largos los intervalos no pueden superar el 1/10 de la longitud del eje. El número de repeticiones de estas mediciones a lo largo del eje queda a convenio entre el cliente/fabricante y el laboratorio.

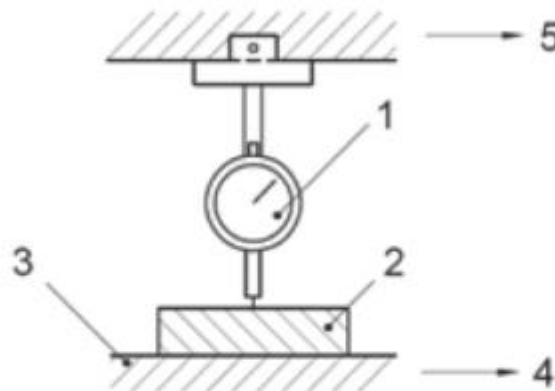
A.6.5.1 Paralelismo entre dos ejes de movimiento lineal

- Método de la desviación de un punto fijo: para este método se utiliza un sensor de desplazamiento lineal que se colocará sobre uno de los componentes móviles de tal manera que el palpador toque un punto del otro componente móvil de la máquina. La figura AI.67 muestra un esquema de este montaje. Este dispositivo medirá el desplazamiento perpendicular a su eje de movimiento. Ambos componentes móviles deberán de moverse en la misma dirección y longitud. De manera opcional se puede utilizar una galga que se pueda desplazar, de esta manera se pueden conseguir datos más precisos.

Se debe de desplazar el eje lineal que tenga el sensor de desplazamiento hasta que este entre en contacto con el otro eje lineal. Se ajusta el eje del sensor de desplazamiento hasta que este marque cero. A continuación, se puede empezar con la toma de datos en cada posición definida.

Con las medidas del sensor de desplazamiento en las posiciones definidas según se ha comentado al

principio, se podrá definir la línea de rectitud de referencia. El ángulo de inclinación de la línea de rectitud de referencia con respecto a la dirección nominal de movimiento será el error de paralelismo entre los ejes de movimiento.



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal
- 2 Galga desplazable (opcional)
- 3 Mesa de la máquina
- 4 Dirección del movimiento lineal de la mesa
- 5 Dirección del movimiento del 2º eje lineal

Figura AI. 67 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento

- Método basado en las mediciones de los errores de movimiento lineal: este método se basa en medir la rectitud de los componentes móviles por separado utilizando los dispositivos definidos en el apartado A.5.1. El error de paralelismo se obtiene mediante la suma algebraica de las pendientes de las dos líneas de referencia con respecto a la línea de referencia de rectitud.

Para las mediciones de paralelismo que se lleven a cabo con el interferómetro láser existen algunas peculiaridades que hay que mencionar a la hora de utilizar el láser XL-80. Este ensayo se basa en realizar una medición de rectitud por eje y plano de desviación. Por lo que se realizaran un total de cuatro mediciones que luego se comparan con el software de Renishaw para obtener el error de paralelismo. El paralelismo se puede calcular en los dos planos ortogonales a los que pertenecen los ejes lineales. Según se requiera se realizarán cuatro mediciones para obtener el error en los planos ortogonales o solamente dos si se especifica sobre que plano se quiere obtener el error.

Hay que mencionar que este dispositivo se utilizará para ejes coaxiales. A igual que en los ensayos de rectitud se podrá hacer uso del retroreflector para distancias grandes, pero no se podrán mezclar diferentes configuraciones, es decir utilizar el retroreflector para unas mediciones y no para otras dentro de un mismo ensayo.

A continuación, en las figuras AI.68 a AI.70 se muestran varios esquemas de montajes posibles. Cada figura contiene cuatro imágenes que se corresponden con las distintas mediciones dentro de un mismo ensayo. Las imágenes a) y b) de cada figura se corresponden con la medición de rectitud de un eje en los dos planos ortogonales. Las imágenes c) y d) se corresponden con las mediciones del otro eje lineal con el que se quiere calcular el paralelismo.

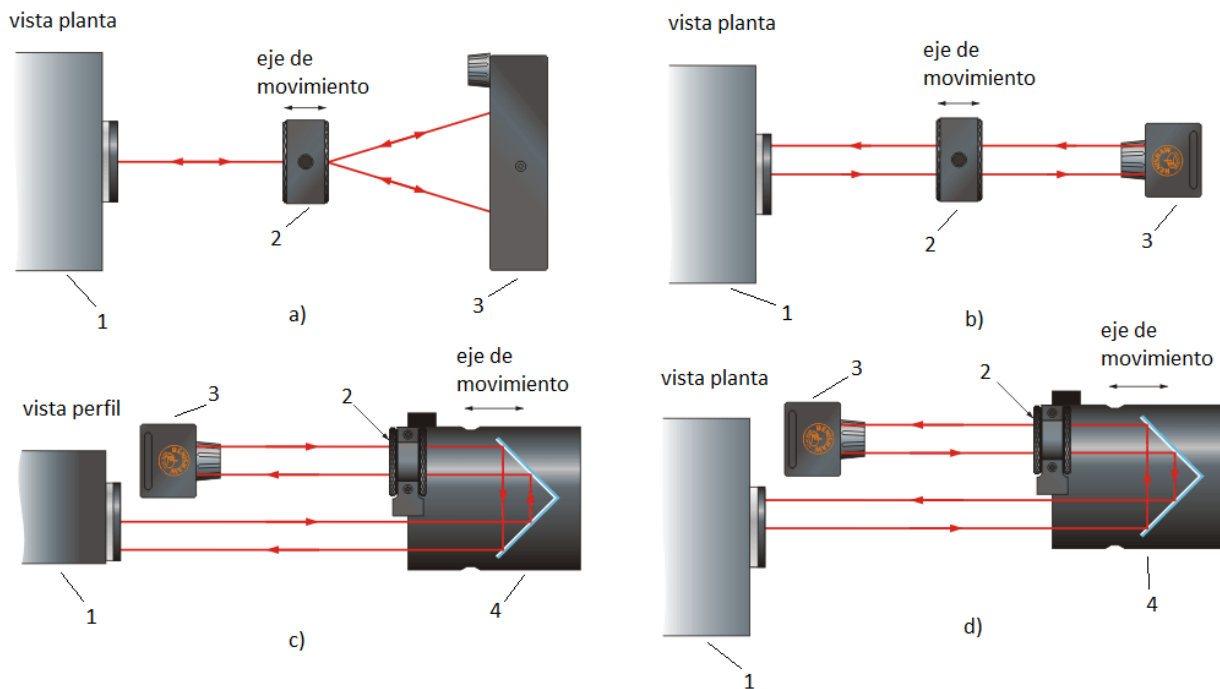


Figura AI. 68 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 1)

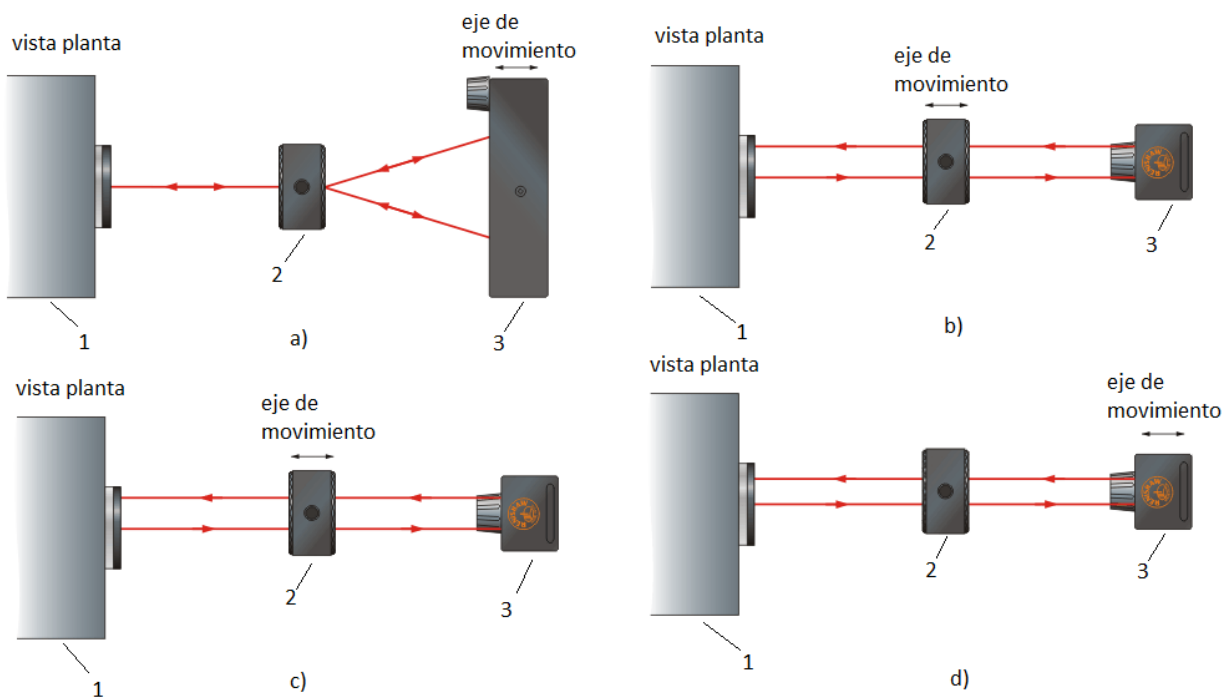


Figura AI. 69 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 2)

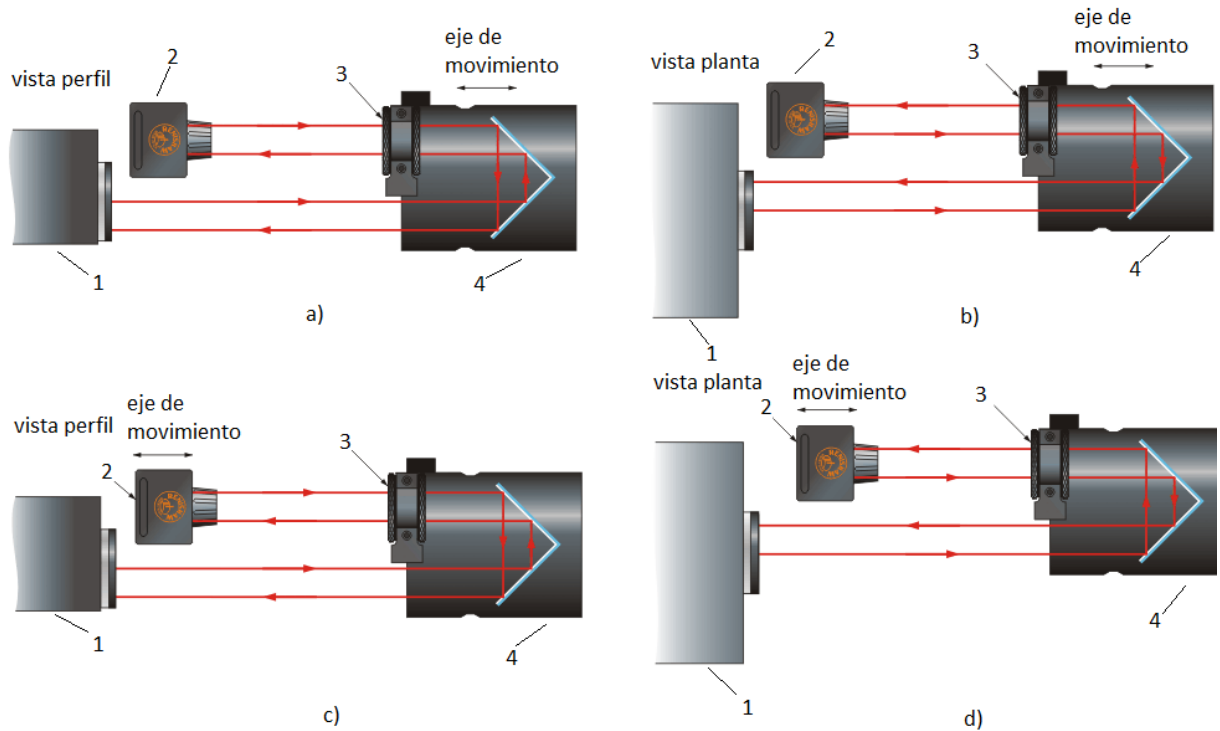


Figura AI. 70 Montaje de las ópticas para ensayo de paralelismo (opción 2)

Se debe tener en cuenta los aspectos relacionados con la puesta a punto del montaje para realizar un ensayo lo más preciso posible. Se seleccionará como primer eje de medición el que se aproxime más a los extremos del rango especificado.

Antes de la toma de datos se debe comprobar que los signos de los ejes de medición concuerdan con lo que está definido en el software. Para ello se realizarán las siguientes comprobaciones:

- Si el reflector de rectitud es la óptica estacionaria y es el mismo para ambas mediciones, se empujará manualmente el interferómetro como se indica en la figura AI.71 (dirección positiva) y se comprueba que el software marque lo mismo.

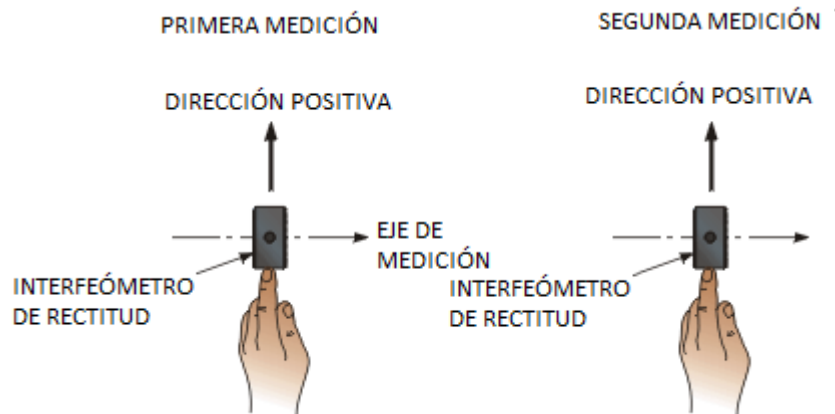


Figura AI. 71 Criterio de signos (opción 1)

- Si el reflector de rectitud es la óptica de movimiento para una medición y el interferómetro es la otra óptica de movimiento para la otra medición, los signos serán inversos tal como se indica en la figura AI.72.

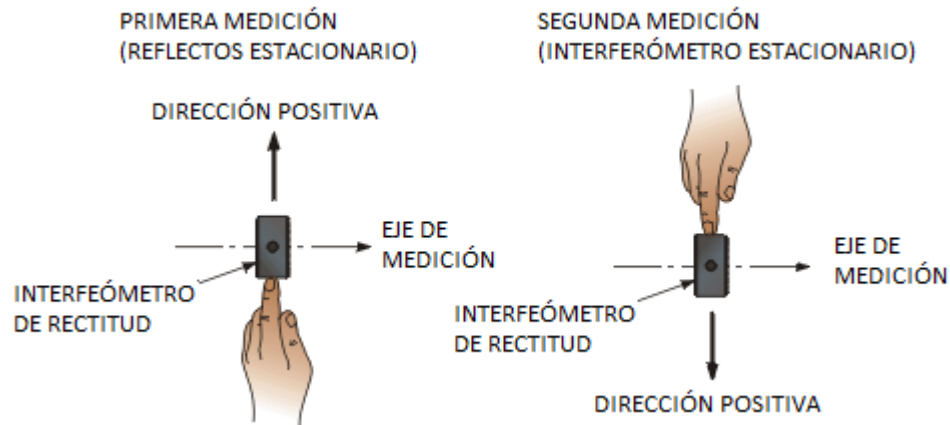


Figura AI. 72 Criterio de signos (opción 2)

Una vez definido todo lo anterior y haber realizado todos los ajustes correspondientes se procede a realizar la toma de datos. Es muy recomendable que a los archivos para cada medición se le dé un nombre representativo ya que luego se va a necesitar para realizar el análisis de paralelismo. En la figura AI.73 se muestra una captura de la ventana donde se define las características del ensayo.

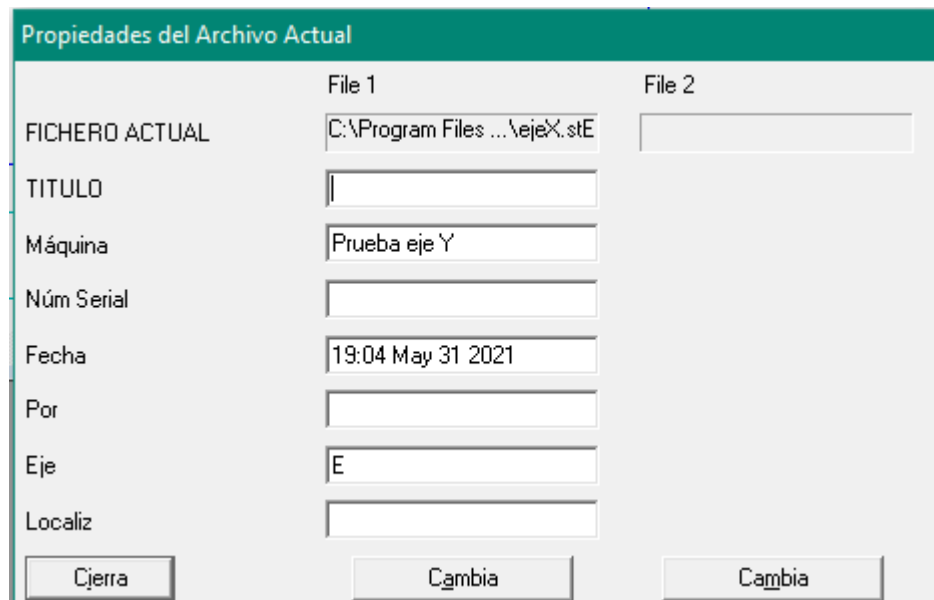
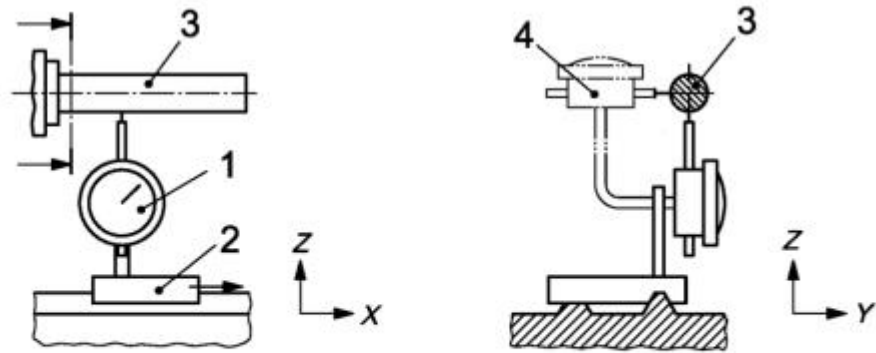


Figura AI. 73 Ventana del software para definir las propiedades

Cuando se tiene ya todos los archivos con los datos se procede con el análisis de los datos. Para ello se tiene que abrir el software de análisis y cargar el primer archivo datos de rectitud. En la ventana principal de análisis se procede a seleccionar Análisis > Paralelismo Lineal en la barra de herramientas. Se abrirá una ventana para cargar el segundo archivo y realizar el cálculo del paralelismo. El operario debe seleccionar los archivos de datos dos a dos según el plano en el que se haya hecho las mediciones.

A.6.5.2 Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje fijo

Para este ensayo se usa el mandrino de control y el sensor de desplazamiento. Se instala el mandrino de control sobre el eje fijo y el sensor de desplazamiento sobre el componente móvil como se puede ver en la figura AI.74. El palpador del sensor de desplazamiento se sitúa sobre el mandrino de control y se ajusta a cero antes de comenzar con la toma de datos. El sensor de desplazamiento es el encargado de medir, en las posiciones definidas, las posibles alteraciones entre ambos ejes. Estas mediciones se utilizan para elaborar la línea de rectitud de referencia. El error de paralelismo será el ángulo de la pendiente de dicha línea con respecto la dirección nominal de movimiento.



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal
- 2 Eje del componente con movimiento lineal
- 3 Mandrino de control (eje fijo)
- 4 Sensor de desplazamiento lineal secundario

Figura AI. 74 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino

A.6.5.3 Paralelismo entre un eje de movimiento lineal y un eje de revolución

- Interferómetro láser de rectitud: se debe de tener en cuenta que los ejes deben de ser coaxiales. Se realizarán unas mediciones con el componente giratorio en una posición angular y a continuación se repetirá las mediciones girando el componente giratorio 180° . El error de paralelismo se define como la mitad de la suma algebraica de las pendientes de las líneas de rectitud de referencia con respecto a la dirección nominal de movimiento lineal en las dos posiciones angulares distintas.

Se hará uso de las ópticas que se describieron en el ensayo de rectitud A.5.1. Debido a la estructura del torno se debe de hacer uso de un espejo giratorio para colocar el haz del láser en la dirección del eje de medición. El espejo giratorio se colocará en la parte opuesta del eje de rotación. El interferómetro de rectitud se instalará en la parte móvil de la máquina, el cual describe la trayectoria lineal. En el cabezal del eje de rotación irá el reflector de rectitud. En la figura AI.75 se puede observar un esquema de este montaje.

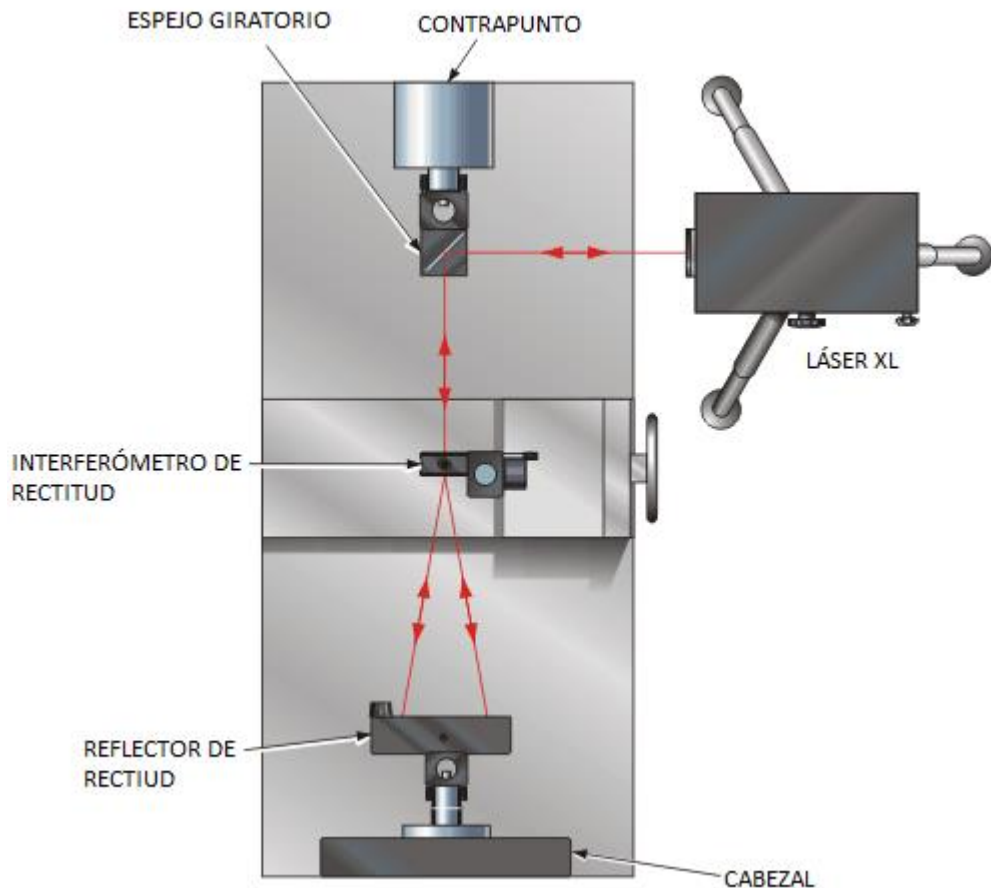


Figura AI. 75 Ensayo de paralelismo con láser de rectitud

Se realizarán los mismos procesos de ajuste y alineamiento que en el ensayo de rectitud A.5.1. Se debe de asegurar que el espejo giratorio sea perpendicular al haz del láser con una precisión de $\pm 2.5^\circ$. En la figura AI.76 se puede ver el criterio de signos que se tendrá en cuenta cuando se lleve a cabo este ensayo de paralelismo.

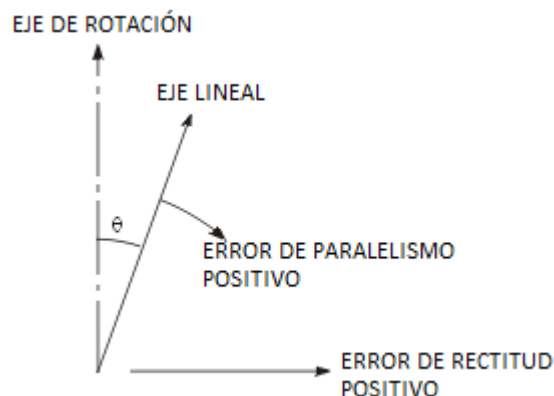
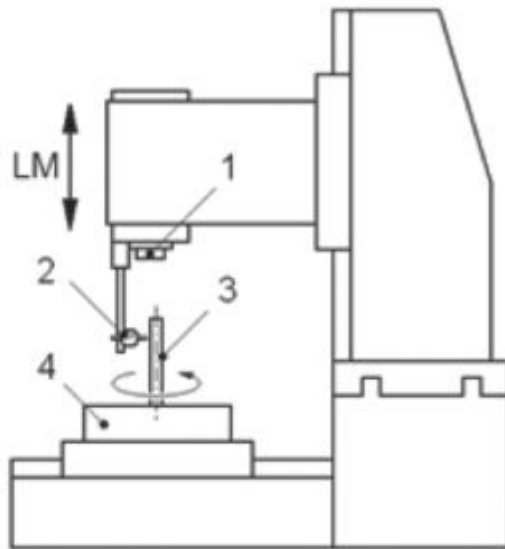


Figura AI. 76 Criterio de signos

Al igual que ocurre en el ensayo de paralelismo de ejes lineales se deberá de adjuntar los dos archivos de mediciones (posición angular inicial y girado 180°) para que el software calcule el error de paralelismo. Para obtener el error de paralelismo en el otro plano ortogonal se debe de realizar las mediciones girando el eje de rotación 90° y 270° partiendo de una posición angular inicial.

