



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado según la directriz "VDI/VDE 2617"

AUTOR

Alberto Frisa Rubio

DIRECTORES

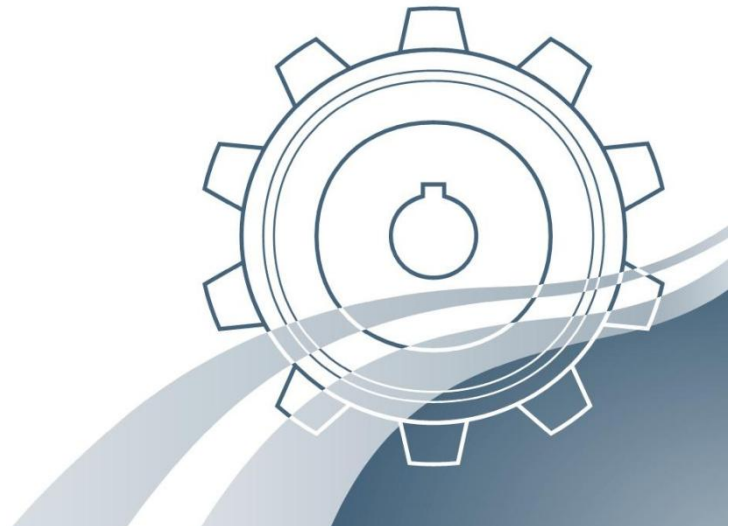
Carlos Cajal Hernando
Jorge Santolaria Mazo

ESPECIALIDAD

Mecánica

CONVOCATORIA

Junio 2010



ANEJOS A LA MEMORIA

1. EQUIPOS UTILIZADOS.....	4
1.1. BRAZO ARTICULADO FARO “PLATINUM”.....	5
1.1.1. EQUIPAMIENTO.....	6
1.1.2. CARACTERÍSTICAS.....	6
1.1.3. APLICACIONES MÁS COMUNES.....	6
1.1.3. ESPECIFICACIONES DE RENDIMIENTO.....	7
1.1.4. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.....	7
1.2. BASE DE SOPORTE FARO PARA BRAZO ARTICULADO.....	7
1.3. BARRA PATRÓN DE ESFERAS UNIMETRIK.....	8
1.3.1. CERTIFICADO DE CALIBRACION.....	9
1.4. SOPORTE KOBAS PARA BARRA PATRÓN DE ESFERAS.....	14
2. ANÁLISIS DIRECTRIZ “VDI/VDE 2617”.....	15
2.1. CALIBRACIÓN DEL PALPADOR.....	15
2.2. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.....	16
2.2.1. ERROR DE PALPADO DE POSICIÓN DE LA ESFERA.....	20
2.2.2. ERROR DE PALPADO DE TAMAÑO.....	22
2.2.3. ERROR DE PALPADO DE FORMA.....	24
2.2.4. RESÚMEN DE LA PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.....	25
2.3. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.....	27
2.3.1. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN COMPLETO.....	27
2.3.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN PARCIAL.....	38
2.3.3. RESÚMEN DE LA PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.....	51
2.3.4. ERROR MÁXIMO PERMISIBLE.....	53
2.4. ANÁLISIS DE TIEMPO.....	57
3. COMPARATIVA NORMATIVAS INTERNACIONALES.....	59
3.1. ERROR OBTENIDO.....	59
3.1.1. PRUEBAS DE ERROR DE TAMAÑO.....	59
3.1.2. PRUEBAS DE ERROR DE POSICIÓN.....	60
3.1.3. PRUEBAS VOLUMÉTRICAS.....	62
3.2. TIEMPO EMPLEADO.....	64
3.3. PRESUPUESTO.....	66
3.4. CRITERIOS DE VERIFICACIÓN.....	67

3.5. APLICACIONES.....	68
------------------------	----

1. EQUIPOS UTILIZADOS.

A continuación se presenta un breve repaso acerca de los equipos de metrología utilizados para llevar a cabo la ejecución de la normativa “VDI/VDE 2617”. Dichos equipos fueron utilizados conjuntamente en el laboratorio de metrología de la Universidad de Zaragoza, durante las fechas de realización de las diferentes pruebas. Los equipos empleados fueron:

- Brazo articulado FARO “Platinum”.
- Base de soporte FARO.
- Barra patrón de esferas UNIMETRIK.
- Soporte KOBA para barra patrón de esferas.



Imagen de conjunto de laboratorio con los diferentes equipos utilizados.

1.1. BRAZO ARTICULADO FARO “PLATINUM”.

Es el equipo central del proyecto realizado debido a que es la máquina evaluada. Es un brazo articulado de medición por coordenadas del fabricante FARO y modelo “Platinum”.