- Mandrino de control o una regla y un sensor de desplazamiento lineal: se coloca el mandrino de control sobre el eje giratorio y el sensor de desplazamiento sobre el componente móvil (eje

lineal). La figura AI.77 muestra un ejemplo de montaje para realizar este ensayo de paralelismo. El operario debe asegurarse que el palpador este en contacto con el mandrino de control durante todo el recorrido de la medición. Al igual que el caso anterior se hará primero unas mediciones con el componente giratorio en una posición angular inicial y luego se repetirá girando el componente giratorio 180° . El error de paralelismo se determina mediante la mitad de la suma algebraica de la pendiente de las líneas de referencia de rectitud con respecto a la dirección nominal de desplazamiento para dos posiciones angulares.



Leyenda

1 Husillo

2 Sensor de desplazamiento lineal

3 Mandrino de control

4 Mesa giratoria

LM Dirección del movimiento lineal

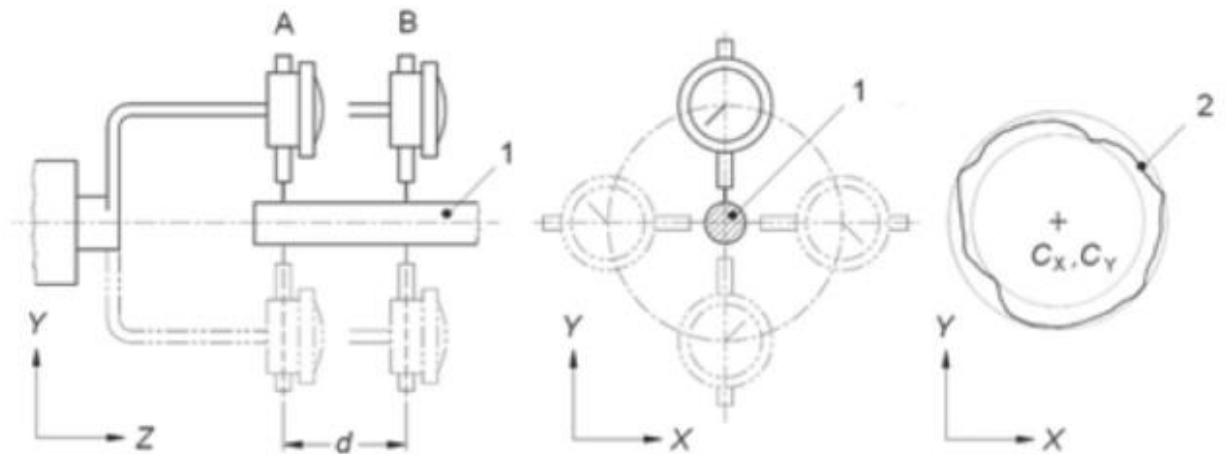
Figura AI. 77 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino

A.6.5.4 Paralelismo entre dos ejes de giro

Para medir el paralelismo entre dos ejes de giro se debe de definir primero la línea media de un eje de rotación para luego compararla con el otro eje de rotación. Se utiliza diferentes dispositivos mecánicos u ópticos para generar dicha línea media.

- Mandrino de control y reloj comparador: el mandrino de control se monta sobre un eje giratorio y en el otro eje giratorio se instalan los relojes comparadores separados una distancia d . El mandrino debe de estar alineado con el otro eje de giro como en la figura AI.78. A continuación, se ajusta el reloj comparador para que toque al mandrino y así poder medir las desviaciones que se produzcan. Según el plano en el que se coloque el reloj comparador se obtendrán los datos referidos a ese plano.

El eje que contiene al mandrino es el encargado de girar mientras se va anotando las desviaciones que marca el reloj comparador. Una vez obtenido las medidas se procede a calcular el centro de referencia de los conjuntos de medidas (C_x, C_y). El error de paralelismo se obtiene a través de la diferencia de los centros de los círculos de referencia de cada conjunto de medida ($C_{x2}-C_{x1}$) dividida entre la distancia d que las separa. Para realizar mediciones más exactas se procede a mover el reloj comparador 180° y volver a realizar las mediciones. En este caso el error de paralelismo es la mitad de la suma algebraica de los dos ángulos calculados. Los puntos de medición del reloj comparador a lo largo de la trayectoria circular y la distancia d de separación entre ellos se definen con el cliente/fabricante.



Leyenda

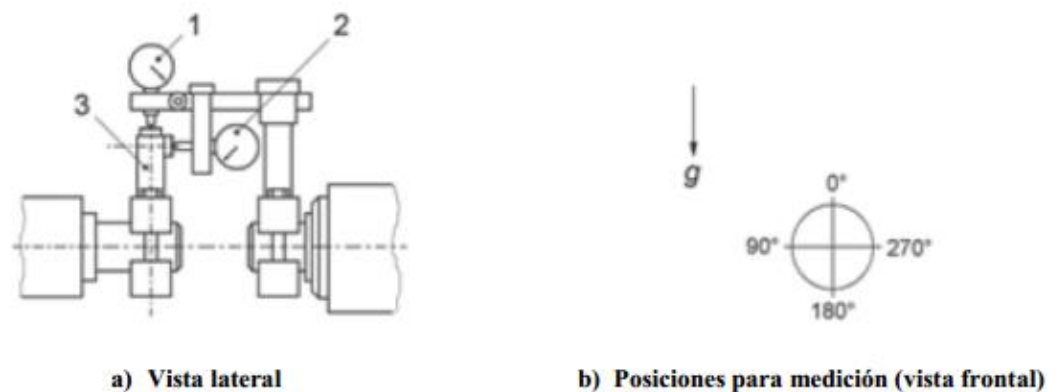
- 1 Mandrino de control
- 2 Trayectoria del sensor de desplazamiento lineal contra el mandrino de control
- A, B Sensor de desplazamiento lineal
- C_x Coordenadas en el eje X del centro del círculo de referencia
- C_y Coordenadas en el eje Y del centro del círculo de referencia
- d Distancia entre los sensores de desplazamiento lineal A y B

Figura AI. 78 Ensayo de paralelismo con sensor de desplazamiento y mandrino

A.6.6 Coaxialidad entre líneas medias de ejes

El error de coaxialidad consta de 4 parámetros: dos muestran el error de paralelismo entre ambos ejes y los otros dos el desajuste entre ellos. Se realizará esta medida entre dos líneas media de ejes de rotación. Tiene cierta similitud con el error de paralelismo por lo que las mediciones para hallar el error de paralelismo entre dos ejes de giro se podrán utilizar para hallar el error de coaxialidad y viceversa.

- Método del salto de un punto estacionario: para llevar a cabo este método se requiere dos relojes comparadores, los cuales irán instalados sobre uno de los ejes y un apoyo final sobre el otro eje. Los sensores de desplazamiento se colocarán de tal manera que las mediciones se realicen en las direcciones radial y axial. En la figura AI.79 se tiene un esquema de este montaje.



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 2 Sensor de desplazamiento lineal en dirección axial
- 3 Soporte a medir
- g Gravedad

Figura AI. 79 Ensayo de coaxialidad con sensor de desplazamiento y mandrino

Las mediciones se realizarán girando ambos ejes al mismo tiempo sobre las posiciones 0°, 90°,

180° y 270°. Se repetirá tres veces estas mediciones para suprimir efectos térmicos. Una vez obtenidos las mediciones se utilizarán para calcular los siguientes parámetros que definen el error de coaxialidad:

Desajuste vertical:

$$V_0 = \frac{(R_0 - R_{180})}{2} \quad (AI.5)$$

Angulo vertical:

$$V_A = \frac{(F_{180} - F_0)}{D} \quad (AI.6)$$

Desajuste horizontal:

$$H_0 = \frac{(R_{90} - R_{270})}{2} \quad (AI.7)$$

Angulo horizontal:

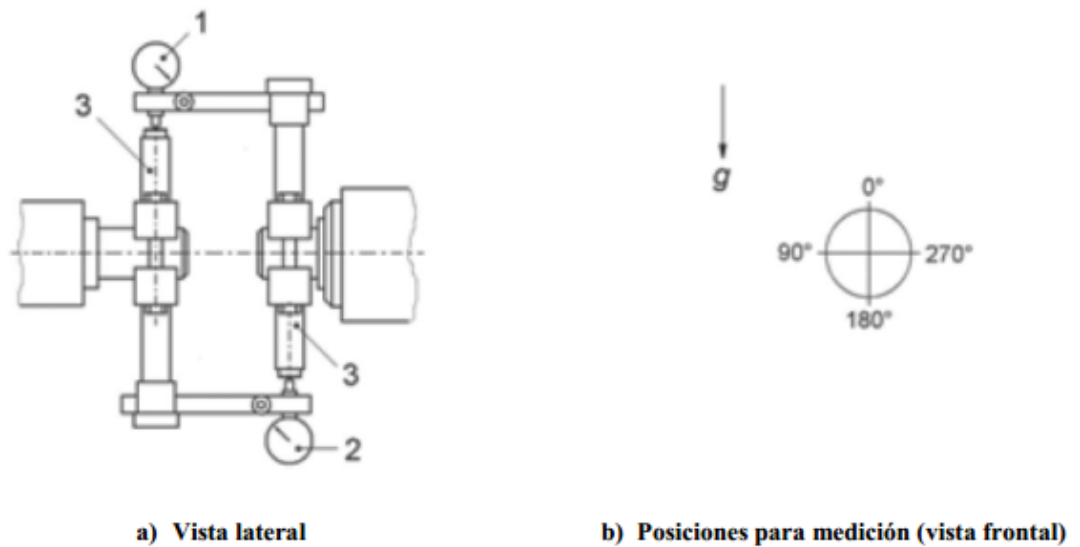
$$H_A = \frac{(F_{270} - F_{90})}{D} \quad (AI.8)$$

R_x es la lectura radial para la posición X.

F_x es la lectura radial para la posición X.

D es el diámetro del círculo que recorre el sensor de desplazamiento en la cara.

Se realizará el montaje de la figura AI.80 para eliminar cualquier tipo de error axial y así suprimir una posible fuente de incertidumbre. En este caso se monta el otro sensor de desplazamiento en el otro eje de giro y los ángulos horizontal y vertical se calculan mediante la diferencia de los desajustes medidos divididos entre la distancia entre los sensores.



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 2 Segundo sensor de desplazamiento lineal en dirección radial
- 3 Soporte a medir
- g Gravedad

Figura AI. 80 Montaje opcional para el ensayo de coaxialidad

A.6.7 Perpendicularidad de los ejes del movimiento

Al igual que para los ensayos de paralelismo, habrá que hacer una diferencia entre los ensayos de

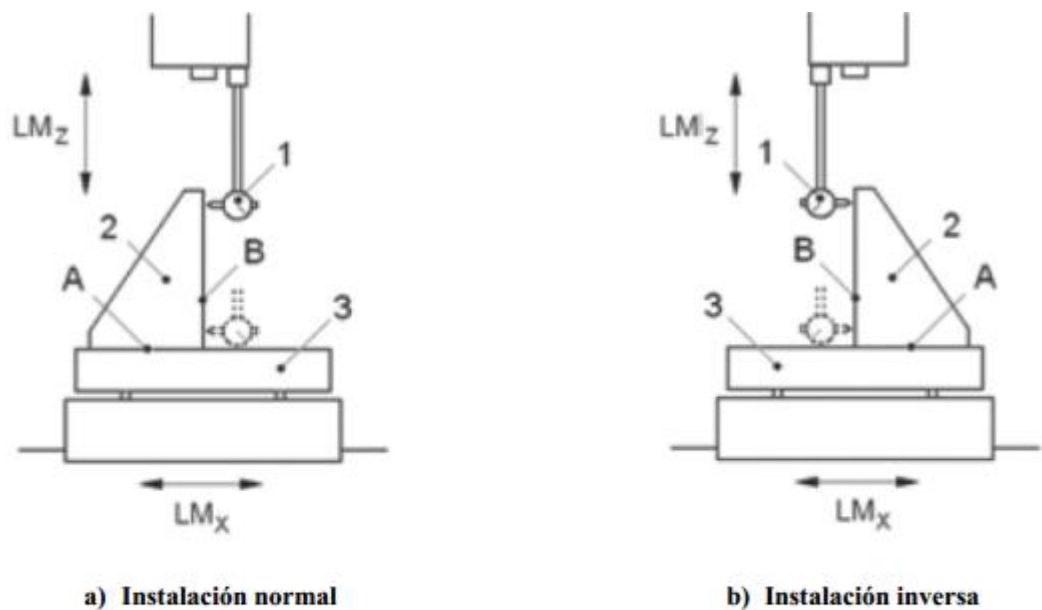
perpendicularidad dependiendo de los ejes que se vayan a comparar.

A.6.7.1 Perpendicularidad entre dos ejes de movimiento lineal

Se determinan dos líneas perpendiculares que son paralelas a los ejes que se va a medir. Cuando se tenga definido estas líneas de referencia se procede a medir el error de paralelismo de cada eje de movimiento con su línea de referencia correspondiente. Por ello, las características de las mediciones son iguales que los ensayos de paralelismo (A.5.1). El error de perpendicularidad se calculará como la suma de los dos errores de paralelismo calculados. Se pueden utilizar los siguientes dispositivos para llevar a cabo esta medición:

- Escuadra patrón y sensor de desplazamiento lineal: se coloca la escuadra patrón de tal manera que quede totalmente alineada con los ejes de movimiento cuya perpendicularidad se quiere medir. El sensor de desplazamiento se instalará perpendicular a la escuadra para medir las desviaciones del eje de movimiento con respecto a la superficie de referencia. La figura AI.81 muestra un claro ejemplo de este montaje. Para el otro eje se realizará el procedimiento descrito en el punto A.5.2.

Se recomienda girar la escuadra 180° y volver a realizar la toma de datos para así cancelar el error del dispositivo. Se deberá de realizar de nuevo todos los ajustes y alineamientos para realizar la toma de datos con el nuevo montaje.



Leyenda

- 1 Sensor de desplazamiento lineal
- 2 Escuadra patrón
- 3 Regla
- A Primera superficie de referencia de la escuadra patrón
- B Segunda superficie de referencia de la escuadra patrón
- LM_x Movimiento lineal a lo largo del eje X (ejemplo)
- LM_z Movimiento lineal a lo largo del eje Z (ejemplo)

Figura AI. 81 Ensayo de perpendicularidad con sensor de desplazamiento y escuadra patrón

- Interferómetro láser de rectitud: para realizar las mediciones de perpendicularidad se necesitarán las ópticas de rectilinealidad presentadas en el punto A.5.1 y una escuadra óptica si el procedimiento así lo requiere. Se llevarán a cabo mediciones de rectitud de cada eje utilizando una referencia común para ambos. Se recomienda entender/conocer las características del ensayo de rectitud por ser aplicables para este ensayo también. La referencia normalmente será el reflector de rectitud que permanecerá inmóvil para ambas mediciones. La escuadra óptica se

utilizará para poder alinear el rayo láser sin tocar el reflector de rectitud.

Según los ejes que se vayan a medir y las ópticas que se usen se puede realizar los montajes representados en las figuras AI.82 hasta AI.85.

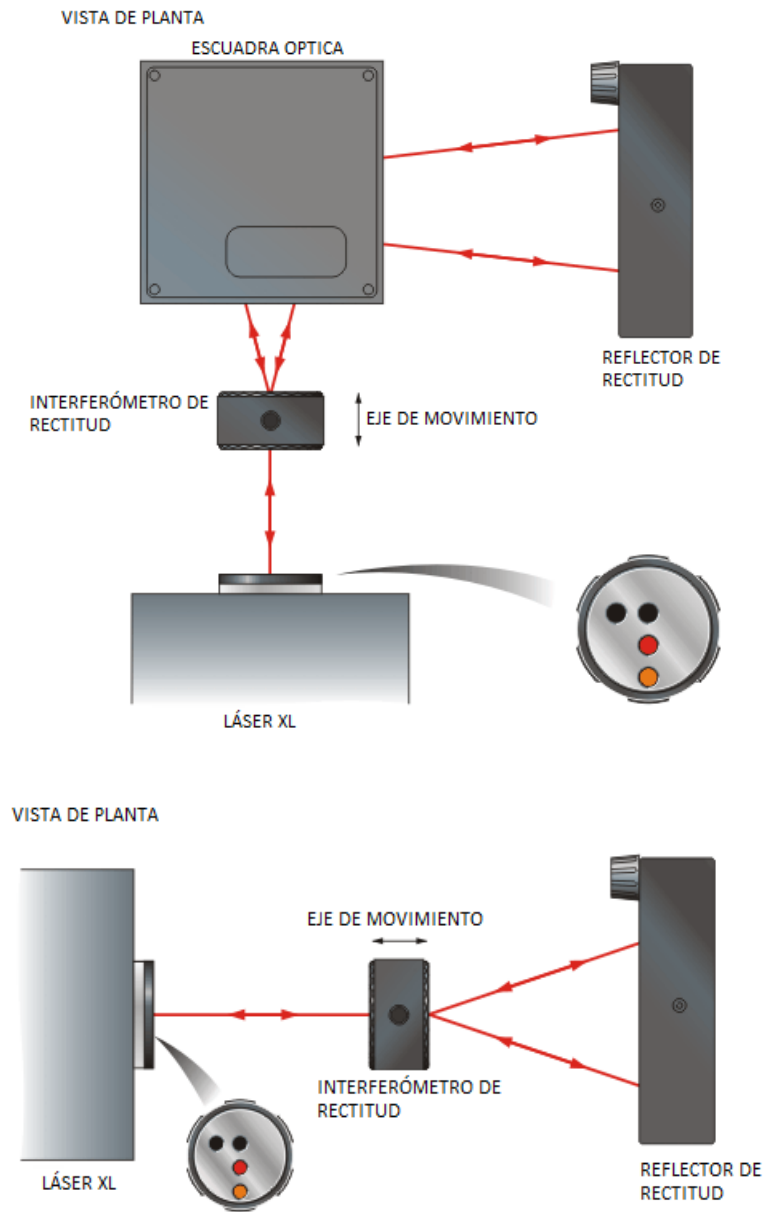


Figura AI. 82 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 1)

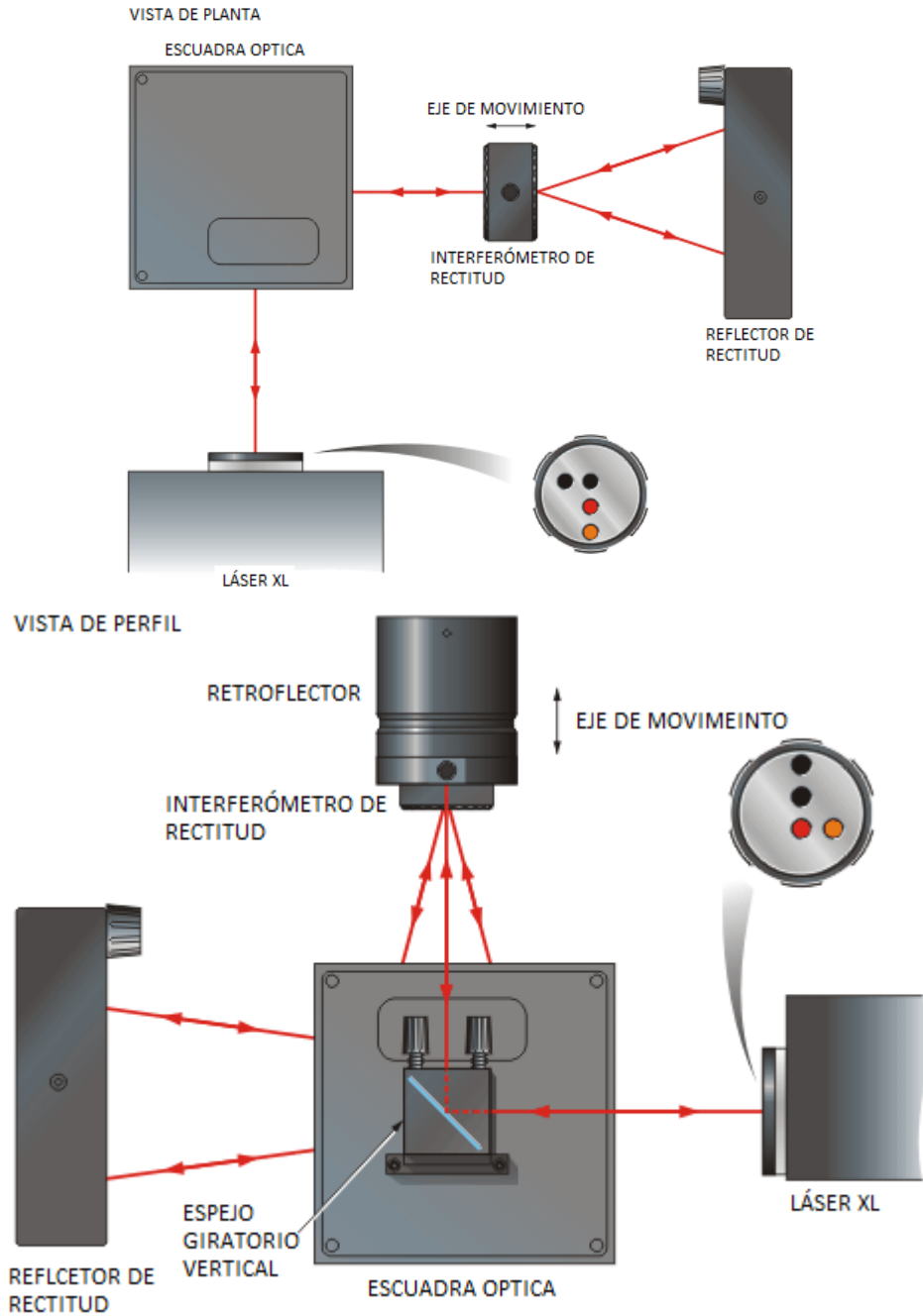


Figura AI. 83 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 2)

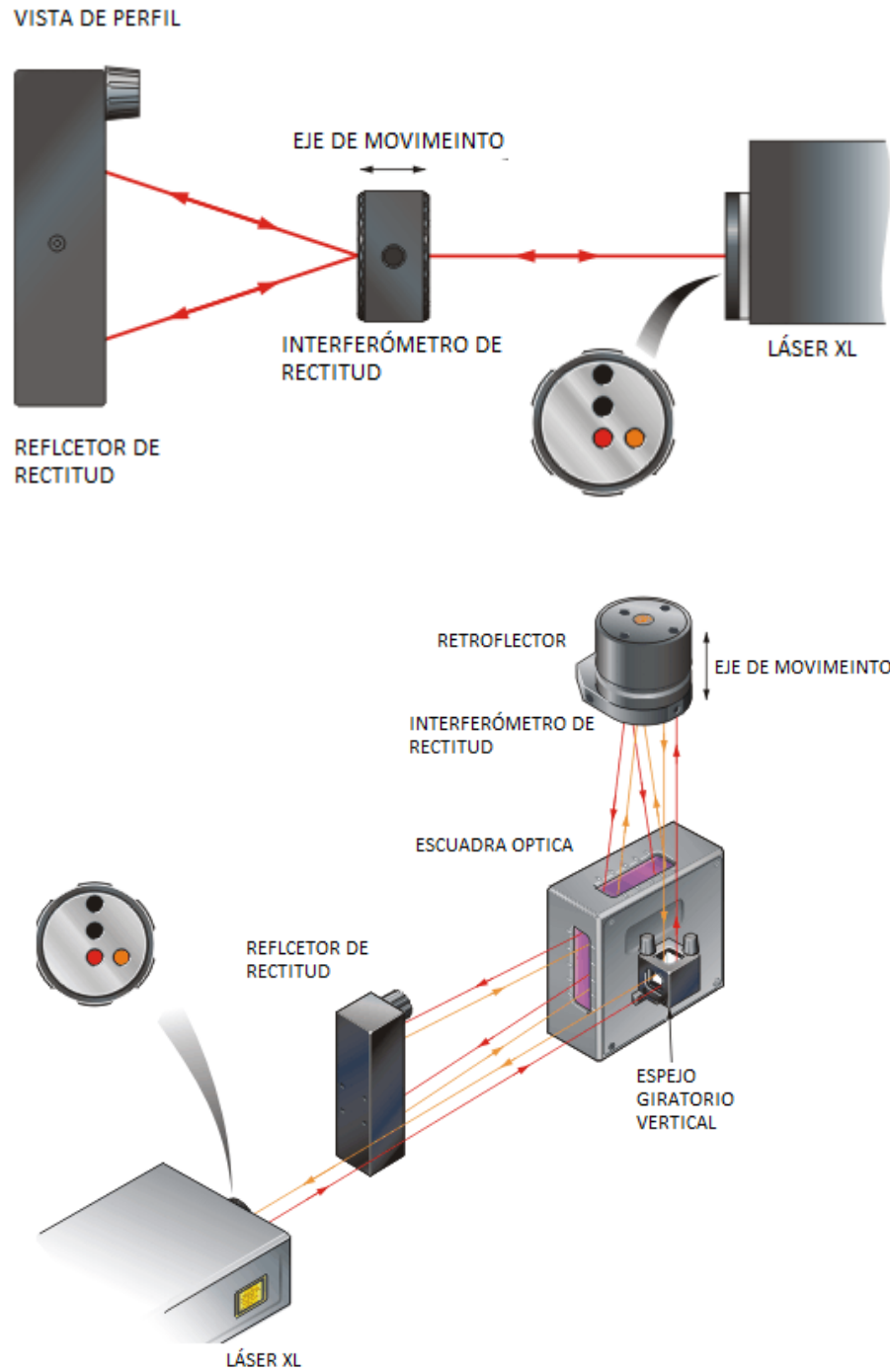


Figura AI. 84 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 3)

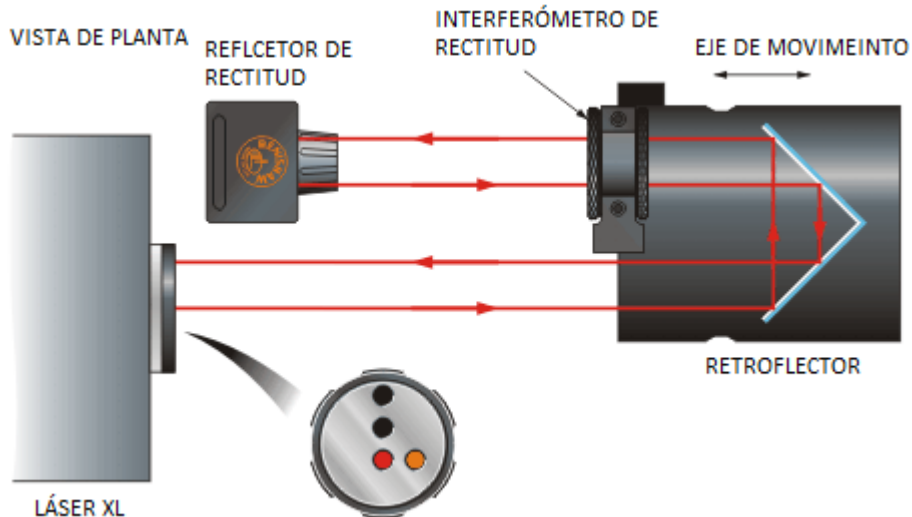


Figura AI. 85 Montaje para ensayo de perpendicularidad (opción 4)

Una variante de las figuras AI.83 y AI.84 sería instalar el espejo vertical orientándolo hacia fuera. De esta manera el láser se coloca perpendicular a la escuadra óptica. Se pueden crear otros montajes según las características de la máquina y de la accesibilidad de la zona de trabajo.