Los brazos articulados de medición por coordenadas, también conocidos como máquinas de medir por coordenadas de brazo articulado, constituyen un grupo especial de equipos dentro de la medición por coordenadas, por sus características especiales y diferencias con respecto a las máquinas de medir tradicionales. Aunque su función es la misma, es decir, determinar las coordenadas x , y , z de un punto en su volumen de trabajo con respecto a un sistema de referencia global, la diferencia fundamental reside en su estructura cinemática. Mientras que las máquinas de medir por coordenadas, tienen una configuración tal que permite la medición del desplazamiento físico de cada uno de sus tres ejes, en los brazos de medida la obtención del punto medido es producto de una serie de transformaciones matemáticas, regidas por su modelo matemático.



Brazo articulado FARO “Platinum”.

1.1.1. EQUIPAMIENTO.

- **Sensores de temperatura y sobrecarga:** Situados en cada articulación, permiten al brazo “sentir” y reaccionar a variaciones termal y a manipulaciones inadecuadas para una máxima precisión.
- **Construcción ligera:** Construcción ligera de alta resistencia, para una portabilidad total y una verdadera ejecución de "medida de cualquier lugar".
- **Disponibilidad opcional de 7 ejes:** Proporciona un eje de rotación adicional para palpadores lineales láser sin contacto o palpadores curvos.
- **Contrapeso interno:** Contrapeso interno proporciona una máxima comodidad de manejo sin estrés.
- **Capacidad de varios palpadores:** Incluso varios diámetros de esfera, sensibles al tacto, curvos y extensiones.
- **Uso extendido de la batería:** Batería integrada de uso extendido proporciona una verdadera capacidad de "medida de cualquier lugar".
- **Montaje rápido universal de 3,5”:** Ofrece montarlo donde sea preferible y tenga un menor tiempo de inactividad.

1.1.2. CARACTERÍSTICAS.

- Número de serie P08-05-0521419.
- Fecha de certificación, 14 de noviembre de 2007.
- Volumen de medida de 2.400 milímetros.
- Disponibilidad de 7 ejes.
- Palpador de 6 grados de libertad.
- Adaptable a tecnología de medida 3-D.

1.1.3. APLICACIONES MÁS COMUNES.

- Aeroespacial: Alineación, certificación de herramientas y moldes, inspecciones.
- Automoción: Herramienta de construcción y certificación, alineación, inspecciones.
- Fabricación de metales: OMI, inspección artículo primero, inspección periódica.
- Moldes/Herramientas y matricería: inspección de moldes y matrices, exploración de prototipos.

1.1.3. ESPECIFICACIONES DE RENDIMIENTO.

A continuación se presenta el error que admite el fabricante FARO para este modelo “Platinum” con un rango de medida de 2.400 milímetros y 7 ejes. Los métodos de ensayo utilizados, son un subconjunto de los que figuran en la norma “ASME B89.4.22”.

Prueba de articulación de punto único	±0,030 mm
Prueba de rendimiento volumétrico	±0,043 mm
Peso	9,75 kg

1.1.4. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.

- **Rango de temperatura operacional:** 10°C a 40°C.
- **Gradiente de temperatura:** 3°C/5min.
- **Humedad:** 95%, sin condensación.
- **Ciclo de vida de calibración:** Permanente.
- **Fuente de alimentación:** Voltaje universal, 85-245 VAC, 50/60 Hz.
- **Certificaciones:** Conformidad CE.

Directiva 93/68/EEC, (Marcado CE).

Directiva 89/336/EEC, (EMC).

FDA CDRH, subcapítulo J de 21 CFR 1040.10.

Equipos eléctricos de medida, control, uso en laboratorio.

EN 61010-1:2001, IEC 60825-1, EN 61326.

Compatibilidad electromagnética (EMC).

EN 55011, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3

EN 61000-4-4, EN 61000-4-5.

EN 61000-4-6, EN 61000-4-8, EN 61000-4-11.

1.2. BASE DE SOPORTE FARO PARA BRAZO ARTICULADO.

Es el elemento sobre el que se monta el brazo articulado, y sirve como elemento de fijación sobre una zona cercana a la pieza a medir. Dado el carácter portátil del equipo y la necesidad de ser desplazado frecuentemente, la base utilizada es un trípode que permite fijar el brazo a distintas alturas y facilitar su traslado entre distintas zonas de medida.