La alineación aproximada es un proceso rápido para alinear uno de los ejes de medición con el rayo láser. Este procedimiento ayudará a simplificar los posteriores alineamientos.

1. Montar el interferómetro de rectitud a la parte móvil de la máquina herramienta.
2. Colocar el láser sobre el trípode. El láser debe de estar a 48 mm aproximadamente sobre la mesa si se trata de un ensayo horizontal-horizontal y a 98 mm si es un ensayo vertical-horizontal.
3. Girar el obturador del láser para obtener un haz reducido del láser.
4. Trasladar el interferómetro de rectitud lo más cerca posible del láser. Girar la cara del interferómetro hasta colocar el punto blanco en la parte superior.
5. Mover la máquina o el láser para hacer coincidir el rayo láser en el punto blanco.
6. Comprobar que el rayo láser incide sobre e punto blanco durante todo el recorrido.
7. Quitar el interferómetro de rectitud.

Se realizarán los siguientes alineamientos según el plano donde se encuentren los ejes a medir:

- Horizontal - horizontal: los alineamientos sobre los ejes no se harán de manera consecutiva, sino que entre ambos ajustes se realizará la toma de datos correspondiente a cada eje que se haya alineado. Los pasos del alineamiento del primer eje de medición son los siguientes:
 1. Asegurarse que la escuadra óptica ha sido montada en la intersección de ambos ejes y es paralela a la bancada. Las aberturas de la escuadra óptica deben de estar orientadas de manera que coincidan con los ejes a medir.
 2. Ajustar la altura del láser o la posición lateral de la escuadra óptica para que el haz de entrada quede centrado tanto en la abertura de entrada como de salida. Además, debe de estar aproximadamente 6 mm por encima del eje central como se puede ver en la figura AI.86.

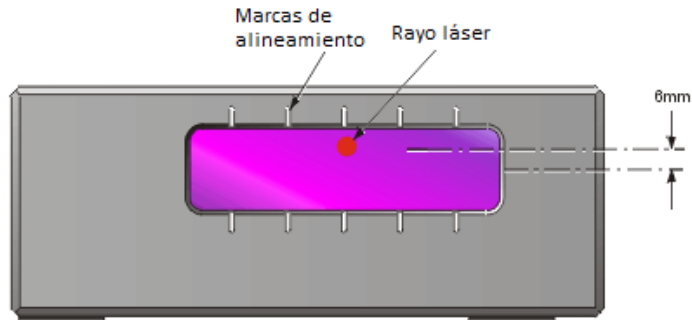


Figura AI. 86 Ajuste de la escuadra óptica

3. Asegurarse que el rayo láser incide en el centro del reflector de rectitud, aproximadamente 6 mm por encima del eje central tal y como se ve en la figura AI.87.

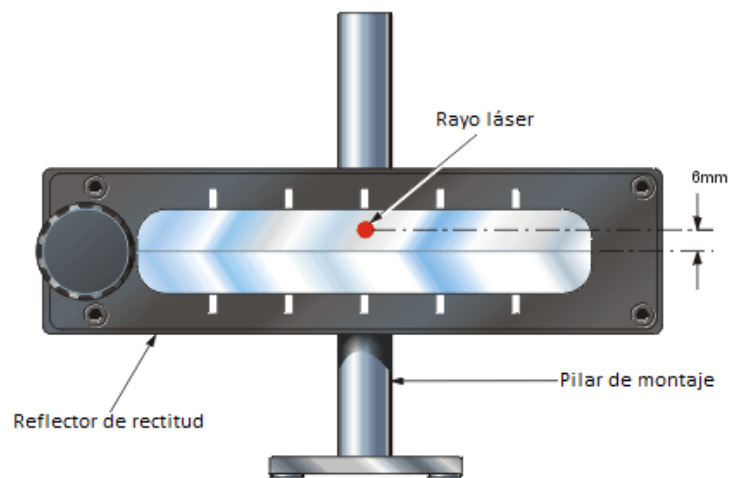


Figura AI. 87 Montaje reflector de rectitud

4. Instalar el interferómetro de rectitud entre el láser y la escuadra óptica.
5. Mover el elemento al que está conectado el interferómetro hasta hacer coincidir el rayo láser con el punto blanco del interferómetro. La Figura AI.88 muestra un ejemplo de esta situación.



Figura AI. 88 Interferómetro de rectitud

6. Comprobar que el rayo láser se mantiene en el punto blanco durante todo el recorrido.
7. Girar la cara del interferómetro de rectitud para conseguir el rayo separado en dos haces como en la figura AI.89.



Figura AI. 89 Interferómetro de rectitud

8. Ajustar la posición del reflector de rectitud para que los haces divergentes que provienen del interferómetro incidan equidistantes en la parte superior central. Aproximadamente 6 mm sobre el eje central. La figura AI.90 muestra este caso.

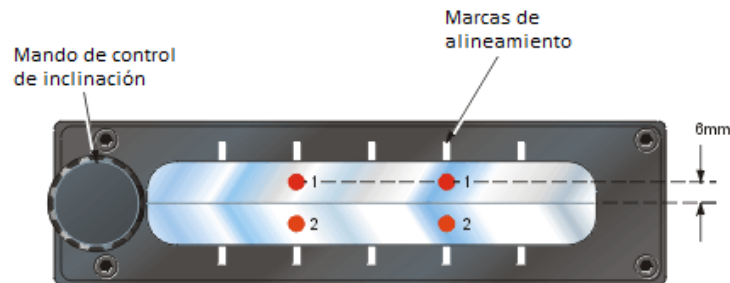


Figura AI. 90 Reflector de rectitud

9. Comprobar que el láser de vuelta pasa por la escuadra óptica, el interferómetro de rectitud y llega al punto blanco del obturador del láser como se observa en la figura AI.91.



Figura AI. 91 Obturador del cabezal láser

10. Si los haces de vuelta no se superponen se procederá a girar el interferómetro finamente hasta hacerlos coincidir.
11. Si los haces se encuentran por encima o por debajo del centro del obturador, se moverá verticalmente el reflector de rectitud hasta colocarlo correctamente.
12. Si los haces se encuentran a la derecha o a la izquierda del centro del obturador, se ajustará el mando de control de inclinación del reflector de rectitud.
13. Una vez ajustado todos estos parámetros se gira el obturador del láser para emitir el haz completo. La figura AI.92 muestra esta posición del obturador.

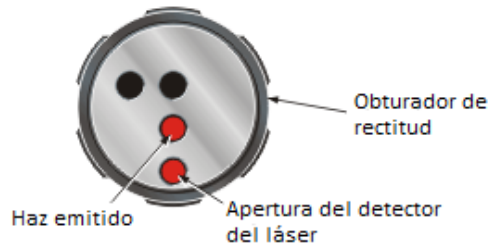



Figura AI. 92 Haz completo en el obturador del cabezal láser

14. Comprobar en el software la intensidad de la señal. Si el mensaje Señal baja o Rayo Obstruido aparece se debe de mover ligeramente el interferómetro para comprobar que no corta ningún haz. Si los mensajes siguen apareciendo se debe de comprobar los haces en la escuadra óptica y el reflector de rectitud. Repetir esta comprobación a lo largo del recorrido y en caso de resultado negativo volver a hacer el proceso de alineación.

A continuación del alineamiento descrito anteriormente se procede a realizar un ajuste para eliminar cualquier desalineación entre el eje de movimiento y el eje del reflector. Para ello se realizará el procedimiento descrito en el punto A 5.1.

Antes de comenzar con la toma de datos hay que comprobar si el criterio de signos coincide entre la máquina y el software. El criterio de signos que se seguirá según como se desplace el interferómetro de rectitud viene dado con las figuras AI.93 y AI.94. Para comprobar que coincide el criterio de signos se deberá de empujar ligeramente el interferómetro de rectitud en la dirección positiva, según el caso que corresponda, y comprobar que en la ventana principal del software aparece un dato positivo. En caso contrario de debe de pulsar el botón , ubicado en la barra de herramientas de la ventana principal.

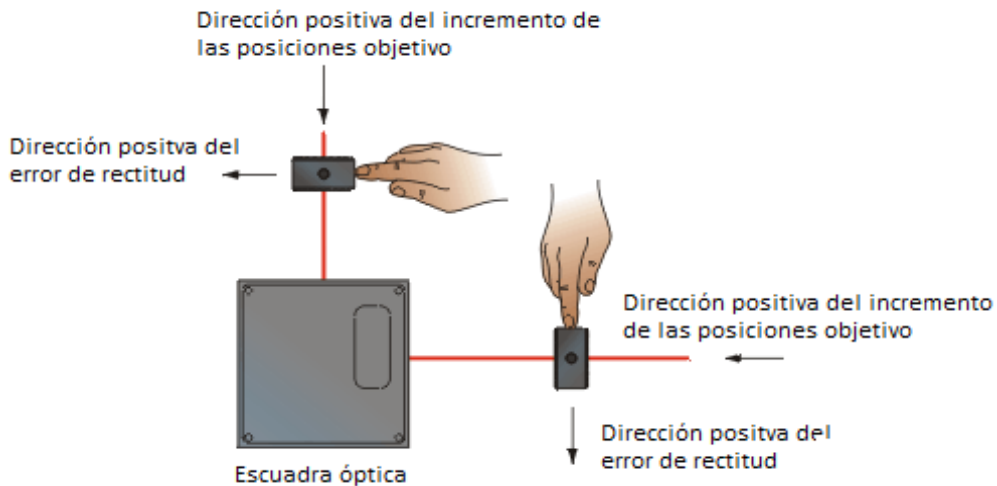


Figura AI. 93 Criterio de signos

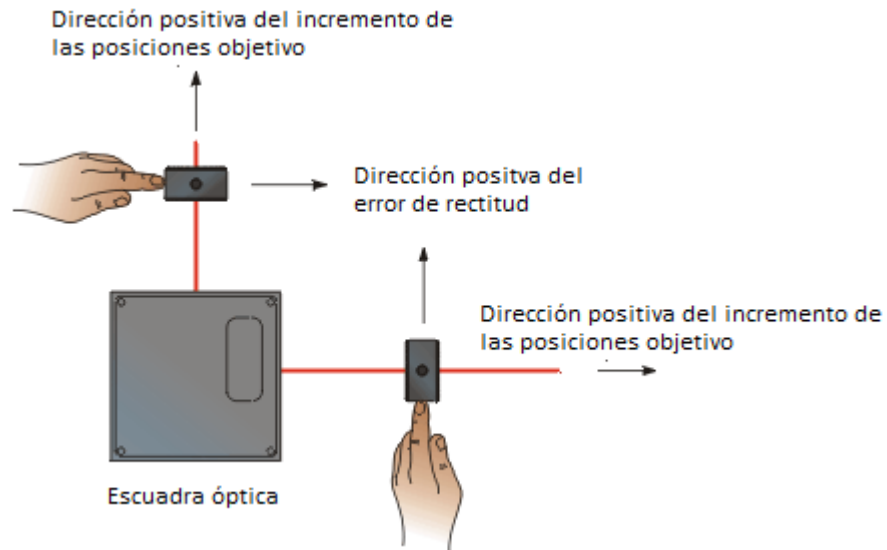


Figura AI. 94 Criterio de signos

Con todo ello se puede realizar la toma de datos del primer eje de medición. Una vez finalizada esta medición se procede a realizar el montaje para la medición del segundo eje según la configuración elegida de las presentadas anteriormente. El interferómetro de rectitud se debe de alinear con el segundo eje y se comprueba la intensidad de señal durante todo el recorrido. Si se obtiene un mensaje de Haz obstruido o Señal baja se procederá a comprobar la alineación de la siguiente manera:

1. Comprobar que los haces de entrada y salida pasan correctamente por el interferómetro de rectitud sin producirse ningún corte como se observa en la figura AI.95. En caso contrario mover el interferómetro vertical y horizontalmente según convenga.

Vista desde el láser



Figura AI. 95 Interferómetro de rectitud

2. Girar el obturador para emitir un haz reducido y comprobar que el haz de retorno incide sobre el objetivo como en la figura AI.96.



Figura AI. 96 Haz reducido en el obturador del cabezal láser

3. Si los haces de retorno inciden por debajo o por encima del centro del objetivo se debe de mover verticalmente el cabezal del láser. En otro caso, si los haces se encuentran a la derecha o la izquierda del centro del objetivo se gira el láser

horizontalmente para hacerlos coincidir. Si se han realizado dichos movimientos se debe de mover el cabezal del láser horizontalmente para que los haces de salida y de retorno pasen sin cortes por el interferómetro de rectitud.

4. Si los haces no se encuentran superpuestos en el objetivo del obturador se gira ligeramente la cara del interferómetro.
5. Girar el obturador para emitir un haz normal y comprobar la intensidad a lo largo del recorrido. En caso de aparecer algún mensaje de error relativo a la intensidad de la señal volver a realizar el proceso de alineamiento.

Finalizado el proceso de alineamiento del segundo eje se procede a la comprobación del criterio de signos de la máquina con el software (se realiza de la misma manera explicada anteriormente). A continuación, se realiza la toma de datos y su posterior análisis de los datos.

- Cuando se realiza una medición vertical-horizontal la configuración de las ópticas serán distintas y por ello se debe de realizar unos alineamientos propios para cada eje de medición. Empezando con el eje vertical como primer eje de medición, se realizará los siguientes pasos para su correcto alineamiento:
 1. Comprobar que el espejo vertical se encuentra instalado correctamente sobre su soporte. Con una de las aberturas de la escuadra óptica y el espejo vertical mirando hacia arriba y la otra abertura mirando hacia el reflector de rectitud y el láser respectivamente. En la figura AI.97 se puede ver el montaje del espejo vertical sobre la escuadra óptica.

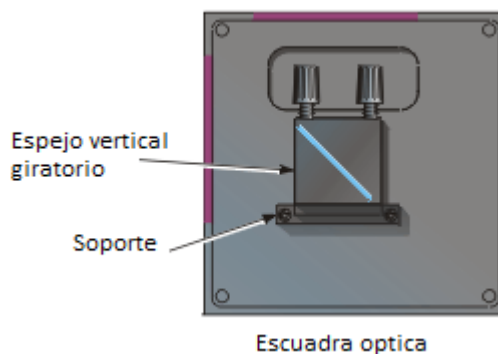


Figura AI. 97 Montaje espejo vertical

2. Montar sobre el espejo giratorio un objetivo con el punto blanco hacia la derecha como en la figura AI.98. Mover la escuadra óptica horizontalmente o el láser verticalmente para hacer coincidir el rayo láser en el centro del objetivo.

VISTA DE PERFIL

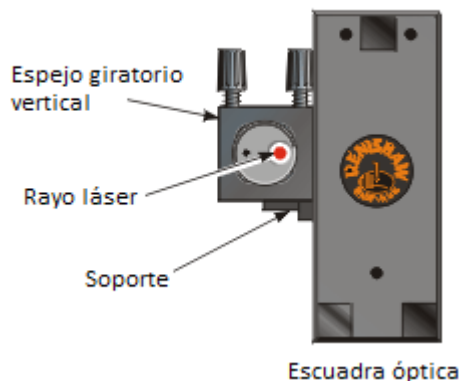


Figura AI. 98 Ajuste espejo vertical

3. Comprobar que la escuadra óptica es paralela y perpendicular a los ejes de la máquina. Usar para ello una escuadra de prueba o reloj comparador.
4. Volver a verificar que el rayo láser incide en el centro del objetivo. Quitar el objetivo una vez verificado.
5. Chequear que el interferómetro de rectitud ha sido instalado correctamente en el retroreflector de gran tamaño. La figura AI.99 muestra el montaje del interferómetro sobre el retroreflector de gran tamaño.

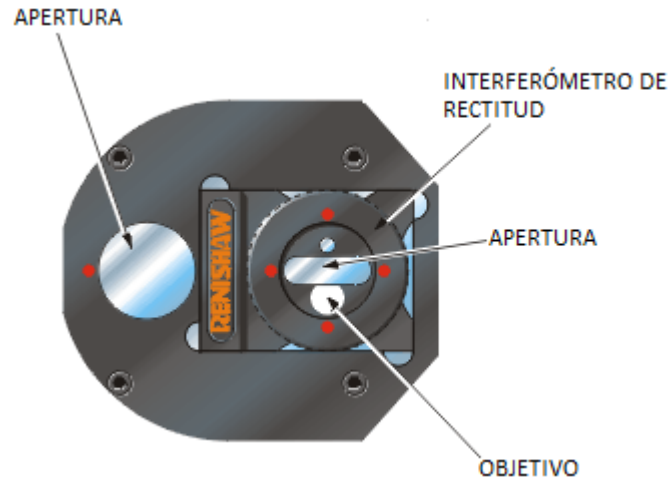


Figura AI. 99 Montaje interferómetro de rectitud

6. Asegurarse que la apertura del retroreflector está justo encima del espejo giratorio y la apertura del interferómetro esta encima de la escuadra óptica. Bloquear el retroreflector en la posición deseada con la tuerca ubicada en adaptador M8.
7. Montar un objetivo sobre la apertura del retroreflector de manera que el punto blanco quede en la parte interior como en la figura AI.100.

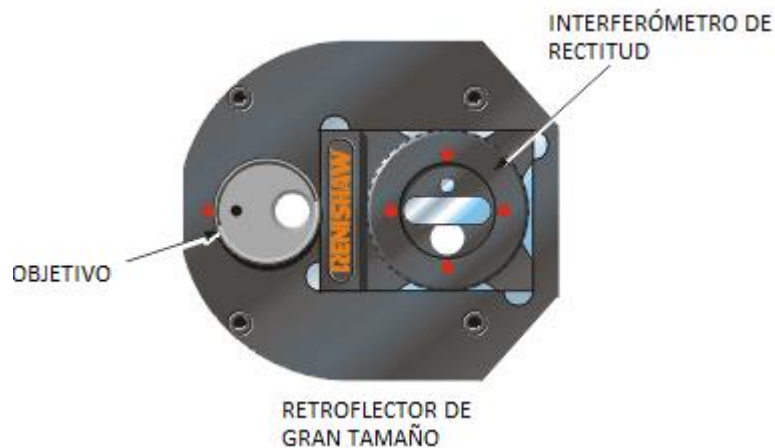


Figura AI. 100 Ajuste interferómetro de rectitud

8. Mover el retroreflector lo más cerca posible de la escuadra óptica, pero sin dejar de ver el objetivo blanco. Trasladar el retroreflector para que el rayo láser incida en el centro del objetivo.
9. Elevar el retroreflector hasta su máxima posición y ajustar el rayo láser para que incida sobre el objetivo. Para ello se ajustará el espejo vertical con sus mandos de control. En la figura AI.101 se puede ver los elementos del espejo vertical. Si no se consigue que el rayo láser incida sobre el objetivo se debe de realizar un alineamiento del rayo láser con el eje horizontal, llamado alineación aproximada.

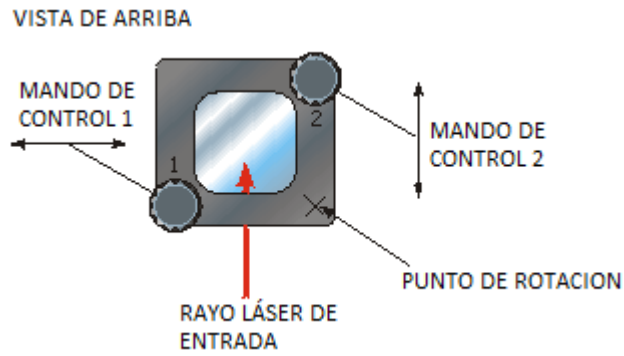


Figura AI. 101 Ajuste espejo vertical

10. Bajar el retroreflector hasta la posición más baja, comprobando que el rayo láser índice en el centro del objetivo. Si no es así se moverá el retroreflector en ambos ejes horizontales para conseguir que el rayo láser indica de nuevo en el centro del objetivo.
11. Elevar de nuevo el retroreflector hasta su máxima posición y quitar el objetivo de la apertura de este. Comprobar que el rayo láser pasa a través de la apertura y pasa por el interferómetro dividiéndose en dos haces dirigidos hacia la escuadra óptica.
12. Girar la cara del interferómetro para que los dos haces divergentes incidan en la parte interior de la abertura de la escuadra óptica. Ambos haces deben de ser equidistantes, para ello se toma en cuentas las marcas que existen en la cara de la abertura para tomarlas como referencia. Tomar como ejemplo de este caso la figura AI.102

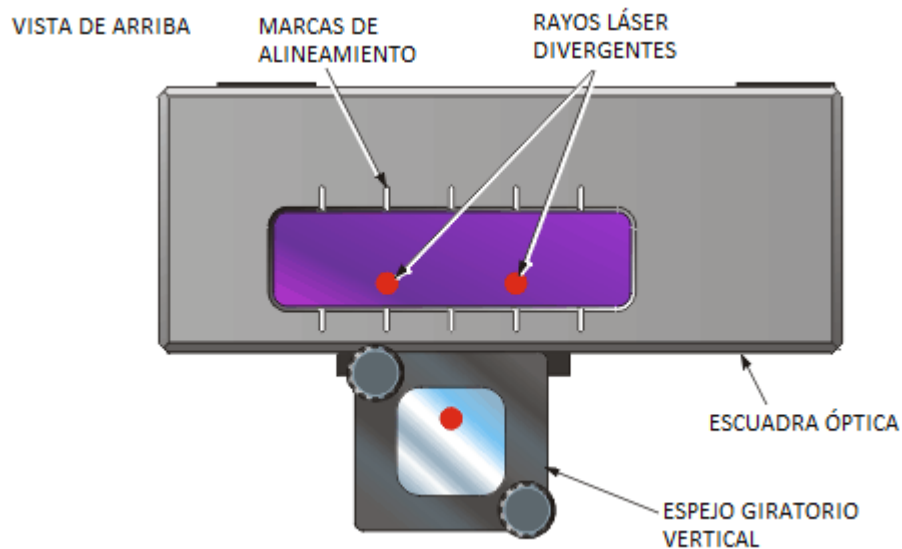


Figura AI. 102 Haz de láser sobre Escuadra óptica

13. Comprobar que el reflector de rectitud es perpendicular con los ejes de la máquina. Además, verificar que el rayo láser incide equidistantes en la parte izquierda de la apertura, 6 mm por encima del eje central como en la figura AI.103.

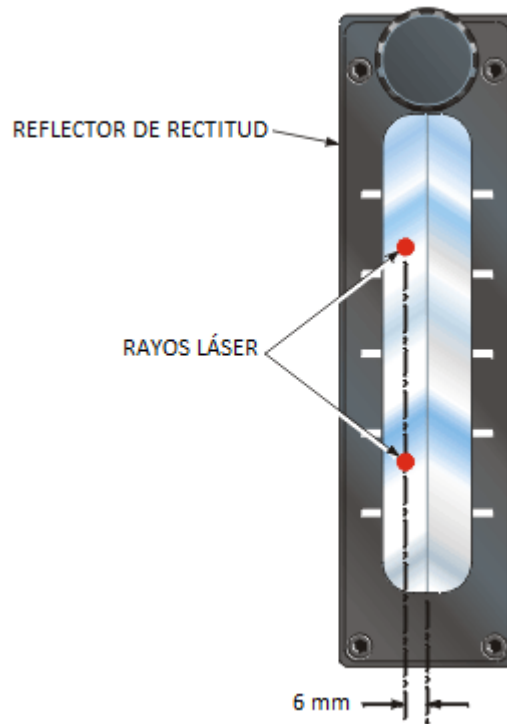


Figura AI. 103 Haz de láser sobre reflector de rectitud

14. Mover el reflector de rectitud para que los haces de vuelta pasen por la escuadra óptica e incidan en la parte de retorno del interferómetro como en la figura AI.104.

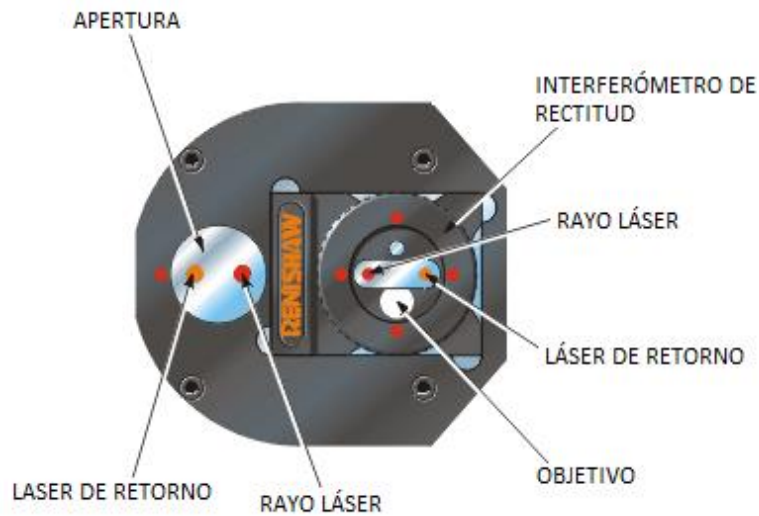


Figura AI. 104 Haz de láser sobre interferómetro de rectitud

15. Comprobar que el rayo de retorno pasa por todos los componentes de manera correcta y es reflejado en el obturador del láser como en la figura AI.105.



Figura AI. 105 Haz de láser sobre obturador del cabezal láser

16. Si los dos haces de retorno no se superponen, girar ligeramente el interferómetro.
17. Si los dos haces de retorno se encuentran por encima o por debajo del centro del objetivo del obturador, mover el reflector de rectitud con el mando de control.
18. Si los dos haces de retorno se encuentran a la derecha o izquierda del centro del objetivo del obturador, trasladar horizontalmente el reflector de rectitud.
19. Bajar el retroreflector y comprobar que el rayo láser si incidiendo en el objetivo del obturador. Si se produce algún corte se debe de ajustar el rayo girando los mandos de control del espejo giratorio hasta hacer coincidir el rayo láser en el objetivo del obturador.
20. Girar el obturador para obtener el rayo láser completo.
21. Mover el retroreflector a lo largo de todo el recorrido comprobando que se obtiene una intensidad de señal constante. Si existe una pérdida de señal considerable se debe de girar ligeramente la cara del interferómetro, comprobar que el rayo láser no es cortado por ninguna óptica o que el retroreflector se encuentre perpendicular con los ejes de la máquina.