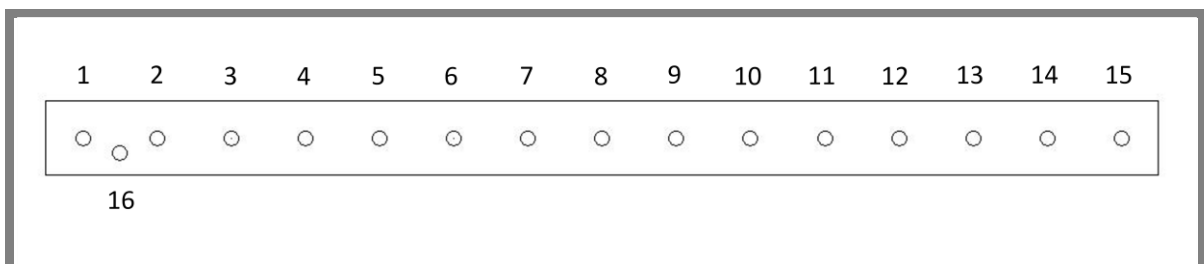
Antes de comenzar a utilizar el brazo articulado, una vez montado sobre esta base, es preciso, regular el trípode convenientemente en altura, asegurando una nivelación y fijación correcta. Todo ello permitirá, durante el proceso de medida, que se eviten posibles movimientos del bloque compuesto por base y brazo, provocando errores en las mediciones realizadas.



Trípode FARO.

1.3. BARRA PATRÓN DE ESFERAS UNIMETRIK.

Es el patrón utilizado a lo largo de toda la prueba de evaluación descrita en la directriz “VDI/VDE 2617”. A continuación se muestra un esquema de la barra patrón de esferas UNIMETRIK, que caracteriza una longitud máxima de 1.400 milímetros, entre las esferas patrón de los extremos. La distancia entre centros de esferas colindantes es de 100 milímetros (ver calibración en el siguiente apartado para más datos). Dispone de 15 esferas patrón y una esfera patrón fuera de línea.



Esquema de la barra patrón de esferas de 15 esferas patrón y una esfera patrón fuera de línea (número 16).

Durante la evaluación realizada, la barra patrón de esferas es utilizada como elemento verificador.

Para la primera prueba realizada, “prueba de error de palpado” únicamente es verificada la esfera número 4 de la barra, obviando en este caso las restantes características de la barra patrón de esferas. Además, complementariamente, se determina el valor nominal del diámetro de dicha esfera 4 mediante la máquina de medición por coordenadas, CMM, obteniendo una medida de 21,9988 milímetros. Este dato es necesario para la realización de evaluaciones que exige la normativa, y debe ser calculada mediante este método puesto que el certificado de calibración de la barra patrón de esferas, no incluye valores nominales de diámetros.

Posteriormente, para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, la barra patrón de esferas, se utiliza para caracterizar distancias entre centros de esferas, obteniendo una distancia que es posible comparar con el valor calibrado de dicho patrón que aparece en su certificado de calibración.



Barra patrón de esfera UNIMETRIK sobre soporte KOBAS.

1.3.1. CERTIFICADO DE CALIBRACION.

A continuación se presenta el certificado de calibración de la barra patrón de esferas UNIMETRIK, emitido por la empresa UNIMETRIK, S.A., el día 1 de julio de 2004.



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

U20279

Número

Number

Página 1 de 3 páginas

Page of pages

UNIMETRIK, S.A.

Laboratorio de Calibración

Calle San Blas, 11 (Legutianoko Industrialdea)

Polígono Industrial de Gojain

01170 - LEGUTIANO (Alava)

Tel. 945 46 58 00 - Fax 945 46 57 99

e-mail: info@unimetrik.es - http://www.unimetrik.es



OBJETO

Item

BARRA DE ESFERAS

MARCA

Mark

UNIMETRIK

MODELO

Model

IDENTIFICACION

Identification

UMTK1605

SOLICITANTE

Applicant

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Dpto. Ingeniería, Diseño y Fabricación. C/ María de Luna 3

50018 ZARAGOZA (Zaragoza)

FECHA/S DE CALIBRACIÓN 1 de julio de 2004

Date/s of calibration

Signatario/s autorizado/s

Authorized signatory/ies

Técnico de laboratorio

Fecha de emisión

Date of issue

1 de julio de 2004

Jesús Albéniz Puelles

Dtor. Laboratorio



Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del Laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.

Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.

Denominación:	BARRA DE ESFERAS
Código:	UMTK1605
Campo de medida (mm):	1400,000

METODOLOGIA

La calibración se efectuó empleando el Procedimiento de Calibración de UNIMETRIK 330.084, para calibrar barra de bolas y agujeros en su longitud. La calibración ha consistido en determinar la distancia entre centros de una bola de referencia de la barra, y el resto de las bolas de la barra, dando asimismo la incertidumbre expandida de medición.