Al igual que para el alineamiento del primer eje del ensayo horizontal-horizontal se debe de hacer un alineamiento entre el eje de movimiento y el eje del reflector, descrito en el punto A.5.1.

Seguidamente se realiza la comprobación del criterio de signos de la máquina y del software para comprobar que van en línea. Para ello se seguirá el criterio de signos que se ha expuesto anteriormente para el ensayo horizontal-horizontal.

Para el ajuste del segundo eje se seguirán los siguientes pasos:

1. Desmontar la escuadra óptica, el espejo giratorio, el retroreflector y el interferómetro de rectitud de la zona de ensayo.
2. Girar el obturador del láser para obtener un haz reducir del láser.
3. Mover el láser horizontalmente para que el rayo láser incida en el centro del reflector de rectitud a 6 mm del eje central como en la figura AI.106.

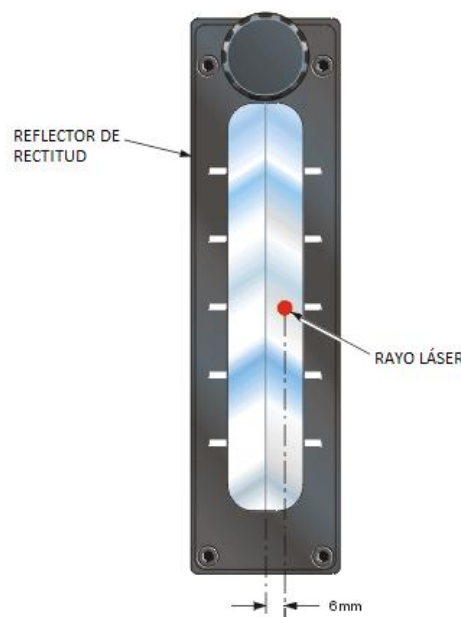


Figura AI. 106 Haz de láser sobre reflector de rectitud

4. Instalar el interferómetro de rectitud en la parte móvil de la máquina.
5. Colocar el interferómetro lo más cerca posible del láser. Girar la cara del

- interferómetro para colocar el punto blanco en la parte derecha, vista desde el láser.
6. Comprobar que el rayo láser incide sobre el punto blanco en todo el recorrido.
 7. Girar la cara del interferómetro para hacer que los rayos de salida y entrada incidan como se indica en la figura AI.107. Si se produce algún recorte de los haces, mover el interferómetro vertical u horizontalmente con su eje.



Figura AI. 107 Haz de láser sobre interferómetro de rectitud

8. Comprobar que los haces de retorno se encuentran centrados en el objetivo del obturador. Si los haces se encuentran a la izquierda o derecha del centro, se traslada horizontalmente el cabezal láser hasta coincidir que coincidan en el centro. Si los haces se encuentran por debajo o por encima del centro, se gira verticalmente el láser hasta hacerlos coincidir en el centro.
9. Mover verticalmente el reflector, si fuera necesario para hacer que los haces de retorno seas simétricos verticalmente. Ajustar verticalmente el interferómetro si se ha realizado algún movimiento en el reflector para que ningún haz sea recortado.
10. Comprobar que los haces se superponen en el objetivo del obturador. Si no es así, mover ligeramente la cara del interferómetro y después girar sobre su eje vertical para superponerlos en el objetivo.
11. Girar el obturador del láser para obtener un haz normal.
12. Comprobar que durante todo el recorrido la intensidad de la señal es constante. Si se obtiene mensaje de SIGNAL LOW o BEAM OBTRUCTED girar ligeramente el interferómetro para arreglarlo. Si no se obtienen resultados favorables volver al paso 6 y realizar el alineamiento de nuevo.

Realizado el alineamiento sobre el segundo eje se procede a comprobar que el criterio de signos coincide, para que no se produzca discrepancias en las mediciones. Para ello se tendrá en cuenta el método de comprobación y el criterio de signos expuesto anteriormente. Cuando se hayan realizado todos los pasos indicados satisfactoriamente se realiza la toma de datos para su posterior análisis.

A.6.7.2 Perpendicularidad entre dos ejes de revolución

Para este ensayo se necesita un mandrino de control y un sensor de desplazamiento. En uno de los ejes de giro se coloca el mandrino de control y en el otro se instala el sensor de desplazamiento con un brazo para que este a cierta distancia del eje. La figura AI.108 muestra un esquema de este montaje. A continuación, se pone en contacto el sensor de desplazamiento con el mandrino y se ajusta hasta que el sensor este en cero.

Se realizará una toma de datos con el sensor en una posición sobre el mandrino y luego otra moviendo el sensor 180° en torno al eje giratorio donde está instalado. Para realizar la toma de datos se procede a girar el eje que tiene el mandrino mientras se anota las desviaciones del sensor de desplazamiento. Las posiciones donde se realizarán las mediciones quedan a conveniencia entre operador y cliente.

Con los resultados de las mediciones anteriormente descritas se obtiene mediante mínimos cuadrados los centros de los círculos. La perpendicularidad entre ambos ejes de giro se calculará como la diferencia entre las coordenadas del centro a lo largo del eje de giro que tiene el sensor de desplazamiento dividido entre la distancia del sensor de desplazamiento en las dos mediciones.

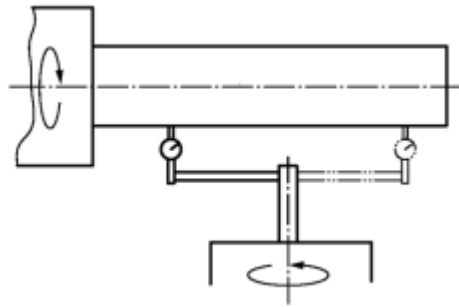
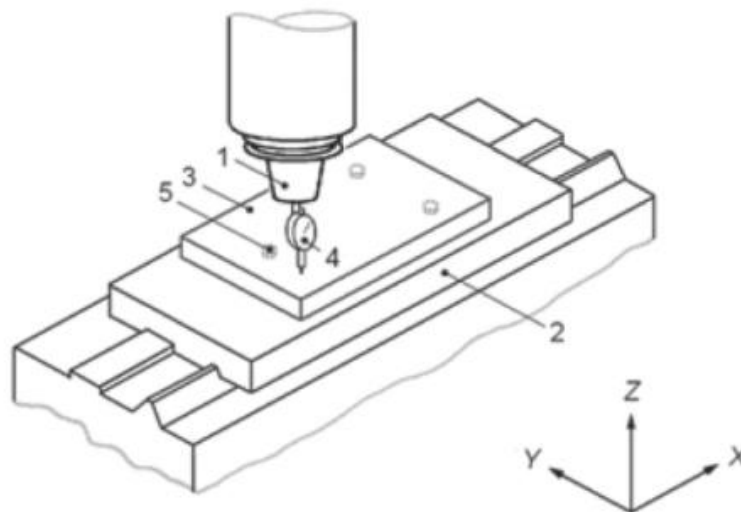


Figura AI. 108 Perpendicularidad entre dos ejes de revolución

A.6.8 Ensayo de planitud

El ensayo de planitud se puede realizar tanto a una superficie virtual generada por dos ejes lineales o a una superficie funcional de la máquina herramienta. Para realizar estas mediciones se empleará dispositivos de referencia para, a partir de ellos, medir las posibles desviaciones.

- Placa como superficie de referencia y sensor de desplazamiento lineal: se sitúa una placa de referencia sobre la cual se desplazará el sensor de desplazamiento. El sensor de desplazamiento se instala sobre el componente móvil de la máquina. En la figura AI.109 se puede observar un esquema de dicha instalación. El sensor de desplazamiento será el encargado de medir las posibles desviaciones que existan. El error de planitud es el rango de las desviaciones de planitud medidas.

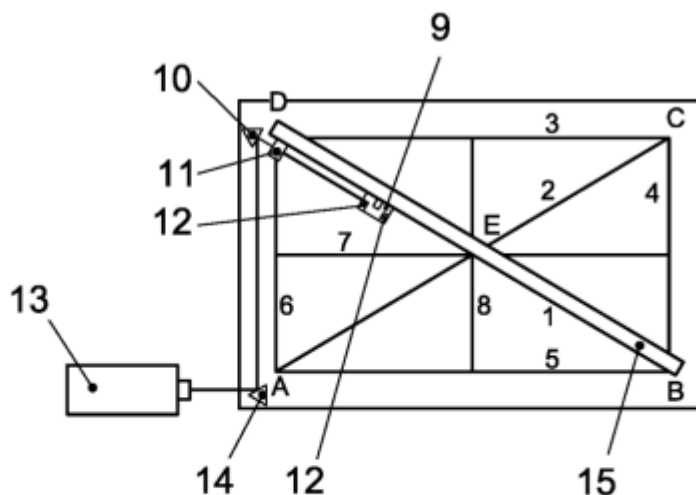


Leyenda

- 1 Husillo
- 2 Mesa
- 3 Placa de referencia de la superficie
- 4 Sensor de desplazamiento lineal
- 5 Puntos de apoyo (3)

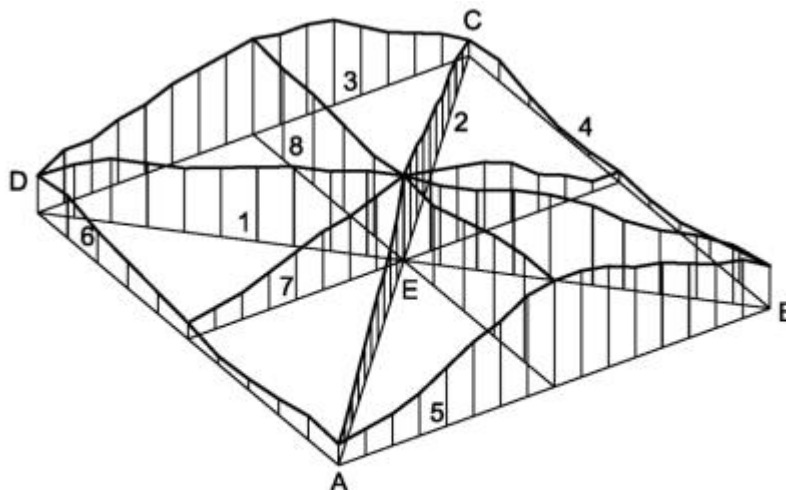
Figura AI. 109 Ensayo de planitud con sensor de desplazamiento y superficie de referencia

- Interferómetro laser: se usa para realizar el ensayo de planitud de una superficie funcional de la máquina herramienta, por ejemplo, la mesa de trabajo. Este ensayo se basa en comprobar la rectitud de varias líneas de la superficie realizando mediciones de alteraciones angulares en cada posición de toma de datos. Se define varias líneas que representan la superficie a medir y a la cuales se le asignara un orden de medición, como se puede ver en la figura AI.110. Con los datos recogidos y procesados por el software de Renishaw se representará isométricamente la planitud de la superficie en cuestión como se puede ver en la figura AI.111.



- Leyenda
- 1 a 8 Líneas de medición
 - 9 Retroreflector
 - 10 Segundo espejo orientable
 - 11 Interferómetro
 - 12 Apoyo del retroreflector
 - 13 Cabezal del láser
 - 14 Primer espejo orientable
 - 15 Regla guía

Figura AI. 110 Ensayo de planitud con interferómetro láser



- Leyenda
- 1 a 8 Líneas de medición

Figura AI. 111 Mapa de resultados

Del kit del láser se utilizan los siguientes componentes: dos espejos giratorios, tres bases de planitud, el interferómetro angular, el reflector angular. Además de los elementos mencionados se precisa de una regla cuya longitud sea igual a la línea de mayor longitud que se va a medir. La regla servirá de guía para desplazar la base de planitud con el reflector angular. Este elemento debe de tener una precisión de 20 μm .

El interferómetro angular debe ser colocado en la trayectoria entre el cabezal del láser y el

reflector angular. Así pues, el interferómetro se instala al lado del espejo giratorio y el reflector sobre una de las bases de planitud. El interferómetro angular se orientará de manera que el lado con solo una abertura óptica este enfrente del espejo giratorio y el lado con dos aberturas ópticas este orientado hacia el reflector angular. La figura AI.112 muestra un esquema de este montaje. Para ciertas líneas de medición se utilizará un segundo espejo giratorio.

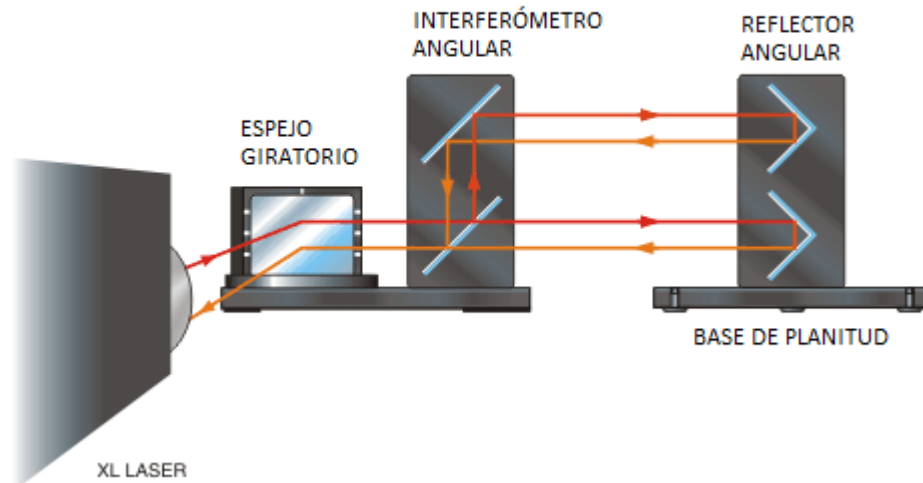


Figura AI. 112 Montaje para ensayo de planitud

El interferómetro genera dos haces de medición (líneas rojas) que, a su retorno al cabezal láser, son comparadas por el software para hallar las posibles desviaciones. Técnicamente el software lo que muestra es una lectura incremental de la parte delantera y trasera donde está instalado el reflector angular. Por lo que el error de planitud en una línea de medición será la suma algebraica de todas las alturas incrementales medidas en los puntos seleccionados. Para las distintas líneas de medición el interferómetro permanecerá inmóvil y el reflector angular será el encargado de moverse a lo largo de la línea de medición correspondiente.

Existen dos métodos para elegir las líneas de medición sobre la superficie que se realizarán las mediciones:

- Método Moody: en este método se tiene 8 líneas de medición dispuestas como en la figura AI.113. Se trata de una configuración de líneas sencilla de plantear, pero consta de una desventaja si la mesa a medir tiene ranuras puede resultar difícil definir una distancia entre pies para realizar las mediciones en ciertas posiciones.

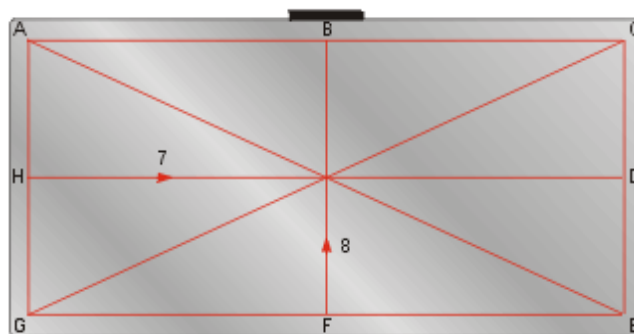


Figura AI. 113 Método Moody

- Método de cuadrículas: para este método se definen líneas ortogonales a lo largo de la superficie en cuestión como se puede observar en la figura AI.114. La configuración de las

líneas no es algo predefinido ya que el operario puede elegir cuantas líneas usar para proporcionar mayor detalle en un área definido o evitar ciertas áreas de la mesa.

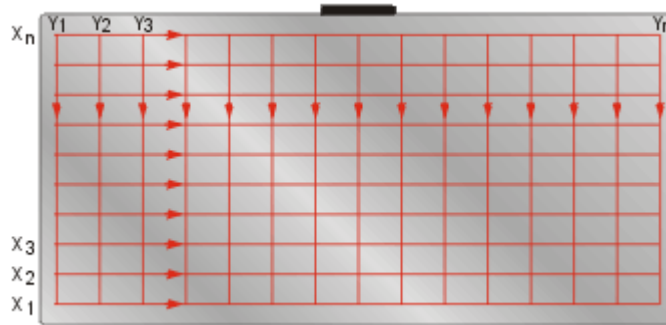


Figura AI. 114 Método de cuadrículas

Para llevar a cabo cualquier de ambos métodos primero se debe de limpiar la superficie sobre la que se va a hacer las mediciones y dejar que llegue a un equilibrio térmico con el entorno. Después se procede a dibujar el mapa de líneas, con lápiz de plomo o tiza, que servirán de guías para el proceso de medición. Este mapa de líneas debe de seguir una serie de normas para que no interfiera con el montaje de las ópticas y se pueda realizar el ensayo sin ningún inconveniente.

- Las marcas que se hagan deben de estar a una distancia de 8.5 mm o 41.5 mm con respecto a las líneas de medición. Esta longitud marca la distancia entre los bordes longitudinales de las placas base y la línea de medición.
- El perímetro de medición viene marcado por donde se colocará el láser. El borde que sea paralelo al haz del láser debe de estar a 108 mm con respecto al borde la superficie a medir y los otros tres lados a mínimo 75 mm del borde de la superficie a medir.
- Las longitudes de las líneas de medición se calcularán para que sean un múltiplo de la longitud de la placa base seleccionada. Para el método Moody, en el cual es difícil determinar una longitud justa para conseguir un cierre perfecto, se acepta un error de un 1%.
- El haz del láser debe de estar mínimo a 83 mm de la línea de perímetro de medición y a 25 mm del borde de la superficie a medir.

Preparada la zona de medición y marcadas las líneas sobre las cuales se desplazará el reflector de rectitud, se procede a realizar la correspondiente alineación de las ópticas. Con esto se obtiene unos resultados aceptables y una intensidad del haz del láser constante a lo largo de los diferentes recorridos. Dependiendo de si la medición se realiza con uno o dos espejos giratorios se tendrá dos procesos de alineamiento diferentes. El alineamiento de las ópticas para mediciones con un espejo giratorio es el siguiente:

1. Colocar la regla paralela a la línea de medición y apoyada en esta la base de planitud con el reflector angular.
2. Colocar el interferómetro angular con el espejo giratorio a 8 mm del inicio del recorrido y apoyado sobre la regla como en la figura AI.115.

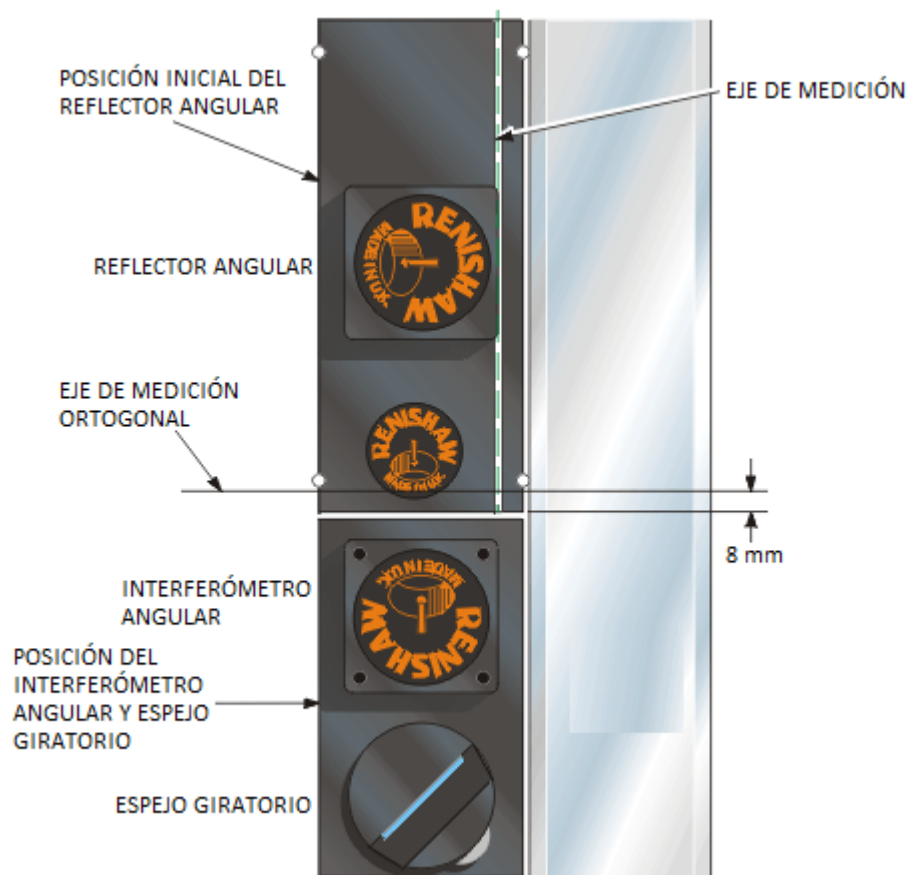


Figura AI. 115 Montaje interferómetro y reflector angular

3. Girar el obturador del láser para obtener un haz reducido.
4. Girar el espejo giratorio para orientarlo correctamente.
5. Mover el cabezal del láser para que el rayo láser incida sobre el espejo giratorio como se indica en la figura AI.116. Las marcas sobre la abertura óptica del espejo giratorio ayudan a centrar el haz en la posición deseada.



Figura AI. 116 Haz de láser sobre espejo giratorio

6. Mover la base de planitud con el reflector angular hasta colocarlo en la posición más alejada de su recorrido.
7. Ajustar el espejo giratorio para que el haz pase por el interferómetro angular y llegue al reflector angular.
8. Inclinar, si fuera necesario, el espejo giratorio para que el rayo láser incida a la altura correcta

sobre el reflector angular. Se hará uso de un objetivo montado en el reflector angular como en la figura AI.117.

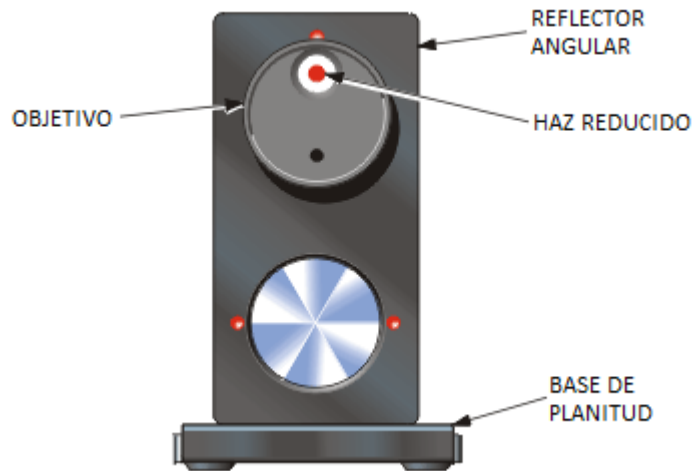


Figura AI. 117 Ajuste del reflector angular

9. Inclinarse, si fuera necesario, el espejo giratorio para ajustar la altura del haz de retorno para que incida sobre el objetivo en el obturador. También se puede ajustar el haz de retorno girando el espejo giratorio para que incida en el centro del objetivo.
10. Mover el reflector angular lo más próximo posible al interferómetro angular como en la figura AI.118.

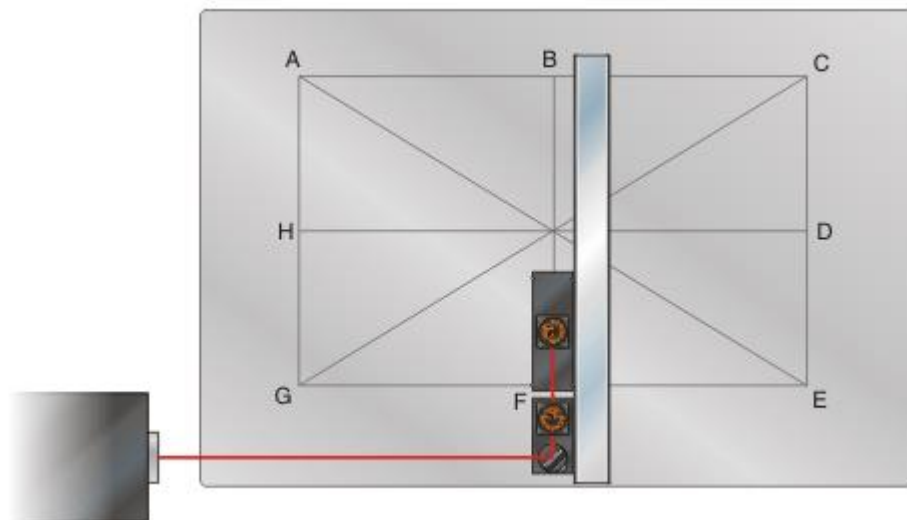


Figura AI. 118 Colocación reflector angular con respecto al interferómetro angular

11. Si fuese necesario, ajustar horizontal o verticalmente el cabezal láser para que el haz de retorno incida en el objetivo del obturador.
12. Repetir los pasos 6 hasta 11 para conseguir que el haz de retorno incida en el objetivo durante todo el recorrido.
13. Girar el obturador para conseguir un haz normal. Comprobar que durante todo el recorrido se obtiene una intensidad de señal aceptable.

Cuando se realicen mediciones con dos espejos giratorios se procederá con el siguiente alineamiento:

1. Colocar la regla paralela a la línea a medir y junto a esta el reflector angular con la base de planitud. El reflector de rectitud debe de estar en la posición más cercana, es decir su

posición inicial.

- Colocar el interferómetro con el espejo giratorio junto a la regla y a una distancia de 8 mm de la posición inicial como en la figura AI.119.

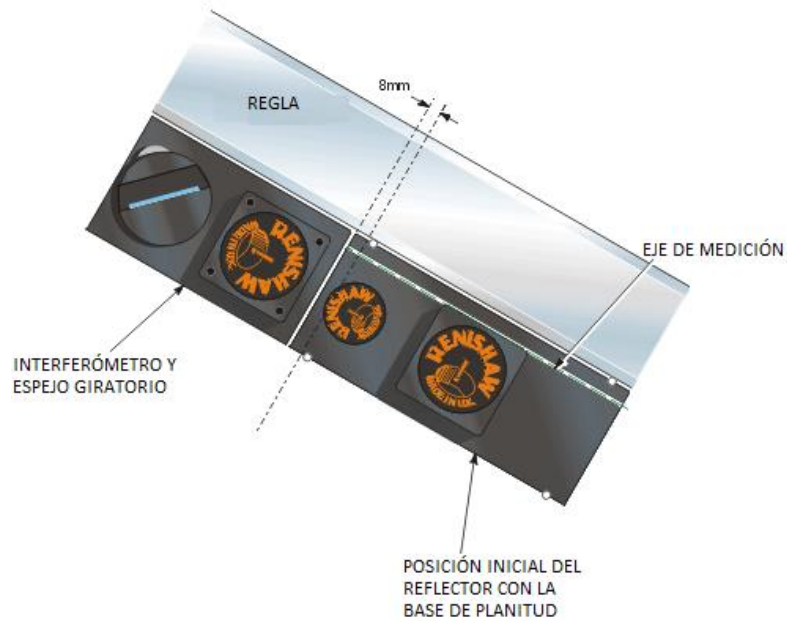


Figura AI. 119 Montaje interferómetro y reflector angular

- Girar el obturador del láser para obtener un haz de láser reducido.
- Colocar el otro espejo giratorio delante del láser y orientar ambos espejos como se muestra en la figura AI.120.