ALINEAMIENTO

El eje X está definido por los centros de las bolas Nº 1 y Nº 10 ($x=0$ mm y $X=900$ mm), correspondiente al alineamiento primario. El eje Z está definido por el vector normal del plano que pasa por los centros de las bolas Nº 1, Nº 10 ($X=0$ mm y $X=900$ mm) y por la bola adicional (con un offset al eje X), lo cual corresponde al alineamiento secundario.

TRAZABILIDAD

LOS PATRONES E INSTRUMENTOS EMPLEADOS EN LA CALIBRACION TIENEN GARANTIZADA SU TRAZABILIDAD A TRAVES DE LOS LABORATORIOS RECONOCIDOS POR ENAC U OTRA ENTIDAD DE EA (European cooperation for Accreditation).

CONDICIONES AMBIENTALES DEL LABORATORIO

Temperatura: 20 ± 1 °C.

Humedad relativa del aire: < 70 % hr.

Notas:

- La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02.
- Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizan las mediciones, no considerándose la estabilidad del equipo de medida a más largo plazo.
- Se advierte al usuario de la necesidad de considerar las magnitudes de influencia significativas, e incrementar consecuentemente las incertidumbres, cuando utilice los equipos de medida en condiciones que difieran de las de calibración.

Número: U20279
Hoja: 3 de 3

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE
BARRA DE ESFERAS**

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

La calibración ha consistido en reiterar una serie de medidas con la medidora de tres coordenadas para obtener las distancias de las esferas de la barra. Los resultados fueron los siguientes:

Valor medido, L20 (mm)	Incert. expandida, k=2 (mm)
0.0000	0.0010
100.7847	0.0011
200.0300	0.0012
300.0636	0.0013
399.9568	0.0014
500.0889	0.0015
600.1160	0.0016
700.1375	0.0017
800.1482	0.0018
900.1774	0.0019
1000.1986	0.0020
1100.2148	0.0021
1200.2438	0.0022
1300.2698	0.0023
1400.2890	0.0024


Se da el resultado de la incertidumbre expandida (k=2), como una función dependiente de la longitud. La incertidumbre asociada a estos resultados es la siguiente:


$U = (1.00 + 0.001 L) \mu m$ (L en mm)

OBSERVACIONES

Notas:

- La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EAL-R2.
- En los resultados no se ha considerado la estabilidad del instrumento a más largo plazo.
- Se advierte al usuario de la necesidad de considerar las magnitudes de influencia significativas, e incrementar consecuentemente las incertidumbres, cuando utilice los elementos en condiciones que difieran de las de calibración.

Técnico de calibración: 

 UNIMETRIK S.A. <small>SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN</small>	ANEXO DE CERTIFICADO DE CALIBRACION		Número: U20279
	BARRA DE ESFERAS		Hoja : 1 de 1

PROMEDIO DE TODAS LAS MEDIDAS			
RESULTADOS			
ESFERA	EJE " X "	EJE " Y "	EJE " Z "
ESF1.1	0,00021	0,00019	0,00038
ESF1.2	100,00010	-0,00439	-0,40039
ESF1.3	200,05106	0,02682	-0,50350
ESF1.4	300,05973	0,00789	-0,60675
ESF1.5	400,07545	0,03363	-0,64680
ESF1.6	500,08929	0,01086	-0,61181
ESF1.7	600,09709	-0,01054	-0,52260
ESF1.8	700,10284	0,00684	-0,36233
ESF1.9	800,12668	0,00316	-0,18368
ESF1.10	900,10671	0,00034	0,00012
ESF1.11	1000,11308	-0,02209	0,12011
ESF1.12	1100,15638	-0,03553	0,38295
ESF1.13	1200,21450	0,03209	0,61924
ESF1.14	1300,20888	-0,09217	0,78910

Técnico de laboratorio:	
-------------------------	--

1.4. SOPORTE KOBA PARA BARRA PATRÓN DE ESFERAS.

Es la base sobre la que es apoyada y amarrada la barra patrón de esferas. Las características que debe cumplir dicho soporte son fundamentalmente la estabilidad y rigidez, siendo imprescindible para una correcta evaluación que el conjunto que forma el soporte y barra patrón no genere un movimiento en sus uniones, y la estabilidad sea total durante la medición.