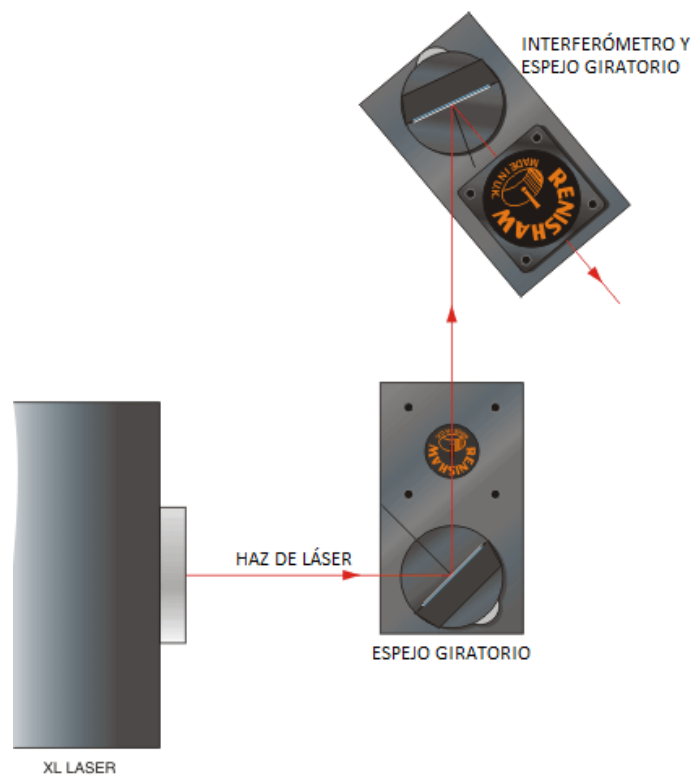


Figura AI. 120 Montaje espejos giratorios

- Ajustar el cabezal láser o el trípode para que el haz de láser incida en la posición correcta como en la figura AI.121.



Figura AI. 121 Haz de láser sobre espejo giratorio

6. Mover o girar el espejo giratorio próximo al láser para que el haz de láser incida de la manera correcta en el otro espejo giratorio.
7. Trasladar el reflector angular a la posición más alejada.
8. Girar el espejo giratorio, próximo al interferómetro angular, para que el haz de láser pase por el interferómetro angular y llegue al reflector angular.
9. Inclinar el espejo giratorio, próximo al interferómetro angular, para que el haz incida en la altura correcta sobre el reflector angular. Se puede utilizar un objetivo instalado sobre el reflector angular, como en la figura AI.122, para que su alineación sea más fácil.

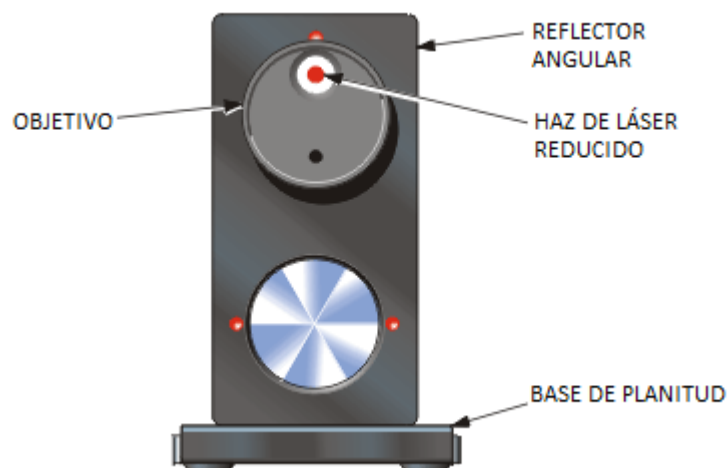


Figura AI. 122 Ajuste interferómetro angular

10. Quitar el objetivo del reflector angular y comprobar que el haz de retorno incide sobre el objetivo en el obturador.
11. Girar o inclinar el espejo giratorio, próximo al interferómetro láser, para que el haz de retorno incida en el centro del objetivo del obturador como en la figura AI.123.



Figura AI. 123 Haz de láser sobre el obturador del cabezal láser


12. Trasladar el reflector angular a la posición más cercana con el interferómetro angular.
13. Mover ligeramente el láser horizontal o verticalmente para hacer coincidir el haz de retorno

en el centro del objetivo del obturador.

14. Repetir los pasos 7 hasta 13 para conseguir un haz correctamente alineado en el objetivo del obturador.
15. Girar el obturador del láser para conseguir un haz normal.
16. Comprobar que existe una intensidad de señal constante a lo largo de toda la línea de medición.

Alineadas las ópticas que van a participar se procede a definir los datos del ensayo en el software de Renishaw. En la barra de herramientas se puede elegir el método que se ha elegido para llevar a cabo el ensayo: Moody o Cuadrícula. A continuación, se abre una ventana donde se debe de elegir el tamaño de la base de planitud. Después se pasa a otra ventana donde se define diferentes datos geométricos del ensayo: tamaño de la mesa, puntos a medir, colocación del cabezal láser. Para el método Moody se tiene la opción de elegir una elección aleatoria de los objetivos o puntos de medición. Para el método cuadrícula se puede elegir el número de líneas que se van a medir y el número de mediciones sobre esta. Además, para el método cuadrícula se debe de definir un plano de referencia, para el cual se tiene una opción donde se introducirá la posición de unos puntos de referencia y su altura.

Un aspecto importante para comprobar antes de comenzar con la toma de datos es el criterio de signos. Para ello se alzaré la parte delantera de la base de planitud, que contiene el reflector angular, y se comprueba en el software que marca un desplazamiento positivo. En caso contrario

pulsar el botón , situado en la barra de herramientas de la ventana principal del software para cambiar el criterio de signos.

Con los datos guardados se procede al análisis de estos. Dependiendo del método elegido se visualizará una representación diferente de los datos adquiridos en el ensayo. Además de la ventana con la gráfica de los puntos, se tiene una ventana auxiliar donde se puede seleccionar una línea de medición la cual se resaltará sobre la gráfica y dará el error de planitud de esta. Entre los datos que proporciona este análisis se encuentra el error de cierre. Este error hace referencia al incorrecto cierre del perímetro de medición de la mesa. Un error de cierre aceptable debe de estar por debajo de $2.5 \mu\text{m}$.

A.6.9 Prueba trayectoria circular generadas por dos o tres ejes lineales

Para este ensayo se precisa de dos ejes lineales, lo cuales describirán una trayectoria circular en el plano que sea necesario (XY, XZ o YZ). Dependiendo de las especificaciones técnicas de la máquina que se vaya a medir se realizará una trayectoria circular completa o parcial. Se utiliza el Ball-bar de Renishaw para realizar este tipo de ensayo y además obtener un análisis de los datos capturados. El kit del Ball-bar de Renishaw se compone de los siguientes elementos:

- Ball-bar QC20-W
- Batería
- Soportes de montaje para el husillo y la mesa
- Extensiones (50 mm, 150 mm y 300 mm)
- Calibrador.

En la figura AI.124 se puede ver un montaje típico de este elemento para realizar un ensayo de trayectoria circular.

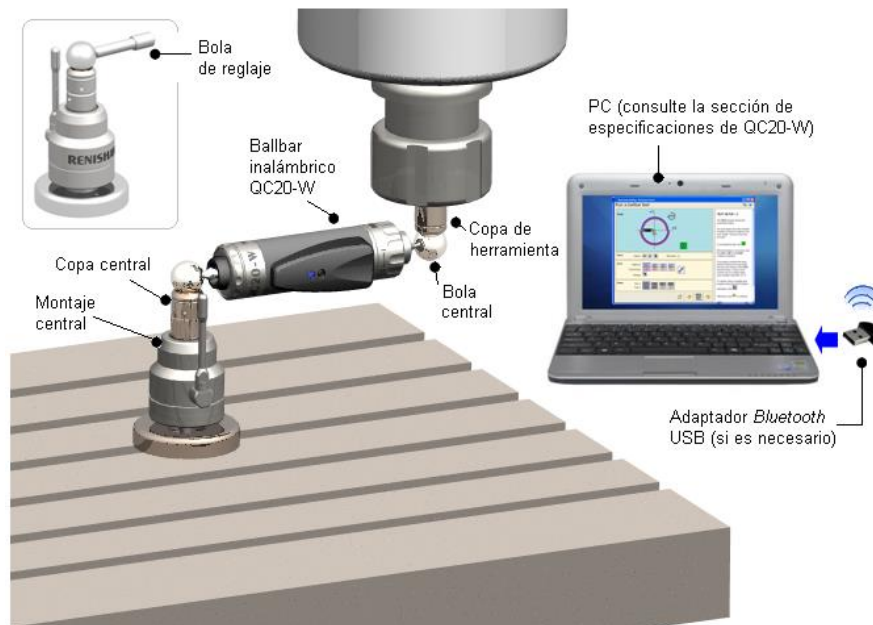


Figura AI. 124 Prueba circular con Ball-bar

El componente principal de este dispositivo es el transductor, que se encarga de realizar la toma de datos en el proceso de medición. El transductor posee dos esferas en sus extremos: una esfera se fijará al componente de amarre de la maquina y el otro extremo al portaherramientas. La figura AI.125 muestra un esquema de las partes del transductor. El transductor cuenta con una luz led que muestra el estado de este. En la tabla A.1 se pueden ver los distintos estados con su luz correspondiente para su correcta identificación.



Figura AI. 125 Ball-bar

Tabla 5. Estado de luz led del Ball-Bar

Luz del LED	Estado
Verde Fijo	Encendido, la comunicación no se ha establecido

Azul fijo	Comunicación establecida
Azul intermitente	Transferencia de datos
Verde intermitente lento	Ahorro de energía
Ámbar intermitente	Batería baja
Rojo intermitente	Error, consultar con una oficina de Renishaw en su país

A continuación, se describe el proceso de instalación de los montajes sobre los que se apoyaran las esferas del transductor:

1. Se coloca la copa magnética en un soporte de herramientas como en la figura AI.126. En los ensayos de arco parcial o volumétricos se puede utilizar una extensión que se instalará en el soporte de herramientas y sobre este la copa magnética. Este componente hace que no se produzcan choques entre el Ball-bar y el husillo.

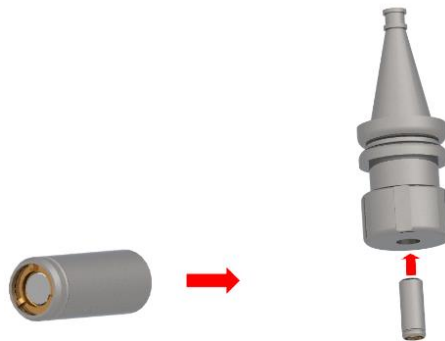


Figura AI. 126 Montaje copa magnética

2. Ambos elementos se instalan en el husillo de la máquina herramienta como en la figura AI.127.



Figura AI. 127 Montaje copa magnética sobre husillo

3. Mover el husillo hasta la posición del montaje central. El husillo debe quedar 80 mm por encima de este montaje.
4. Colocar el montaje central en una posición adecuada en la mesa de la máquina herramienta.
5. Colocar la bola de reglaje sobre la copa del montaje central. Mover la palanca para que la bola de reglaje y la copa descendan como en la figura AI.128.



Figura AI. 128 Montaje bola de reglaje y copa del montaje central

6. Mover el montaje central para alinearlos con el husillo.
7. Bajar el husillo hasta colocarlo a 2 mm de la bola de reglaje.
8. Levantar la bola de reglaje para ajustarlo con el husillo.
9. Apretar el mecanismo de sujeción en el montaje central para sujetar la junta de la bola.
10. Definir esta posición como la posición central de giro.
11. Mover el husillo para colocarlo lejos de la trayectoria de medición.
12. Quitar la bola de reglaje del montaje central y colocar el husillo en la posición inicial de medición.

Hay que destacar que para ciertos ensayos se tiene que realizar un calibrado del transductor. En concreto para los ensayos en los que se midan desviaciones radiales el transductor tiene que pasar un paso intermedio de calibración con el dispositivo que viene en el kit. En la figura AI.129 se puede ver una foto de este calibrador. Primero se debe de añadir el calibrador en el software con sus respectivas especificaciones según indique su certificado de calibración, incluido en el kit Ball-Bar QC20-W. Después en las pantallas de configuración de ensayo se debe de incluir el coeficiente de expansión de este. Con todo esto ya se podrá realizar la calibración del transductor antes de la toma de datos.

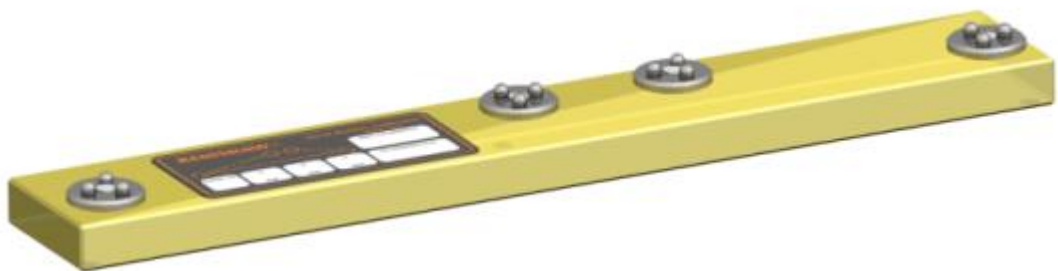


Figura AI. 129 Calibrador

Cuando se tiene todos los componentes instalados se procede a definir los parámetros del ensayo en el software. Dependiendo del modo que se elija se podrá seleccionar un ensayo estándar definido o crear el tuyo personalizado. Solo en el modo avanzado es donde se puede crear o modificar ensayos. Se tiene las siguientes ventanas de configuración donde el operario podrá definir su ensayo como se requiera:

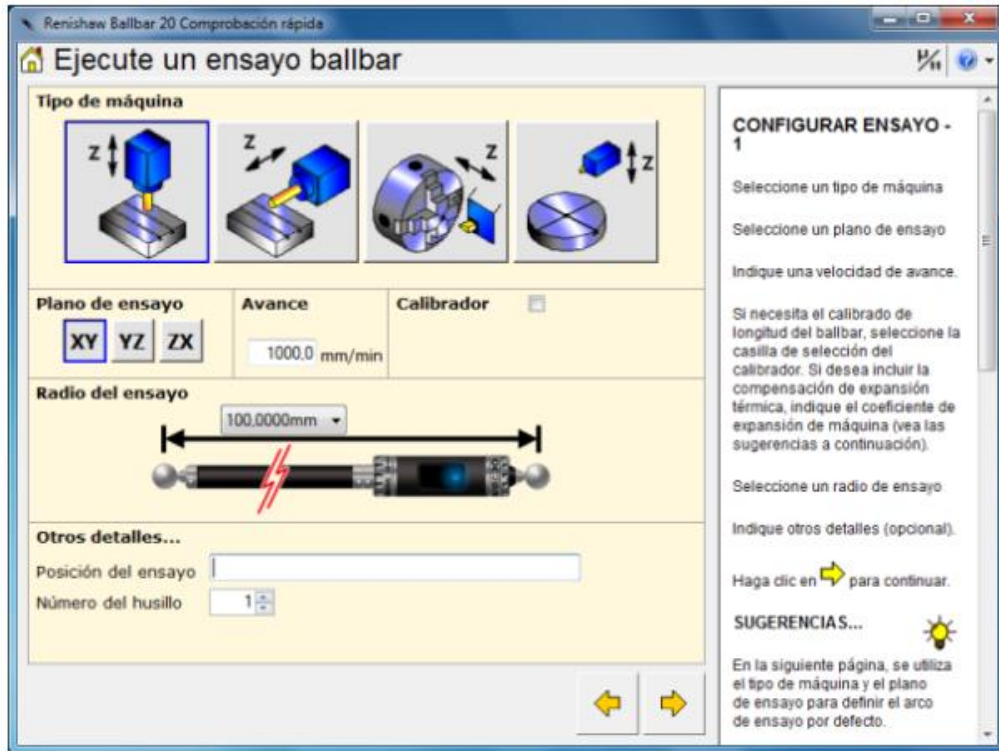


Figura AI. 130 Ventana configuración de ensayo

En esta primera pantalla de configuración, figura AI.130, se tiene unos campos obligatorios como: tipo de máquina, plano en el que se va a realizar el ensayo, velocidad de avance, radio de ensayo. Además de estas opciones también se tiene el apartado posición del ensayo para poder definir la posición de los ejes, número de husillos para indicar si se tiene varios husillos y calibrador por si se quiere realizar un ensayo calibrado.

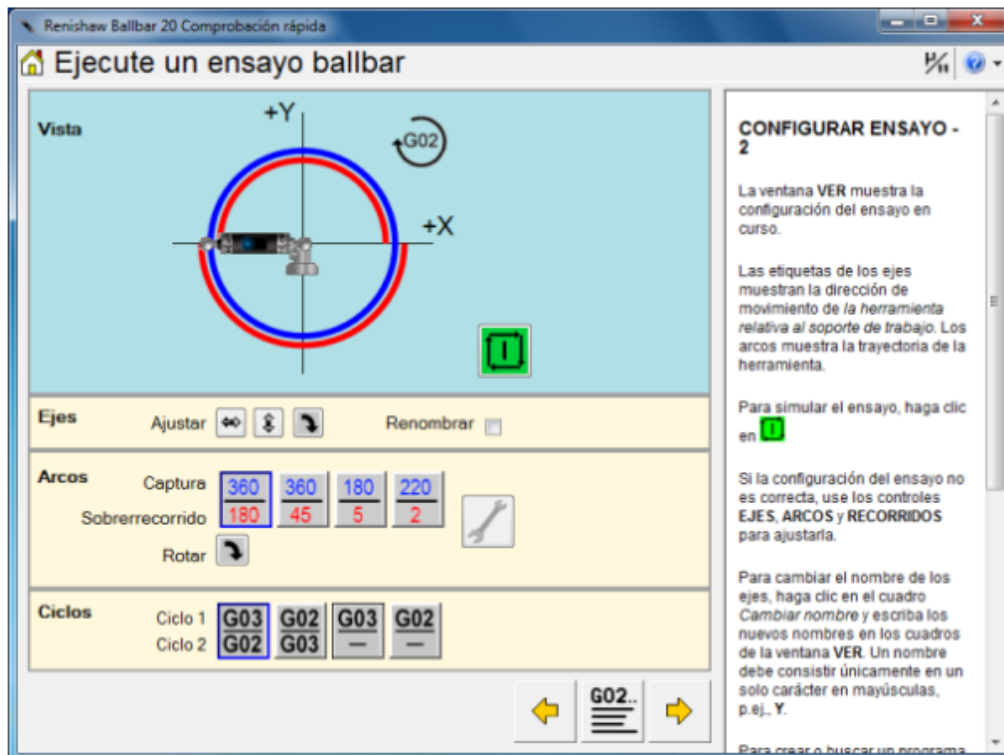


Figura AI. 131 Ventana configuración de ensayo

En la siguiente ventana, figura AI.131, se define los aspectos propios de la trayectoria del ensayo. En la

opción Ejes se puede modificar los ejes definidos para que coincidan con los ejes de la máquina. Se puede redefinir el punto inicial y el nombre de los ejes. En la opción Arcos permite seleccionar el arco a realizar para la toma de datos y su correspondiente sobrecorrido. Por último, en Ciclos se puede determinar la manera en la que se va a recorrer la trayectoria definida anteriormente (en sentido de las agujas del reloj o contrario). En la parte superior aparece una parte donde se puede visualizar los ejes del ensayo y el recorrido que va a realizar el transductor.

En esta ventana se puede seleccionar la opción del generador de programas automáticos. Se abre una ventana a parte donde se comprueba que los datos del ensayo son correctos y se pulsa la flecha para crear el programa.

En la última ventana de configuración se puede comprobar la conexión del Ball-bar con el PC y seleccionar el tipo de dispositivo a utilizar (QC10 o QC20-W). En la parte inferior aparece como se debe de colocar el transductor en el calibrador, cuando corresponda, para proceder con su calibración. Finalizada la calibración se procede a la captura de los datos.

Con los datos obtenidos se procede a realizar el análisis de los datos. El software presenta un gráfico con la trayectoria circular realizada. Con la ayuda del software donde viene todos los posibles trazados con sus posibles errores explicados, se puede obtener la posible fuente de errores.

Los ensayos realizados con el Ball-bar son cortos y fáciles de ejecutar por ello se suelen realizar con más periodicidad. Además, aportan mucha información acerca de los posibles errores para luego realizar un ensayo más específico para cuantificar un error en concreto. Antes de realizar cualquier ensayo específico se suele hacer una comprobación inicial, con el Ball-bar, para evaluar el estado de la máquina.

A.6.10 Toma de datos

La toma de datos se puede realizar mediante el software de Renishaw o manualmente mediante una hoja de trabajo. Todos los dispositivos de Renishaw utilizarán este software para realizar la toma de datos y los demás se anotarán en una hoja de trabajo. En este punto se expone la manera de configurar el software de Renishaw para empezar con la toma de datos según las características del ensayo, así como un ejemplo de hoja de trabajo en el caso en el que sea el operador el encargado de realizar la toma de datos.

A.6.10.1 Software Renishaw del Laser XL-80

Una vez realizados el montaje y los correspondientes ajustes para su correcto funcionamiento se procede a describir el inicio y configuración del software anterior a la toma de datos. El software de Renishaw trae dentro un manual de ayuda, el programa de análisis de los datos y los distintos programas dependiendo de la medición que se realice. Todos ellos tienen la misma pantalla de inicio salvo pequeñas diferencias propias de cada ensayo.

1. Abrir el programa correspondiente dependiendo de la medición a realizar.
2. Aparece una ventana de inicio la cual se divide en varias secciones como se puede ver en la figura AI.132. Esta ventana ofrece información acerca de las mediciones reales del láser, su estado o las condiciones ambientales que se encuentra.

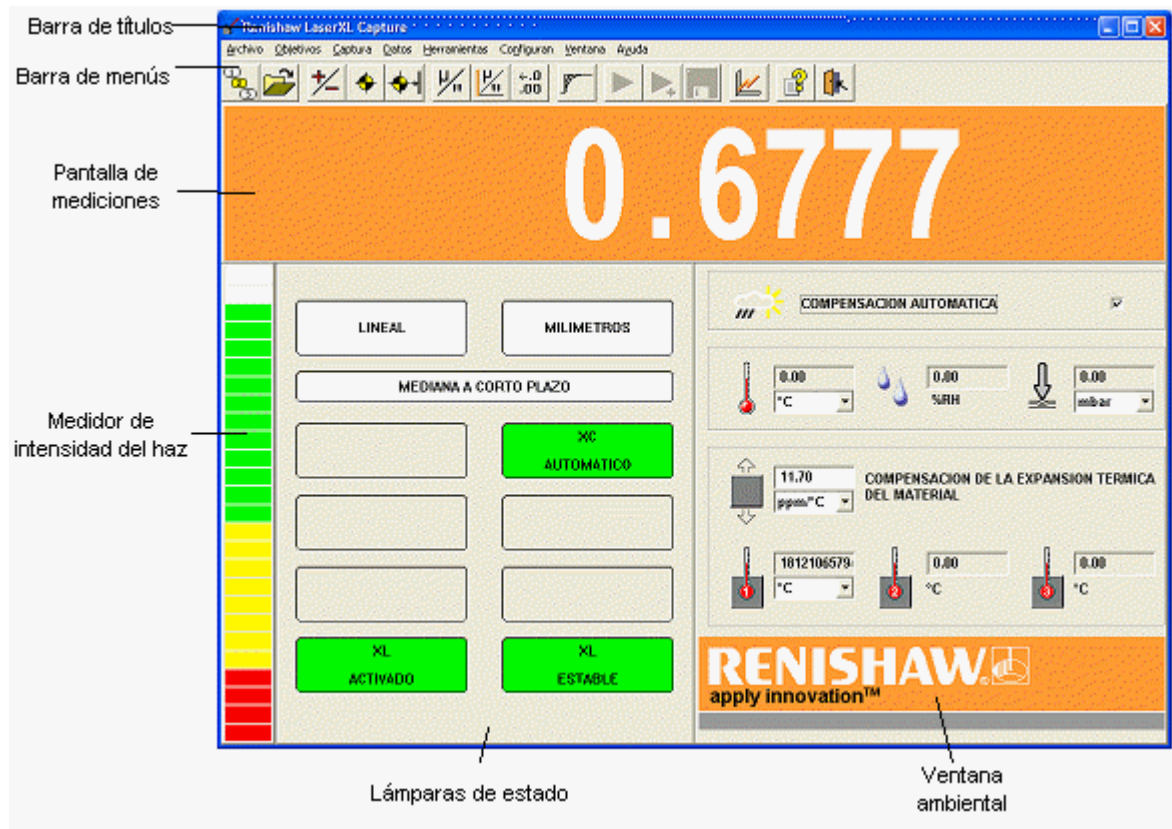


Figura AI. 132 Ventana principal de ensayo


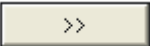
3. Para empezar a fijar las características del ensayo se pulsa el botón , ubicado en la barra de menús en la parte superior de la ventana de inicio. Se abre la primera ventana de configuración, figura AI.133. En esta ventana se define el objetivo inicial, final, el tamaño del intervalo, el número de intervalos que se desee y el número de decimales que se necesite. Cuando se rellena el tamaño del intervalo o el número de objetivos el otro se calcula automáticamente.



Figura AI. 133 Ventana configuración de ensayo 1

4. Pulsar el botón , ubicado en la parte inferior, para continuar con la configuración de los parámetros del ensayo. En la ventana Inicialización de la Captura, figura AI.134, se puede definir el número de ejecuciones, si se trata de una medición unidireccional o bidireccional y la secuencia del objetivo. También se puede fijar una banda de error según interese.

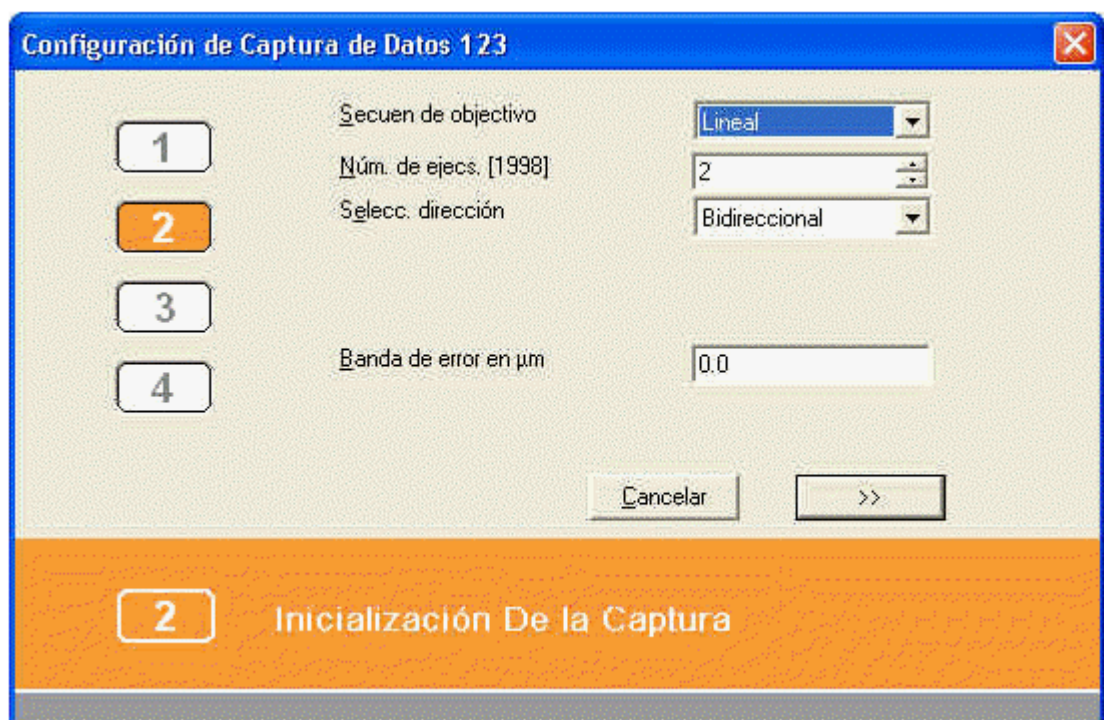


Figura AI. 134 Ventana configuración de ensayo 2

Dependiendo de la medición en esta ventana también aparece una casilla para rellenar el eje de desplazamiento sobre el que se refiere el ensayo.

La secuencia del objetivo se refiere al camino que seguirá la máquina para llegar a las posiciones objetivos. El software de Renishaw te da la opción a elegir entre tres opciones: lineal, peregrinación y péndulo.

En la secuencia lineal bidireccional la maquina se dirige al objetivo por turnos, por lo que a un mismo objetivo se accedería dos veces por recorrido, una por cada dirección. La figura AI.135 muestra un claro ejemplo de este caso. El esquema de movimiento para el caso de recorrido unidireccional sería igual, pero se alcanzaría el objetivo solo en una dirección.

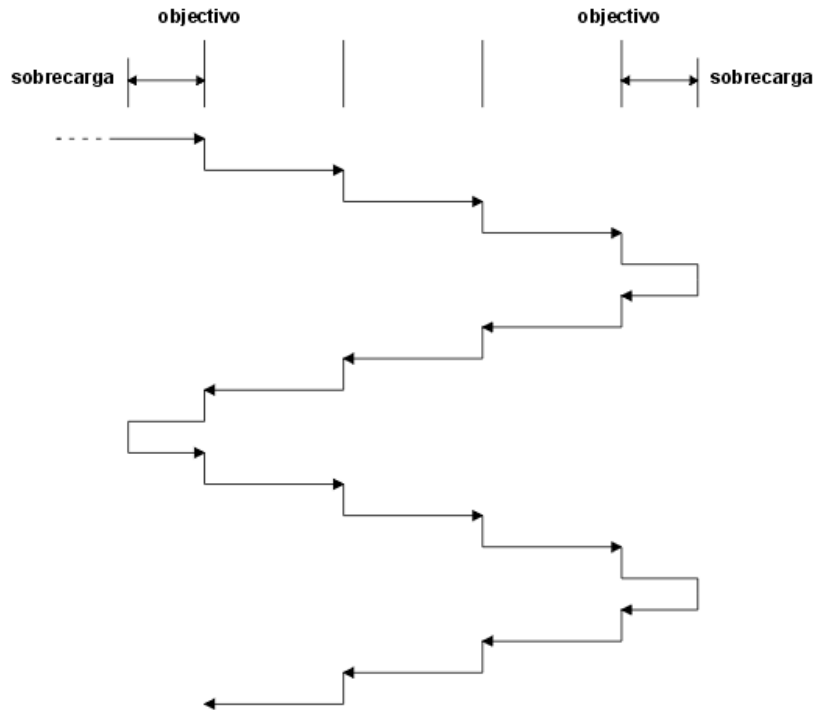


Figura AI. 135 Secuencia lineal bidireccional

La secuencia de peregrinación bidireccional se realiza por parejas de objetivos. Esto quiere decir que solo pasa al siguiente objetivo cuando ha completado las mediciones en una dirección. A continuación, procedería a alcanzar el objetivo desde la otra dirección para el objetivo antiguo y además aprovecharía para alcanzar el nuevo objetivo en la nueva dirección. En la figura AI.136 se puede ver un esquema de este recorrido. Para el caso unidireccional alcanzaría a un objetivo el número de recorridos que se le requiera antes de pasar al siguiente.

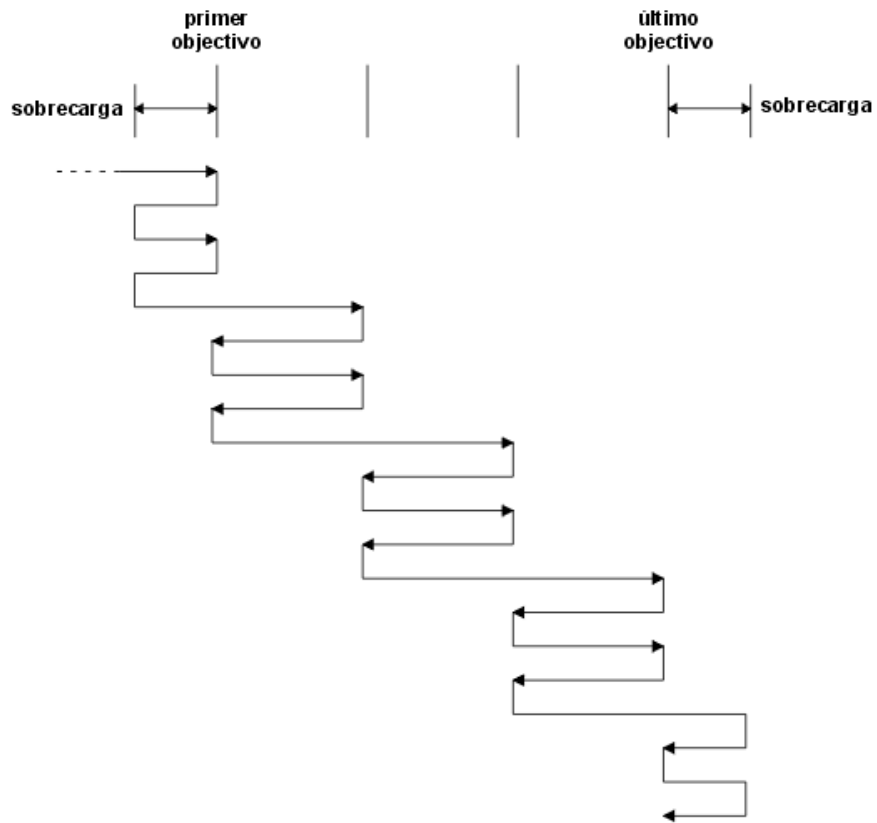


Figura AI. 136 Secuencia de peregrinación bidireccional

Para la secuencia de péndulo bidireccional la maquina completaría el número de recorridos que se le requiera antes de pasar al siguiente objetivo. En este caso existe un sobre recorrido para cada objetivo en las dos direcciones. Este sobre recorrido es una distancia definida que la maquina tiene que recorrer para volver al punto objetivo. En la figura AI.137 se puede ver un ejemplo de este recorrido. Para el caso unidireccional sería parecido salvo que se acercaría al objetivo solo por una dirección.

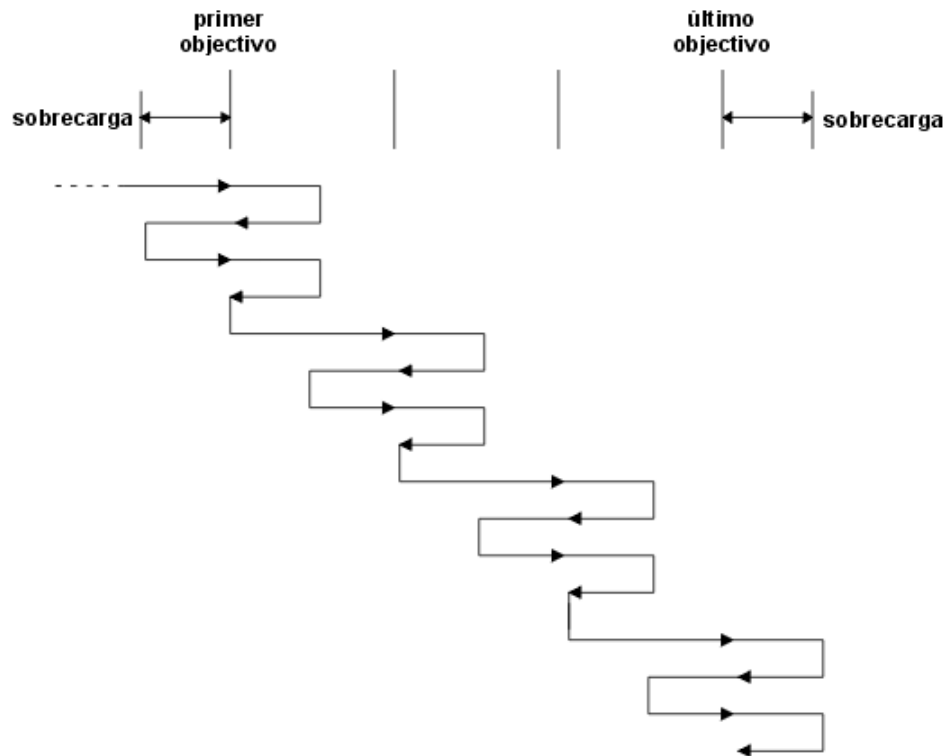


Figura AI. 137 Secuencia de péndulo bidireccional

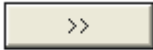
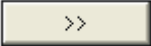
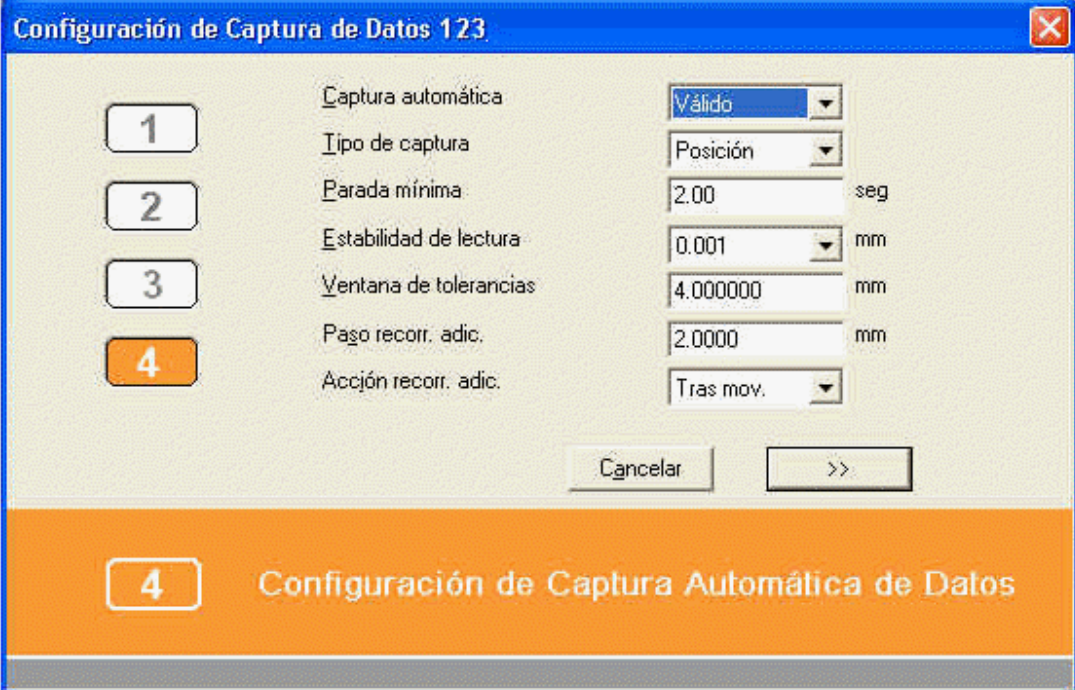
5. Pulsar el botón , para acceder a la siguiente ventana de configuración. Se abre la ventana Información del título, figura AI.138, en la cual se puede definir diferentes características del ensayo (nombre de la máquina, serial, fecha, etc.) para que luego se pueda identificar fácilmente.

Figura AI. 138 Ventana configuración de ensayo 3

6. Pulsar el botón , para ir a la ventana de “configuración de captura automática de datos”, figura AI.139. Aquí es donde se define la manera en la que va a tomar los datos el laser (automática o manual, parada mínima que se hace en la captura de la medición, etc.).



Configuración de Captura de Datos 123

1	Captura automática	Válido
2	Tipo de captura	Posición
3	Parada mínima	2.00 seg
4	Estabilidad de lectura	0.001 mm
	Ventana de tolerancias	4.000000 mm
	Paso recorr. adic.	2.0000 mm
	Acción recorr. adic.	Tras mov.

Cancelar >>

4 Configuración de Captura Automática de Datos

Figura AI. 139 Ventana configuración de ensayo 4

Esta ventana también variará según el ensayo que se realice ya que puede que se muestre menos opciones que no sean necesarias en determinadas mediciones.

La captura automática o manual se refiere a que el láser se encargue de las lecturas de manera manual o automática. Si se selecciona “captura automática invalido” todas las opciones se bloquean ya que para realizar una lectura se debe pulsar el botón captura en la ventana de inicio o mediante el ratón según es haya configurado. Si por contrario se selecciona la opción automática se activan todos los campos para poder definir la manera en que realice la toma de datos y sea lo más exacta posible.

En el campo Tipo de captura se tiene dos opciones: posición o basada en tiempo. La opción de posición se usa principalmente para los ensayos de precisión de posicionamiento lineal y angular. Se debe a que el láser tomará la lectura de la posición si la máquina se ha detenido y se encuentra en la posición objetivo. La otra opción basada en el tiempo está destinada a mediciones de cabeceo, ladoo o rectilinealidad debido a que aquí no es necesario la posición real de la máquina.

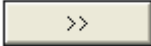
En el campo Tiempo entre lecturas se fija el intervalo de tiempo en el cual el láser debe de tomar las medidas. Este intervalo debe de coincidir con las paradas de la máquina.

En el campo Parada mínima se define el tiempo que pasa entra que el láser detecta que la lectura es estable y está dentro de una cierta tolerancia definida hasta la lectura definitiva. Solo aplicable al método basado en posición.

En el campo Estabilidad de lectura se define un valor de estabilidad para el láser pueda detectar que la maquina se ha parado.

En el campo Paso recorrido adicional se fija la distancia de sobre recorrido para situarse en el primer objetivo de la nueva dirección de desplazamiento. Es importante para eliminar cualquier holgura en el movimiento. Por ello se debe definir el movimiento de la maquina con ese sobre recorrido y así permitir al láser detectar el movimiento y volver a la posición objetivo. Para algunas mediciones este campo se definirá con longitudes y en otros con segundos.

En el campo Acción recorrido adicional se seleccionará la opción de sobre recorrido. Por un lado, se tiene las opciones tras movimiento o tras tiempo en las cuales además debe de definir una longitud o una cantidad de tiempo. Por otro lado, se tiene la opción de tras tecla en la cual el software esperara indefinidamente hasta que el operario pulse una tecla para empezar a tomar datos de nuevo. Tiempo o distancia no definida que tarda la maquina en dar la vuelta para posicionarse en el primer objetivo nuevamente.

7. Pulsar el botón  para que el proceso de toma de datos. El cuadro de dialogo se cierra y el láser empieza a tomar las medidas. Las medidas tomadas por el software se pueden ver en la ventana principal según vaya pasando por cada posición. En la figura AI.140 se puede ver la manera en que se muestran las mediciones.

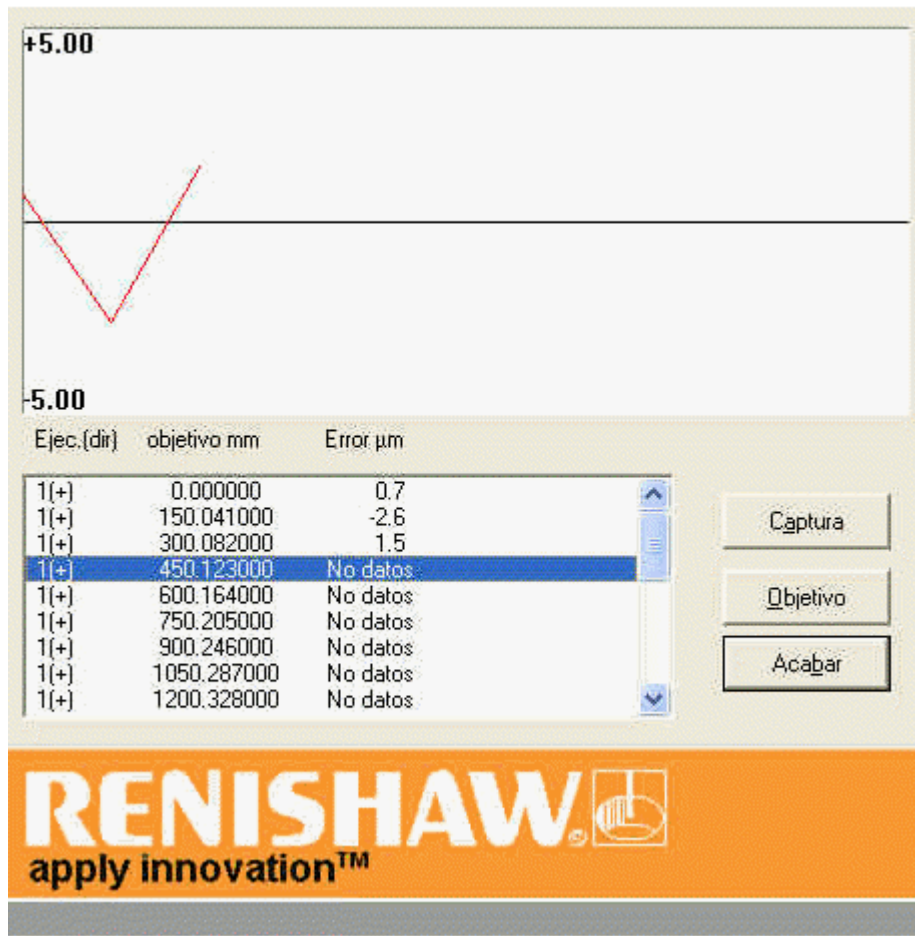



Figura AI. 140 Ventana de resultados

Cuando la maquina haya pasado ya por todas las posiciones y el software haya recabado todas las mediciones, se pulsa el botón acabar para guardarlo en un fichero para su posterior estudio. Para

analizar los datos obtenidos se pulsa el botón , ubicado en la barra de menús. Se abre otra ventana diferente donde se muestra un gráfico con el error de las mediciones obtenidas. En la figura AI.141 se puede ver un ejemplo de una gráfica con sus datos asociados. El software de Renishaw tiene la posibilidad de analizar los datos según diversas normas que tiene incorporado en su base de datos. Para ello solamente se debe seleccionar la norma según la cual se quiera evaluar los datos en la pestaña "Análisis", figura AI.142. Las gráficas que se muestran se pueden modificar para cambiarle la escala, las mediciones, etc. todo ello desde la barra de herramientas. El software de análisis se puede ejecutar sin necesidad de tener abierto el software de toma de datos. Como se ha comentado anteriormente es un programa independiente el cual puede funcionar con ficheros de datos que se hayan guardado con anterioridad.

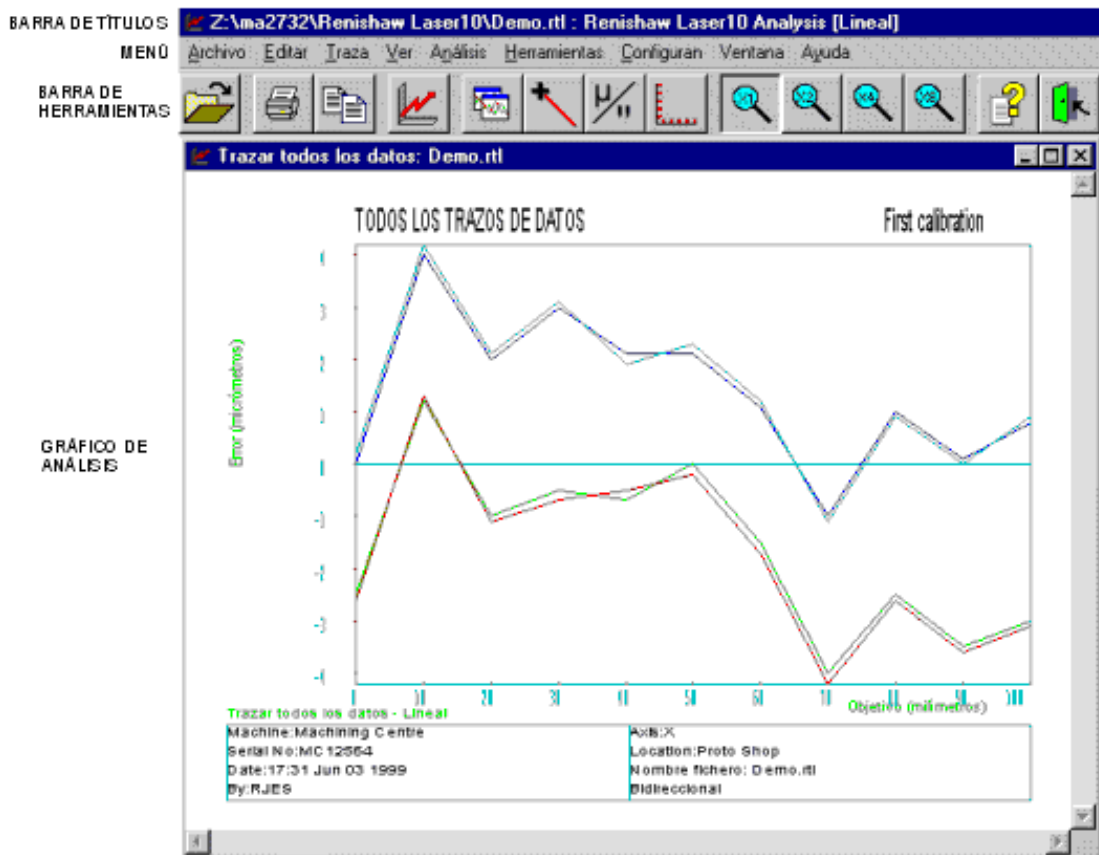


Figura AI. 141 Ventana de gráfico de resultados

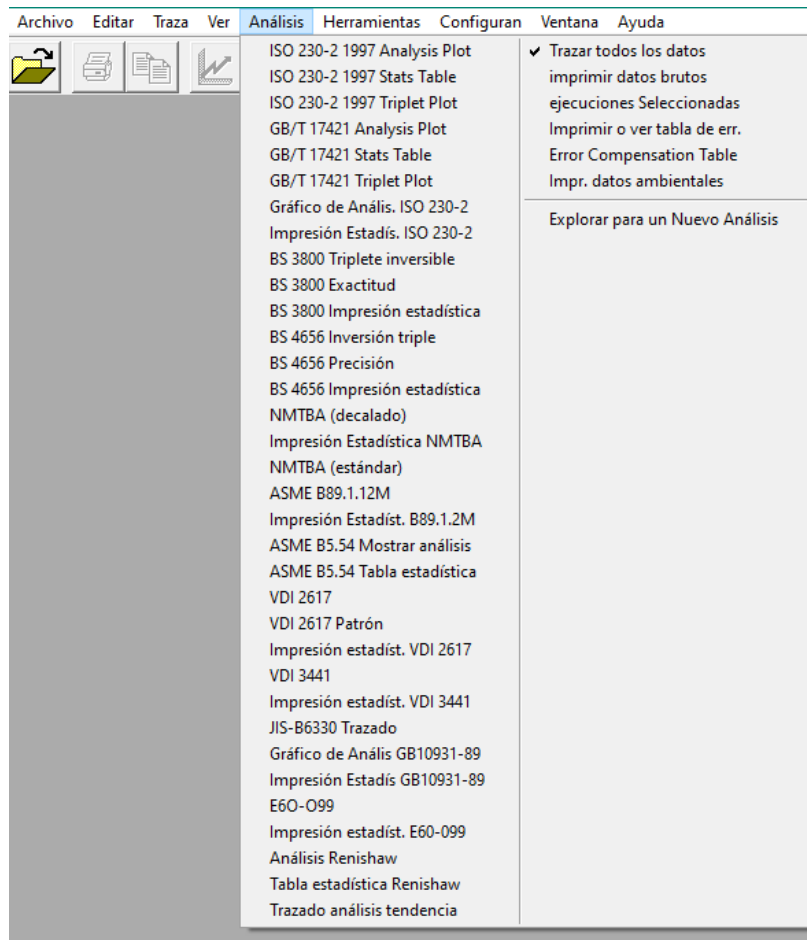


Figura AI. 142 Tipos de análisis

A.6.10.2 Software del Ball-Bar QC20-W

El software del Ball-Bar consta de tres modos de operación y una opción de configuración donde se puede editar los distintos dispositivos de los que se compone el Ball-Bar.

- Comprobación rápida: en este modo se puede definir ensayo, ejecutarlo y analizar los resultados.
- Modo operario: este modo de operación permite realizar ensayos con plantillas guardadas de diferentes máquinas herramientas. Además, los resultados se pueden guardar para su posterior análisis o para que forme parte de un historial para ver el rendimiento a lo largo del tiempo.
- Modo avanzado: se trata del modo más completo y está destinado a operarios con gran experiencia. Se puede hacer lo comentado en los anteriores modos y además se puede crear las plantillas de los ensayos y definir las carpetas donde se almacenas las plantillas y los resultados.

El procedimiento de configuración del correspondiente ensayo con el Ball-Bar pasa por las siguientes ventanas de configuración:

1. Ejecutar cualquier de los tres modos de operación y seleccionar ejecutar una prueba de Ball-Bar. Para los dos modos más avanzados se tendrá la posibilidad de seleccionar una plantilla o ejecutar una comprobación rápida.
2. En la primera ventana de configuración se elige el tipo de máquina que se vaya a usar, el plano del ensayo, la velocidad de avance, si se requiere del calibrador o no, la longitud del ensayo y otros detalles opcionales. En la figura AI.143 se puede ver una captura de esta ventana. Una vez se rellene los datos en cuestión se pulsa la flecha de la derecha, ubicada en la parte inferior de esta ventana, para ir a la siguiente página de configuración.

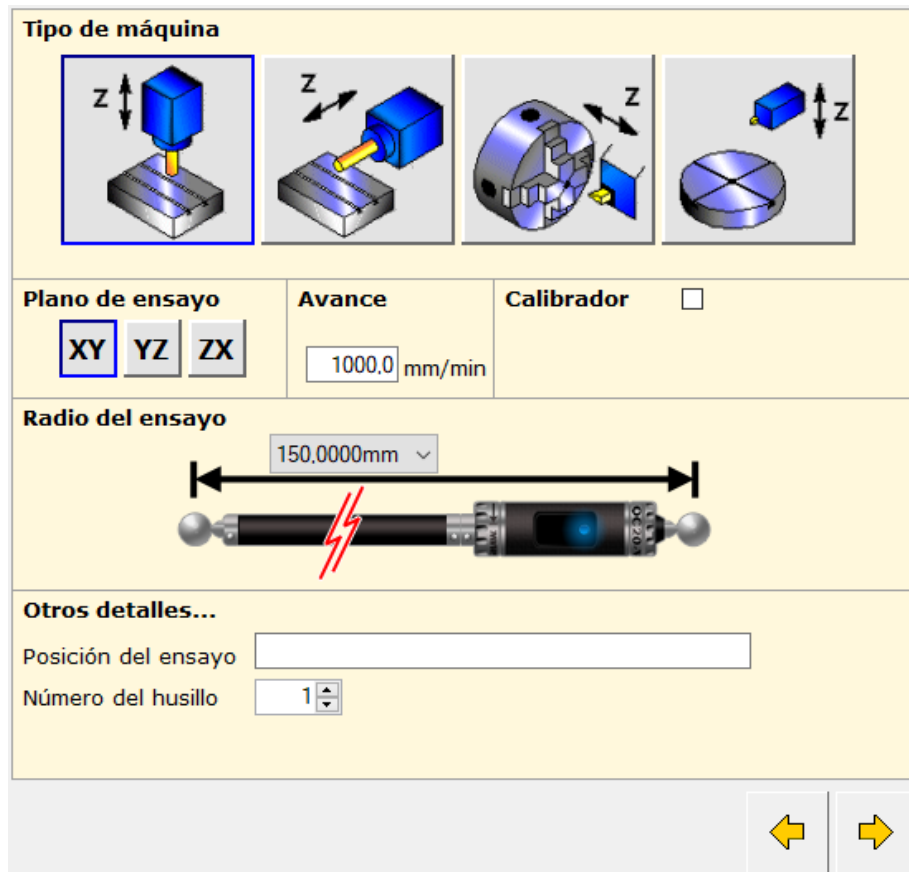


Figura AI. 143 Ventana 1 de configuración

3. En esta ventana se muestra una representación del recorrido del ensayo que se va a realizar. Este esquema se va a ir modificando conforme se cambie las opciones que se encuentran en la parte inferior. Al pulsar el botón verde se tiene una visual de cómo se va a realizar el ensayo. En las siguientes opciones se puede modificar el sentido de los ejes para que coincidan con los de la máquina herramienta, seleccionar el rango de recorrido que se va a realizar y el sobrecorrido asociado. En la parte final se encuentran las opciones que controlan la dirección del ensayo o el número de recorridos. La opción “G02” define la dirección en sentido de las agujas del reloj y “G03” el sentido contrario a las agujas del reloj. Cuando aparece ambas opciones significa que se realiza dos recorridos y cuando solo aparece una se realiza solo un recorrido. En la figura AI.144 se puede ver una captura de esta ventana de configuración.

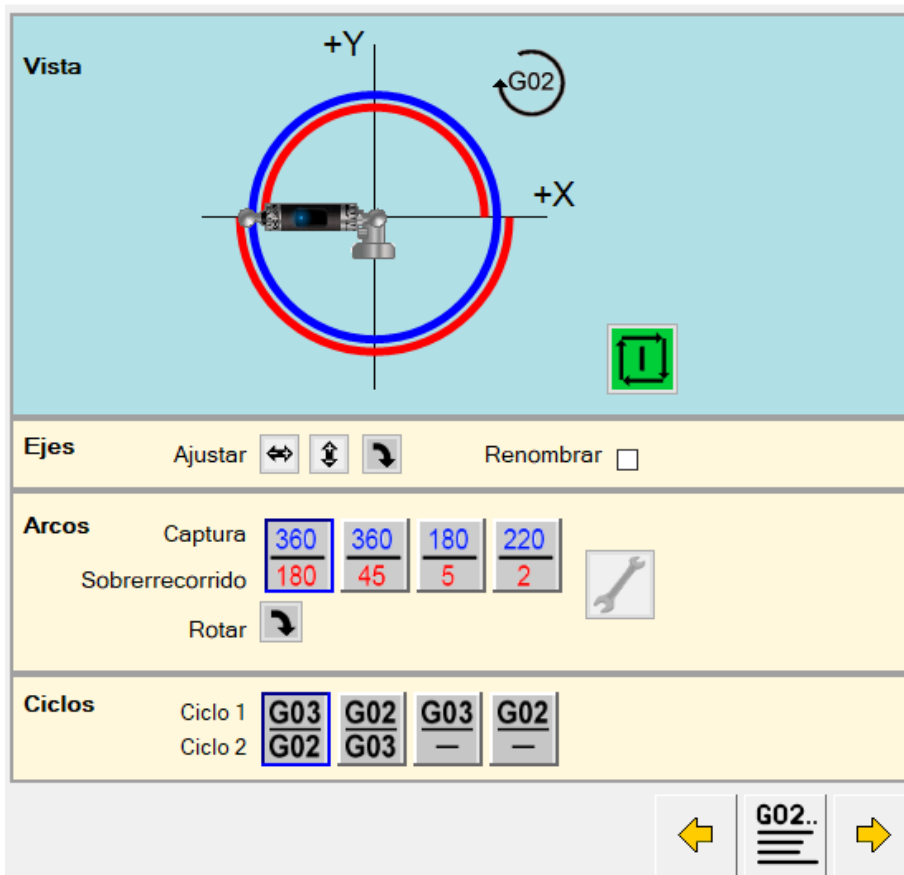


Figura AI. 144 Ventana 2 de configuración

En esta ventana se encuentra también, entre las dos flechas en la parte inferior de la ventana, la opción de crear un programa automático para el ensayo correspondiente. Al pulsar esta opción se abre una ventana como la de la figura AI.145. Solamente se debe de rellenar el campo de ID del programa para darle un nombre y se activa la flecha de la derecha que genera el programa automático.

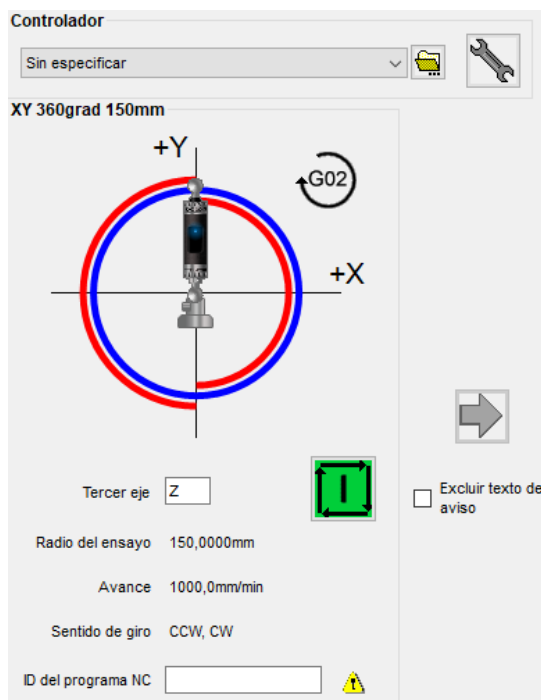


Figura AI. 145 Ventana de generador de programas automáticos

4. La siguiente ventana, figura AI.146, presenta los datos del ensayo y un campo de comentario por si se quiere añadir alguna aclaración.

Resumen **Ensayo**

Resumen del ensayo

Nombre del ensayo XY 360grad 150mm
 ID máquina Chequeo rápido
 Instrumento Ballbar QC10 o QC20-W
 Plano bajo ensayo XY
 Radio 150,0000mm
 Avance 1000,0mm/min
 Posición del ensayo
 Operario Richard

Comentario

← G02.. →

Figura AI. 146 Ventana de resumen del ensayo

5. La última ventana de configuración, figura AI.147, muestra la página de conexión con el dispositivo que se elija. Este software es aplicable tanto al Ball-Bar QC10 como al QC20-W por lo que aquí es donde se debe de elegir el dispositivo que se vaya a utilizar.

Radio
mm
Nominal

+100,8539

Ballbar conectado Port : 8W5710

Detalles del Ballbar

Fabricante	Renishaw
Modelo	QC20-W
Número Serie	8W5710

Fecha de Calibración 2009-10-08
 Número de Certificado 8W5710-091008-0001

← →

Figura AI. 147 Ventana 3 de configuración

En esta pantalla aparece también una parte relacionada con el calibrador cuando corresponda. En concreto se presenta una imagen de como colocar el transductor y un botón para realizar la calibración de este. Cuando haya finalizado aparecerá un mensaje de “Calibrated” y se podrá seleccionar la flecha de la derecha para empezar con el proceso de calibración. En la figura

AI.148 se puede ver las distintas partes mencionadas.

El calibrador Zerodur solo está disponible para 3 longitudes: 50 mm, 150 mm y 300 mm.

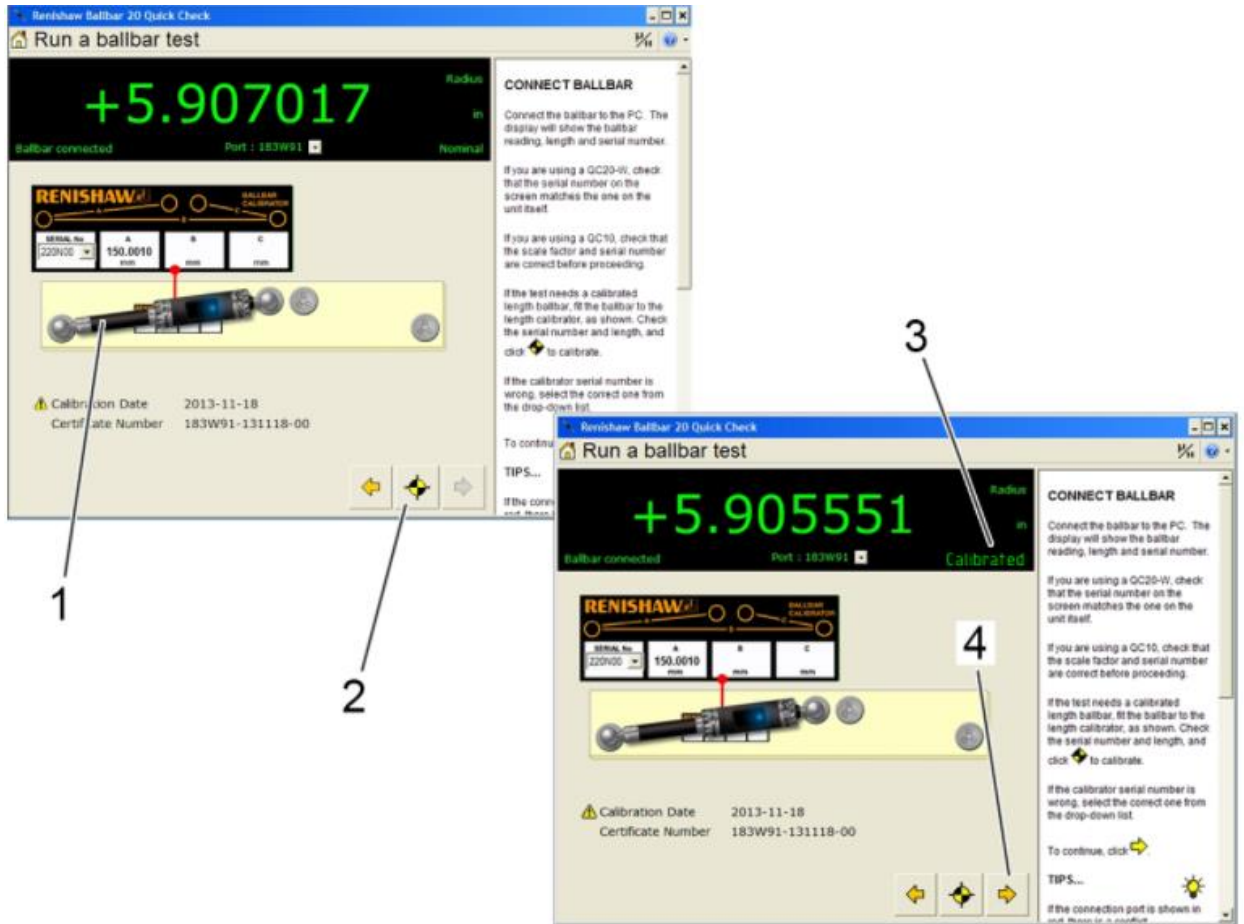


Figura AI. 148 Ventana 3 de configuración con opción de calibración activa

6. Cuando se inicia el proceso de toma de datos, la máquina se mueve a la posición inicial y ahí se detiene hasta colocar el transductor. Una vez se haya colocado correctamente se pulsa el botón verde situado en la esquina inferior derecha de la ventana 3 de configuración, para empezar con la toma de datos. En la figura AI.149 se puede ver esta ventana con el botón mencionado.

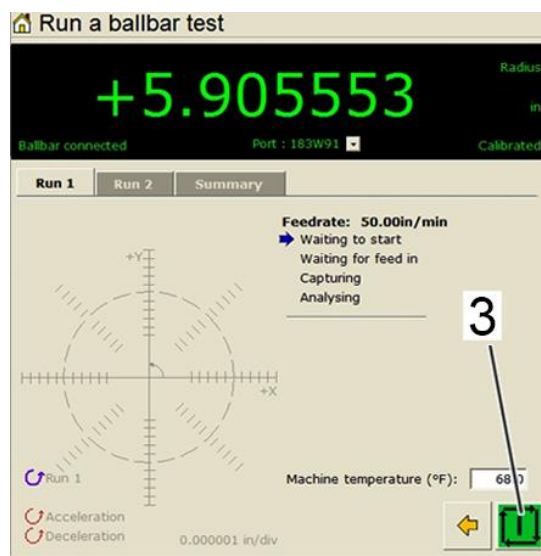


Figura AI. 149 Ventana de configuración anterior a la toma de datos

A.6.10.3 Tabla de toma de datos

Para los dispositivos que no poseen de software para realizar la toma de datos automática se precisa de una hoja de trabajo donde el operario pueda plasmar las desviaciones medidas. Esta tabla de datos debe recoger el valor nominal si se trata de ensayos de posicionamiento. Principalmente debe recogerse todas las desviaciones en los puntos definidos con anterioridad. También se añadirá en la parte final una sección relacionada con el cálculo de incertidumbre para las medidas tomadas. Esta sección puede variar ya que dependiendo del ensayo se pueden requerir otros cálculos.

Tabla 6. Tabla de toma de datos manual

Nominal (mm)			
Nº de medidas	Valor leído	Valor leído	Valor leído
1			
2			
3			
...
<i>i</i>			
\bar{x}_i (mm)			
Δx_i (mm)			
$u(\Delta x_i)$ (μm)			
u_{pi} (μm)			
u_{res} (μm)			
u_T (μm)			
u_i (μm)			
U_i (μm)			

A.7 Modelo de calibración

Una parte fundamental del proceso de medición es la definición del modelo matemático de calibración y de la incertidumbre asociada a esta. Se procede a definir un modelo matemático que represente el resultado final en función de las magnitudes de entrada, que son las mediciones realizadas por cada dispositivo en los ensayos descritos anteriormente. Se ha planteado el modelo de la siguiente manera:

$$L = L_{eq} + C_i \quad (AI. 9)$$

L_{eq} es la lectura del dispositivo

C_i son las correcciones significativas

Las correcciones dependerán de aspectos como la desviación del patrón utilizado, la resolución, la temperatura. Al realizar el estudio sobre estos términos se ha llegado a la conclusión de que no son significativas y solo se tendrán en cuenta para la obtención de la incertidumbre asociada al proceso de medición.

A.8 Cálculo de incertidumbre

Primero se debe determinar las fuentes de incertidumbre cuando se realice el correspondiente procedimiento de medición. Las fuentes de incertidumbre no es algo fijo para cualquier medición, sino que depende de varios factores que intervienen y estos son diferentes para cada proceso. Para los ensayos que se han descrito en el presente documento se tienen las siguientes posibles incertidumbres:

- Incertidumbre por la medida reportada por el dispositivo

$$\bar{x} = \frac{1}{15} \sum_{j=1}^{15} x_j \quad (AI. 10)$$

$$u(\Delta x) = \sqrt{s^2(\bar{x})} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{15} (x_j - \bar{x})^2}{14 \cdot 15}} \quad (AI. 11)$$

x_{ij} es la medición en el punto j

\bar{x} es la media de las mediciones

- Incertidumbre por la resolución del dispositivo

$$u(res) = \frac{res}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (AI. 12)$$

res se refiere a la resolución del dispositivo

- Incertidumbre debido al dispositivo. Este parámetro viene definido en la hoja de calibración del instrumento de medida.

Si la incertidumbre viene dada en μm se utiliza la siguiente ecuación

$$u_{DISPOSITIVO} = \frac{U_{CALIBRACION}}{k} \quad (AI. 13)$$

Si la incertidumbre del dispositivo viene dada en ppm se utiliza la siguiente ecuación

$$u_{DISPOSITIVO} = \frac{U_{CALIBRACION} \cdot l}{k} \quad (AI. 14)$$

$U_{CALIBRACION}$ es la incertidumbre del dispositivo que viene dado en la hora de calibración del dispositivo

k es el factor de cobertura que viene dado en la hora de calibración del dispositivo

l es la longitud del ensayo

- Incertidumbre debido a la desalineación del dispositivo con el eje a medir

$$\Delta L_{DESALINEACIÓN} = l \cdot (1 - \cos\gamma) \cdot 1000 \quad (AI. 15)$$

$$u_{DESALINEACIÓN} = \frac{\Delta L_{DESALINEACIÓN}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (AI. 16)$$

l es la longitud del ensayo

γ es el ángulo de desalineación

- Incertidumbre de la compensación térmica de la máquina herramienta

Por un lado, se tiene la incertidumbre asociada a la medida de la temperatura de la máquina herramienta

$$u_{M,MÁQUINA_HERRAMIENTA} = \alpha \cdot L \cdot u(\theta) \quad (AI. 17)$$

Por otro lado, se tiene la incertidumbre asociada al coeficiente de dilatación térmico

$$u_{E,MÁQUINA_HERRAMIENTA} = \Delta T \cdot L \cdot u(\alpha) \quad (AI. 18)$$

- Incertidumbre de la variación del ambiente. El parámetro principal se obtiene al realizar un ensayo de deriva.

$$u_{EVE} = \frac{E_{VE}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (AI. 19)$$

E_{ve} valor de deriva

- Incertidumbre debido al montaje (solo para mediciones con el láser)

$$\Delta L_{MONTAJE} = \frac{\sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{ÁNGULO}}{1000} \quad (AI. 20)$$

$$u_{MONTAJE} = \frac{\Delta L_{MONTAJE}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (AI. 21)$$

O_{ABBE} es la distancia entre dos posibles líneas de medición

$D_{ÁNGULO}$ es la desviación angular con respecto al eje a ensayar

Con todas las incertidumbres individuales definidas se procede a calcular la incertidumbre combinada, según la ecuación (AI.22), la cual representa el conjunto de todas las incertidumbres. Si se multiplica la incertidumbre combinada por un factor de cobertura 2 se obtiene la incertidumbre expandida que es la que se expone junto con el resultado final.

$$u_{COMBINADA} = \sqrt{u_{\Delta xi}^2 + u_{res}^2 + u_{DISPOSITIVO}^2 + u_T^2 + u_{MONTAJE}^2 + u_{DESALINEACIÓN}^2} \quad (AI. 22)$$

$$U = k \cdot u_{COMBINADA} = 2 \cdot u_{COMBINADA} \quad (AI. 23)$$

Todas estas mediciones se pueden calcular según la siguiente tabla:

Tabla 7. Resumen cálculo de incertidumbre

CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE					
VARIABLE	RANGO	DISTRIBUCION	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD	INCERTIDUMBRE
x_i					U_{xi}
Lres	$\pm res/2$		$res/2\sqrt{3}$		U_{res}
Disp.					U_{disp}

α	$L*(1-\cos\alpha)*1000$		$\Delta L/2\sqrt{3}$		Ualineacion
L			$\alpha*L*u(\theta)$		Ut
ΔT			$\Delta T*L*u(\alpha)$		$U\theta$
Eve			$Eve/2\sqrt{3}$		Ueve
ΔL			$\Delta L/2\sqrt{3}$		Umontaje
					$u = \sqrt{\sum u^2(x_i)}$
					=
					$U = k*u = 2*u$
					=

A.9 Documentación de referencia

Para la elaboración de este procedimiento de calibración se han tenido en cuenta los siguientes documentos:

- A. ISO230-1
- B. ISO230-2
- C. ISO230-4
- D. ISO230-9
- E. GUM
- F. 8636-2

ANEXO II EJEMPLO CALIBRACIÓN

En este Anexo II se procederá a realizar un ejemplo de toma de datos y presentación de resultados según Anexo I, de una máquina herramienta de pórtico móvil tipo Gantry, con las siguientes especificaciones:

Tabla 8. Características máquina Gantry

	EJE X	EJE Y	EJE Z
Carrera	15000 mm	4000 mm	1500 mm
Velocidad de posicionamiento	20000 mm/min	20000 mm/min	15000 mm/min
Velocidad de trabajo	10000 mm/min	10000 mm/min	10000 mm/min

La figura AII.1 muestra un esquema de la estructura de esta máquina herramienta donde se puede ver sus diferentes partes.

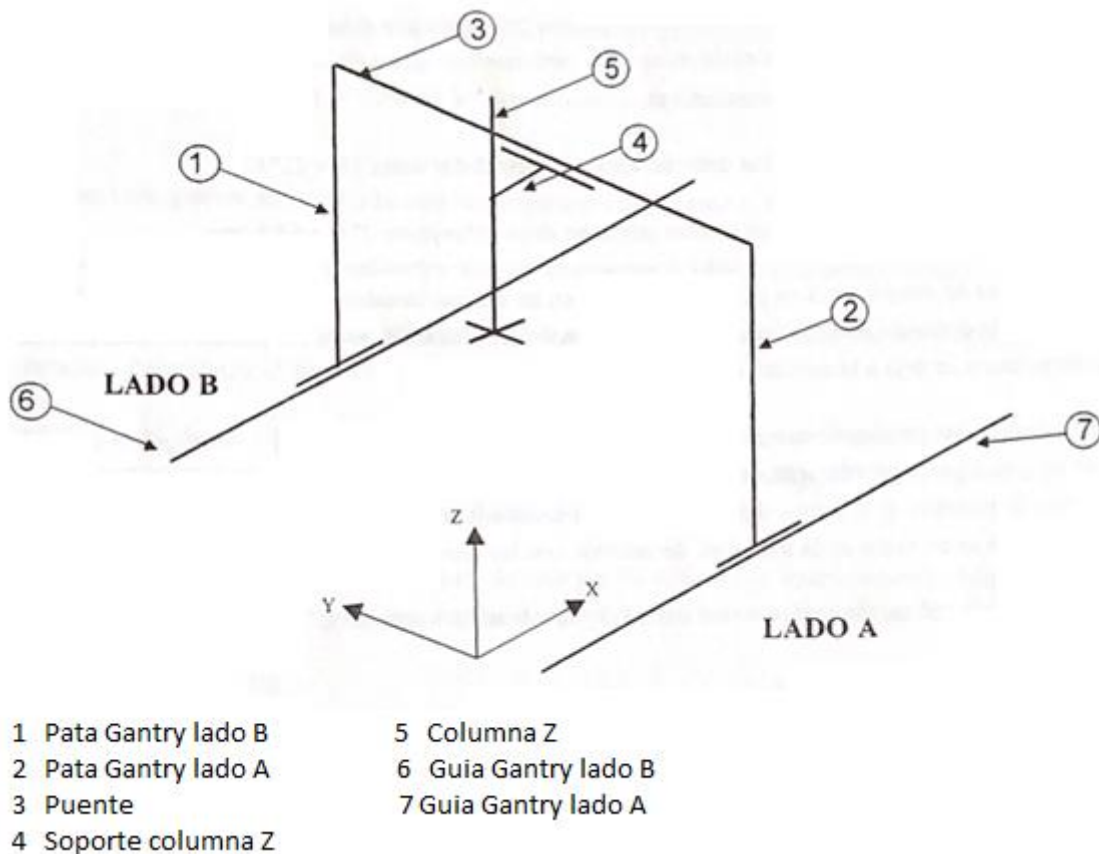


Figura AII. 1 Esquema máquina Gantry

A.1 Ensayo de Rectitud

Para realizar este ensayo se utiliza el láser XL-80 de Renishaw el cual viene provisto con todos sus accesorios de sujeción y espejos para su correcto montaje. A continuación, se realiza el montaje como se

ha descrito en el punto A.6.1 del Anexo I y sus correspondientes alineamientos para su correcto funcionamiento. La figura AII.2 se puede ver un esquema de este montaje para el ensayo de rectitud del eje X en el plano vertical.

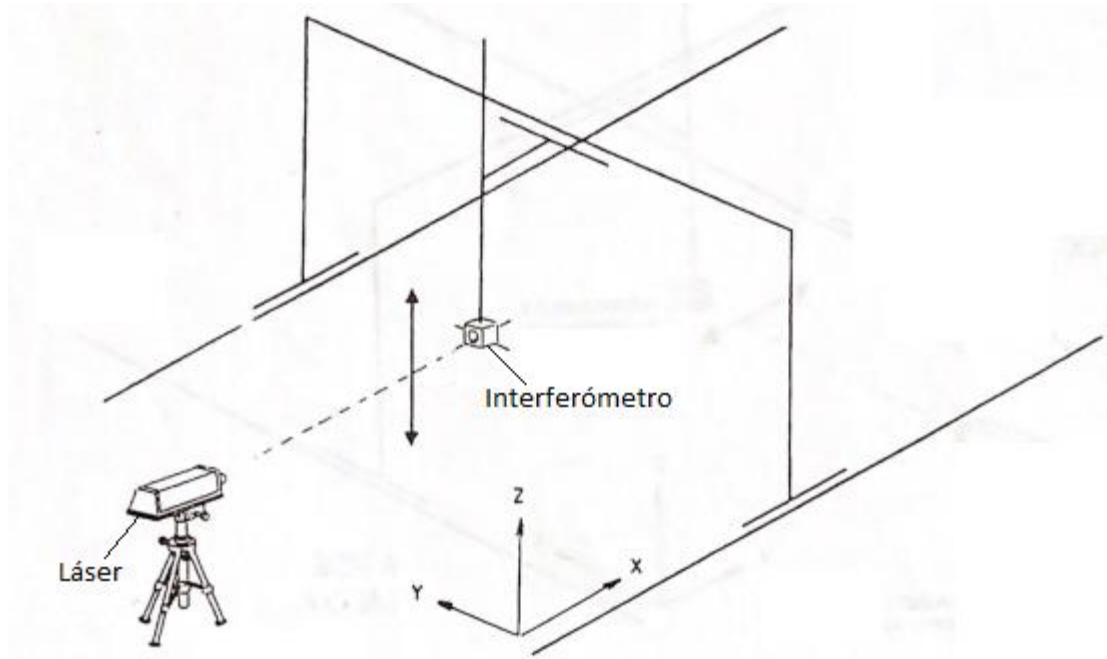


Figura AII. 2 Esquema montaje ensayo de rectitud en plano vertical

Después del proceso de toma de datos se ha obtenido los resultados mediante el programa de análisis del software de Renishaw. Para conseguir un resumen lo más completo de los resultados se ha extraído las mediciones realizadas en cada punto, figura AII.3, y la gráfica de error de rectitud, figura AII.4. En esta última figura se puede ver la evolución del error conforme a lo largo de la longitud de medición. Además, se distinguen tres gráficas dependiendo de la dirección de medición. En el pie de página de estas gráficas viene un breve resumen de varios datos de interés que proporciona el software de Renishaw.

SISTEMA DE INTERFEROMETRIA DE CALIBRACION DE RENISHAW
 TODOS LOS DATOS

Máquina:Gantry Núm Serial:
 Fecha:18:55 Aug 04 2022 Por:
 Eje:X Localiz:
 TITULO: Nombre fichero: CAPTURED DATA

Valores de inform. de unids son milímetros

Objetivo 1 (+) (500.0000 milímetros)	
1) -0.0369	
Objetivo 1 (-)	
1) 0.0396	
Objetivo 2 (+) (1500.0000 milímetros)	
1) -0.0369	
Objetivo 2 (-)	
1) 0.0359	
Objetivo 3 (+) (2500.0000 milímetros)	
1) -0.0329	
Objetivo 3 (-)	
1) 0.0326	Objetivo 10 (+) (9500.0000 milímetros)
	1) -0.0165
Objetivo 4 (+) (3500.0000 milímetros)	Objetivo 10 (-)
1) -0.0318	1) 0.0165
Objetivo 4 (-)	Objetivo 11 (+) (10500.000 milímetros)
1) 0.0319	1) -0.0139
Objetivo 5 (+) (4500.0000 milímetros)	Objetivo 11 (-)
1) -0.0292	1) 0.0130
Objetivo 5 (-)	Objetivo 12 (+) (11500.000 milímetros)
1) 0.0284	1) -0.0100
Objetivo 6 (+) (5500.0000 milímetros)	Objetivo 12 (-)
1) -0.0253	1) 0.0097
Objetivo 6 (-)	Objetivo 13 (+) (12500.000 milímetros)
1) 0.0250	1) -0.0089
Objetivo 7 (+) (6500.0000 milímetros)	Objetivo 13 (-)
1) -0.0241	1) 0.0090
Objetivo 7 (-)	Objetivo 14 (+) (13500.000 milímetros)
1) 0.0243	1) -0.0064
Objetivo 8 (+) (7500.0000 milímetros)	Objetivo 14 (-)
1) -0.0215	1) 0.0054
Objetivo 8 (-)	Objetivo 15 (+) (14500.000 milímetros)
1) 0.0207	1) -0.0024
Objetivo 9 (+) (8500.0000 milímetros)	Objetivo 15 (-)
1) -0.0177	1) 0.0052
Objetivo 9 (-)	
1) 0.0173	

Figura AII. 3 Tabla de datos ensayo de rectitud

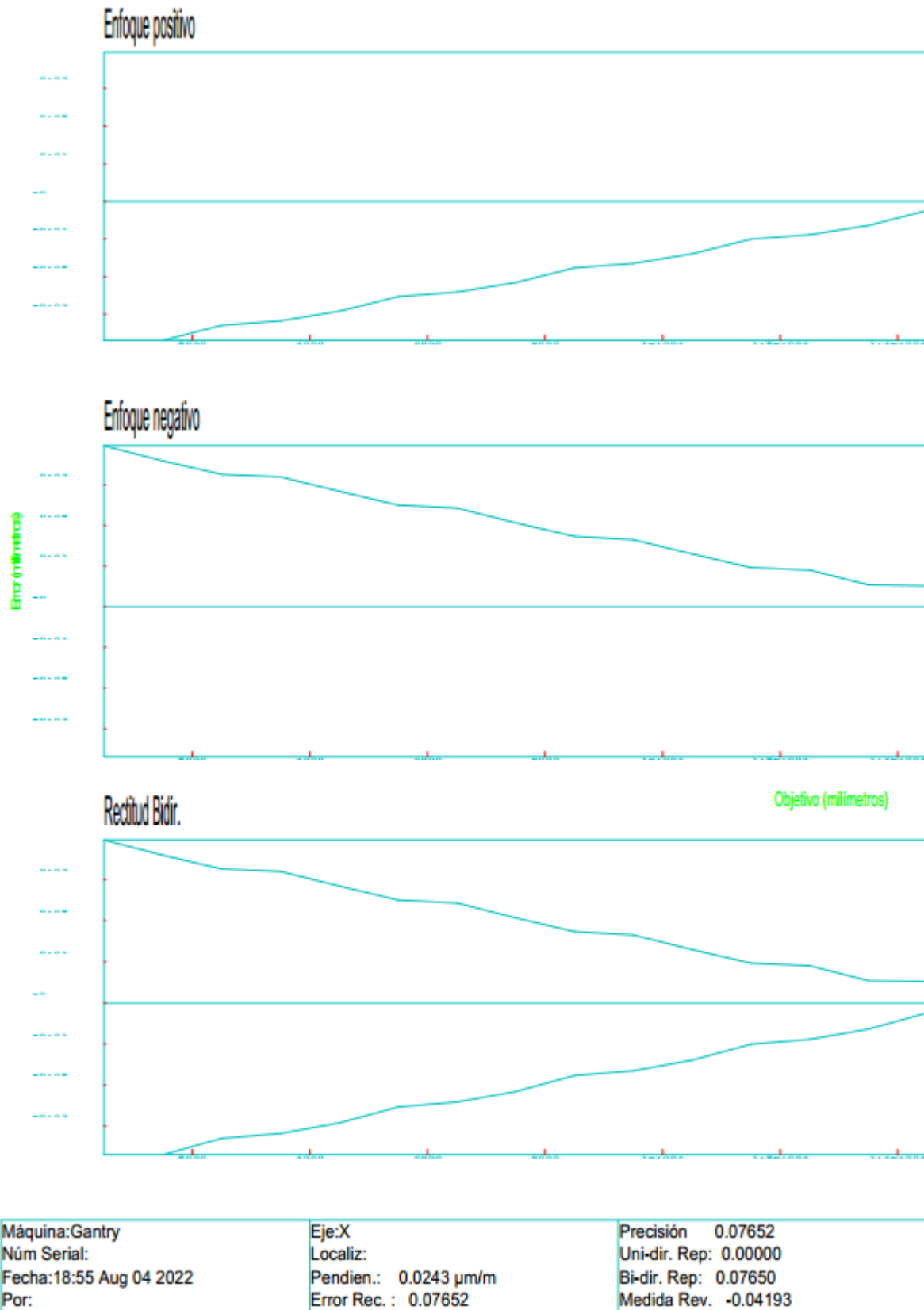


Figura AII. 4 Gráfica ensayo de rectitud

Haciendo uso de la tabla 9 se procede con el cálculo de incertidumbre del ensayo de rectitud.

Tabla 9. Resumen cálculo incertidumbre para Gantry

CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE					
VARIABLE	RANGO	DISTRIBUCION	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD	INCERTIDUMBRE
x_i		Normal	$S()$	1	U_{xi}
Lres	$\pm res/2$	Rectangular	$res/2\sqrt{3}$	1	U_{res}
Disp.		Normal	U_{disp}	1	U_{disp}
L		Normal	$\alpha \cdot L \cdot u(\theta)$	1	U_m
ΔT	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	Rectangular	$\Delta T \cdot L \cdot u(\alpha)$	$L \cdot \alpha$	U_e
Eve		Normal	$Eve/2\sqrt{3}$	1	U_{eve}
ΔL	ΔL	Rectangular	$\Delta L/2\sqrt{3}$	1	$U_{montaje}$
				$u = \sqrt{\sum u^2(x_i)}$ =	6 μm
				$U = k \cdot u = 2 \cdot u$ =	12 μm

- Incertidumbre por la medida reportada por el dispositivo

$$u(\Delta x_i) = \sqrt{s^2(\bar{x}_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{15} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{14 \cdot 15}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{15} (x_{ij} - 0.021)^2}{14 \cdot 15}} = \sqrt{\frac{0,0095}{14 \cdot 15}} = 0,01 \quad (AII.1)$$

- Incertidumbre por la resolución del dispositivo

$$u(res) = \frac{res}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,0 \quad (AII.2)$$

res = 0.0001 mm

- Incertidumbre debido al dispositivo

$$u_{DISPOSITIVO} = \frac{U_{CALIBRACION} \cdot l}{k} = \frac{0,05 \cdot 15}{2} = 0,4 \quad (AII.3)$$

$U_{CALIBRACION} = 0,05 \text{ ppm}$

$l = 15\text{m}$

- Incertidumbre debido a la desalineación del dispositivo con el eje a medir, no se tiene en cuenta para grandes longitudes ya que puede ser del orden de milímetros y su contribución no sería significativa.

- Incertidumbre de la compensación térmica de la máquina herramienta

$$u_{M, MÁQUINA_HERRAMIENTA} = \alpha \cdot l \cdot u(\theta) = 0,012 \cdot 15000 \cdot 0,2 = 36 \quad (AII.4)$$

$$u_{E, MÁQUINA_HERRAMIENTA} = \Delta T \cdot L \cdot u(\alpha) = 1 \cdot 15 \cdot 0,6 = 9 \quad (AII.5)$$

$l = 15\text{m}$

$u(\theta) = 0,2$

$\alpha = 12 \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$

$$\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$$

- Incertidumbre debido a la variación del ambiente, no se tiene en cuenta debido a que es necesario realizar un ensayo de deriva para obtener el valor para obtener dicha incertidumbre.
- Incertidumbre debido al montaje

$$\Delta L_{MONTAJE} = \frac{\sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{\text{ÁNGULO}}}{1000} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 50}{1000} = 0,07 \quad (\text{AII. 6})$$

$$u_{MONTAJE} = \frac{\Delta L_{MONTAJE}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,07}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,02 \quad (\text{AII. 7})$$

$$O_{ABBE} = 1\text{mm}$$

$$D_{\text{ÁNGULO}} = 50 \mu\text{m/m}$$

A.2 Ensayo de posicionamiento angular

Atendiendo a las especificaciones de la mesa giratoria los puntos programados serán los definidos en la tabla 10. Además, cada posición programada se tiene que alcanzar un total de 5 veces en cada sentido. El procedimiento marcado en este punto puede ser extensible a otras mesas giratorias con las mismas especificaciones, salvo el cálculo de las posiciones programadas ya que si el eje giratorio es de más de 360° se obtiene de una manera diferente. Se utilizará un recorrido bidireccional alternativo, figura AII.5, que consiste en realizar primero las mediciones del primer recorrido en las dos direcciones con sus respectivos sobre recorridos para invertir la dirección. Así sucesivamente hasta realizar los 5 recorridos marcados.

Tabla 10. Posiciones para ensayo angular

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Posición	0°	45°	90°	110°	125°	145°	160°	180°	200°	225°	250°	270°	290°	315°	340°	360°

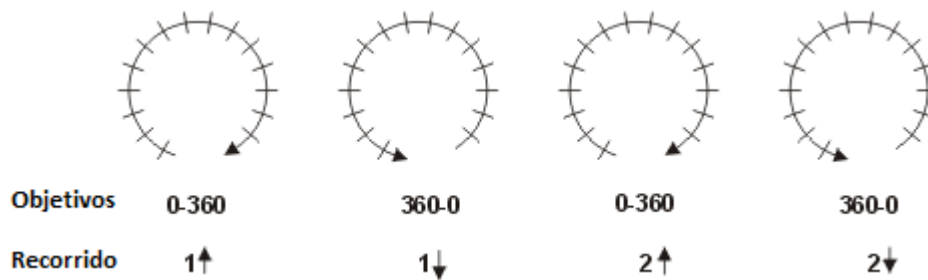


Figura AII. 5 Recorrido bidireccional alternativo

Para realizar este ensayo se utiliza el láser XL-80 de Renishaw con el indexador XR-10. A continuación, se realiza el montaje como se ha descrito en el punto A.6 de este Anexo y sus correspondientes alineamientos para su correcto funcionamiento.

El software de Renishaw permite representar los resultados y analizarlos según varias normas. En este caso se ha seleccionado el análisis mediante la ISO230-2, figura AII.7. En esta gráfica se puede ver la evolución de la repetibilidad, el valor inverso o la desviación media unidireccional. Además, en la parte final de esta figura se puede ver unos cuantos datos de interés de este ensayo. También se ha extraído un resumen de las mediciones tomadas con sus incertidumbres asociadas, figura AII.6.

---ISO 230-2 1997 Stats Table - Angulo-----Página 1

Máquina:GANTRY Fecha:10:09 Sep 05 2021 TITULO:
 Núm Serial: Eje:2 Nombre fichero: CAPTURED DATA.RTA

Units of error values and calculated statistical values are µm/mm

Target Number i	1	2	3	4	5	6	7							
Position (grad)	0.0000	24.0000	48.0000	72.0000	96.0000	120.0000	144.0000							
Approach direction	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +							
j=	1	2	3	4	5	6	7							
Positional	0.3597	0.2424	-418.5212	-418.6398	-837.4032	-837.5102	-1256.284	-1256.386	-1675.165	-1675.263	-2094.046	-2094.140	-2512.928	-2513.015
Deviation	0.4393	0.3623	-418.4425	-418.5123	-837.3235	-837.3887	-1256.205	-1256.265	-1675.087	-1675.141	-2093.968	-2094.017	-2512.849	-2512.894
Xij	0.5934	0.5327	-418.2874	-418.3441	-837.1679	-837.2210	-1256.049	-1256.098	-1674.929	-1674.975	-2093.810	-2093.852	-2512.691	-2512.730
	0.6550	0.5953	-418.2259	-418.2821	-837.1067	-837.1596	-1255.987	-1256.036	-1674.868	-1674.913	-2093.749	-2093.791	-2512.631	-2512.668
	0.7191	0.6571	-418.1627	-418.2156	-837.0435	-837.0966	-1255.924	-1255.973	-1674.805	-1674.850	-2093.686	-2093.727	-2512.566	-2512.604
Mean Deviation	0.5533	0.4780	-418.3279	-418.3984	-837.2050	-837.2752	-1256.090	-1256.152	-1674.971	-1675.028	-2093.852	-2093.905	-2512.733	-2512.782
Std Uncertainty Si	0.1495	0.1716	0.1459	0.1705	0.1503	0.1705	0.1505	0.1703	0.1509	0.1701	0.1510	0.1698	0.1513	0.1690
2Si	0.2995	0.3431	0.2917	0.3418	0.3006	0.3410	0.3011	0.3405	0.3017	0.3403	0.3019	0.3395	0.3025	0.3381
Mean - 2Si	0.2534	0.1349	-418.6277	-418.7402	-837.5056	-837.6162	-1256.391	-1256.452	-1675.272	-1675.369	-2094.154	-2094.245	-2513.035	-2513.120
Mean + 2Si	0.8532	0.8211	-418.0282	-418.0566	-836.9084	-836.9342	-1255.788	-1255.811	-1674.669	-1674.688	-2093.550	-2093.566	-2512.430	-2512.444
4Si	0.5997	0.6862	0.5995	0.6836	0.6012	0.6820	0.6021	0.6811	0.6034	0.6805	0.6039	0.6791	0.6051	0.6761
Reversal Bi	-0.0753	-0.0704	-0.0704	-0.0662	-0.0662	-0.0621	-0.0621	-0.0577	-0.0577	-0.0535	-0.0535	-0.0491	-0.0491	-0.0451
Bidi.Repeat.Ri	0.7183	0.7120	0.7120	0.7078	0.7078	0.7037	0.7037	0.6997	0.6997	0.6959	0.6959	0.6919	0.6877	0.6837
Mean Deviation	0.5156	-418.3632	-418.3632	-837.2421	-837.2421	-1256.121	-1256.121	-1675.000	-1675.000	-2093.875	-2093.875	-2512.757	-2512.757	-2512.757

---Estadística-----

Axis Deviation (µm/mm)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	0.0753 (at i= 1)
Mean Reversal B	Not applicable	Not applicable	-0.0386
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	6283.1885
Sys.Dev.Z	6283.2252	6283.1518	6283.2271
Repeatability R	0.6647 (at i=16)	0.6862 (at i= 1)	0.7183 (at i= 1)
Accuracy A	6283.8574	6283.8282	6283.8603

Figura AII. 6 Tabla de datos ensayo de posicionamiento angular

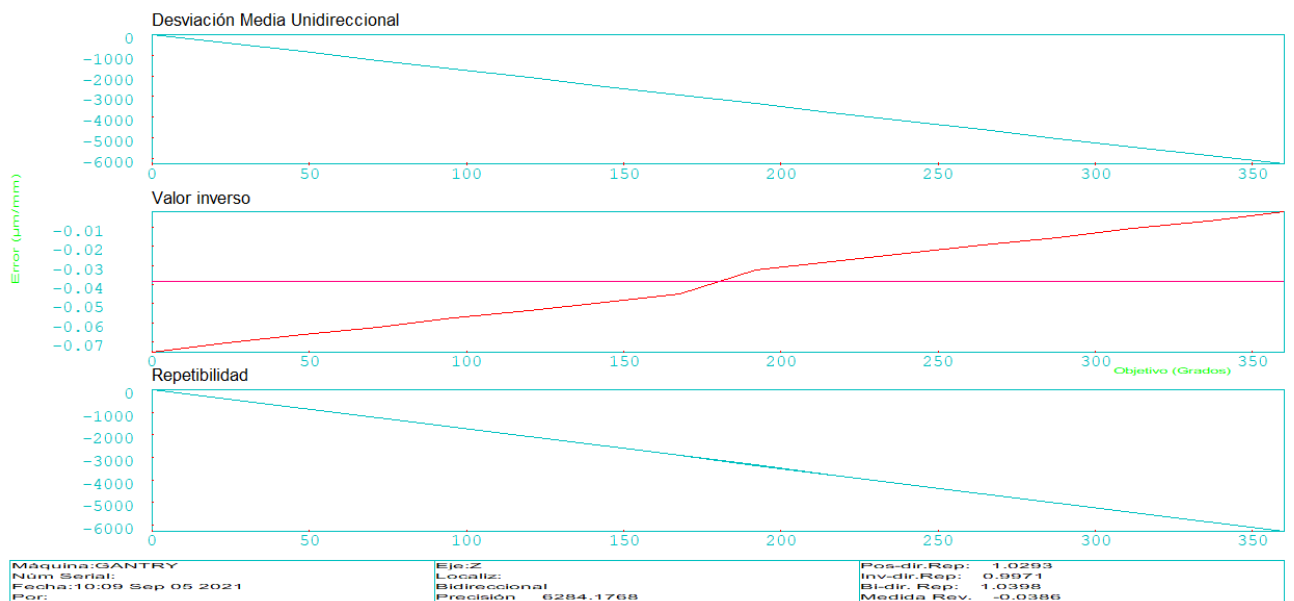


Figura AII. 7 Gráfica ensayo de posicionamiento angular

En cuanto a los datos de la incertidumbre el software de Renishaw proporciona una serie de datos que se puede ver en la figura A.155. A continuación, se presenta como se calcularía cada incertidumbre que aparece en la tabla de datos y a que se refiere cada una de ellas para su mejor comprensión.

- Error de inversión de un eje B: se trata del máximo valor de error de inversión de todas las posiciones i a lo largo del eje. El error de inversión en cada posición es la diferencia de las desviaciones medias en ambos sentidos.

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (AII. 8)$$

$$B = \max [|B_i|] \quad (AII. 9)$$

- Error medio de inversión de un eje \bar{B} : es la media de los errores de inversión a lo largo del eje.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (AII. 10)$$

- Repetibilidad de posicionamiento unidireccional $R \uparrow$ o $R \downarrow$: se parte del estimador de la repetibilidad aplicándole un factor de cobertura de 2 y eligiendo el valor máximo de los valores a lo largo del eje. El estimador de la repetibilidad son las desviaciones de posicionamiento en los diferentes recorridos a lo largo de eje. Se expone las ecuaciones para un sentido de desplazamiento, pero para el otro sería lo mismo cambiando la flecha en la dirección opuesta.

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (AII. 11)$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (AII. 12)$$

$$R \downarrow = \max [R_i \downarrow] \quad (AII. 13)$$

- Repetibilidad de posicionamiento bidireccional R : es la máxima repetibilidad que se puede obtener en ambos sentidos a lo largo de todas las posiciones en el eje.

$$R_i = \max[2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (AII. 14)$$

$$R = \max [R_i] \quad (AII. 15)$$

- Error de posicionamiento unidireccional sistemático $E \uparrow$ y $E \downarrow$: es la diferencia entre el máximo y el mínimo de las desviaciones medias de posicionamiento unidireccional. Se expresa la ecuación para un sentido, pero para el opuesto será lo mismo y solo variaría la flecha.

$$E \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (AII. 16)$$

- Error de posicionamiento bidireccional sistemático E : en este caso se tiene la diferencia entre el máximo y mínimo de las desviaciones medias de posicionamiento unidireccional en ambos sentidos.

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (AII. 17)$$

- Error de posicionamiento bidireccional medio de un eje M : se trata de la diferencia entre el máximo y el mínimo de las desviaciones medias de posicionamiento bidireccional.

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (AII. 18)$$

- Error de posicionamiento unidireccional $A \uparrow$ y $A \downarrow$: se utilizará los errores medios de posicionamiento unidireccional y el estimador de repetibilidad de posicionamiento según se expone en la ecuación de abajo.

$$A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (AII. 19)$$

- Error de posicionamiento bidireccional A : se calcula de la misma manera, pero añadiendo una comparación bidireccional a la hora de obtener el máximo y mínimo.

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (AII. 20)$$

El calculo de la incertidumbre asociada a esta medición se realizará según el punto A.8 de este anexo. Se tendrá en cuenta las características propias del ensayo para realizar cada cálculo de incertidumbre. Con respecto al ensayo de rectitud descrito anteriormente los valores de incertidumbre serán todos iguales salvo el que tiene que ver con la incertidumbre de la medida reportada por el dispositivo. En este caso se tiene una u_j para cada posición de medición. Por lo que la ecuación será la siguiente:

$$u(\Delta x_i) = \sqrt{s^2(\bar{x}_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{15} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{14 \cdot 15}} \quad (AII. 21)$$

Se elegirá la mayor incertidumbre de todas las calculadas para el cálculo de la incertidumbre combinada, la cual se utiliza para el resultado final.

REFERENCIAS

- [1] Alejandro Prudencio Razo (2011). Proceso para la manufactura y verificación geométrica de elementos estructurales para máquinas–herramienta de aplicación específica
- [2] Chicago Pneumatic (2019). Herramientas de calibración: ¿Por qué son importantes?. <https://tools.cp.com/es/expert-corner/blog/tools-calibration-why-is-it-important>
- [3] José Angel Marañón (2013). Los errores en el mecanizado. Interempresas. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116756-Los-errores-en-el-mecanizado.html>
- [4] Dra. Georgina Flesia, DR. Clemar Schurrer, Ing. Guillermo Bergues. Elección de la interface de visión para Autocolimador Nikon 6D.
- [5] Bottero, Francisco, Pucheta, Martín, Schurrer, Clemar (2008). Diseño de un Flexor de Precisión para un Dispositivo Generador de Ángulos Pequeños para Aplicaciones de Calibración en Metrología.
- [6] Heikki Laurila (2019). Incertidumbre de la calibración para no matemáticos. Beamex. <https://blog.beamex.com/es/incertidumbre-de-la-calibracion-para-no-matematicos>
- [7] Comité de Laboratorios de EA (2013). Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.
- [8] M^a Mar Pérez Hernández (2013). Estimación de incertidumbres Guía GUM (*Revista Española de Metrología*)
- [9] Norma UNE-ISO 230-1:2014. Máquinas – herramienta. Código de verificación de máquinas - herramienta Parte 1: Precisión geométrica de las maquinas funcionando en vacío o en condiciones cuasi-estáticas.
- [10] Norma UNE-ISO 230-2:2016. Máquinas – herramienta. Código de verificación de máquinas - herramienta Parte 2: Determinación de la precisión y repetibilidad de posicionamiento de los ejes con control numérico.
- [11] 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
- [12] Norma UNE-ISO 230-9:2008. Máquinas – herramienta. Código de verificación de máquinas - herramienta. Parte 9: Estimación de la incertidumbre de medida para los ensayos de máquinas-herramienta de acuerdo a la serie de Normas ISO 230, ecuaciones base
- [13] <https://www.renishaw.es/es/sistema-laser-xl-80--8268>
- [14] <http://www.renishaw.es/es/sistemas-de-ballbar-telescopicos--6813>
- [15] Iván Torres. Cómo hacer calibraciones y/o verificaciones internas de mis equipos de medida y salvarme de una no conformidad segura. <https://iveconsultores.com/como-hacer-calibracion-y-verificacion-interna-iso-9001/>