Asimismo, se debe garantizar que la flexión que se genera sobre la barra patrón de esferas, sea nula o mínima, conociendo de antemano, que la flexión máxima que se produce en el patrón se produce en la sección central, un hecho importante a la hora de realizar la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, dónde al caracterizar una distancia entre centros de esferas, puede verse influida por dicha flexión de la barra patrón.

Otra característica útil que proporciona el soporte empleado, es el soporte giratorio, que permite girar conjuntamente, el soporte con la barra patrón un ángulo de hasta 45° en ambas direcciones, una orientación que se empleará en varias mediciones durante la prueba.



Conjunto soporte KOBA y barra patrón de esferas.



Soporte KOBA girado 45° .

2. ANÁLISIS DIRECTRIZ “VDI/VDE 2617”.

La evaluación del brazo articulado de medición por coordenadas FARO “Platinum” según la normativa descrita, se realiza en el laboratorio de metrología de la Universidad de Zaragoza, en Zaragoza, entre los días 9 y 14 de diciembre de 2009, siendo necesario emplear un tiempo aproximado de 12 horas de trabajo en laboratorio para la realización de cada una de las dos evaluaciones ejecutadas mediante dos operadores distintos.

Las condiciones ambientales para la realización de la citada evaluación, es de una temperatura de 20°C (error $\pm 1^\circ\text{C}$) en el laboratorio de metrología, siendo la temperatura indicada por el brazo articulado de 26°C (error $\pm 1^\circ\text{C}$).

2.1. CALIBRACIÓN DEL PALPADOR.

Antes de comenzar la evaluación, se inicializa el brazo articulado, mediante conexión a red y a ordenador, donde se inicializa el software “CAM2 MEASURE” que gestiona las operaciones que son realizadas mediante la máquina.

Mediante la aplicación disponible en dicho software para calibración de palpadores, se procede a completar esta primera operación. Se emplea un palpador rígido esférico de material cerámico de 6 mm de diámetro, utilizando para su calibración, un asiento cinemático compatible para dicho palpador.



Detalle de palpador y asiento cinemático empleados.

Durante la operación de calibración, y mediante el palpador apoyado sobre el asiento cinemático, se inicia la aplicación de calibración del software, y se realiza la captura de puntos de dicho palpador en tres planos, girados 120°. Es decir, cuando el palpador se apoya en el asiento cinemático y se realizan los sucesivos movimientos para la captura de puntos en los 3 planos requeridos, el software determina, en su sistema de referencia, el centro de la esfera del palpador, y de acuerdo a ese centro y a su diámetro (6 mm), calcula por algoritmo interno, el error y la desviación de la calibración.

Posteriormente, durante la evaluación, los puntos que sean tomados por el brazo articulado, serán corregidos automáticamente por el programa de gestión del brazo articulado, "CAM2 MEASURE", para determinar que el punto capturado corresponde a un punto que se encuentra en la superficie de la esfera del palpador, puesto que la máquina, sin este procedimiento de calibración, referencia los puntos respecto del extremo de su última articulación.

A continuación se detallan los resultados obtenidos tras la calibración del palpador rígido esférico utilizado durante la evaluación según la directriz "VDI/VE 2617". Cabe destacar que este valor de calibración fue utilizado para las evaluaciones del operario 1 y operario 2.

Diámetro palpador	6 mm
Error	0,0231 mm
2σ	0,0095 mm

2.2. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.

Es la primera prueba de la evaluación que se realiza. Consiste en determinar una esfera patrón dispuesta en varias posiciones y sobre esos datos, realizar las tres evaluaciones que determina la norma. Esta "prueba de error de palpado" se realizó los días 9 y 10 de diciembre de 2009.

La esfera patrón, se dispone en 3 posiciones diferentes dentro del volumen de trabajo del brazo. En cada disposición, la esfera se sitúa en una altura respecto al nivel cero de la máquina y a una longitud respecto a la base del brazo.

En cada una de las tres posiciones, se verifican 5 puntos distribuidos sobre un hemisferio de la esfera, tomando un punto sobre el polo y 4 puntos distribuidos equidistantemente a lo largo del ecuador de la esfera.

Cada una de estas mediciones (5 puntos) se repite 5 veces para cada disposición diferente de la esfera, utilizando en cada caso, diferentes orientaciones del palpador. Estas orientaciones del palpador, si es posible, coinciden con las direcciones x, y, z de un sistema de coordenadas.

Por tanto, 25 puntos son medidos en cada posición y 75 puntos en el total de la prueba. La prueba es realizada por 2 operadores a fin de obtener distintas mediciones para la comparación de medidas.

Para todas las posiciones, se ha utilizado la esfera número 4 de la barra patrón de esferas, como esfera patrón. Dicha esfera, se calibró mediante MMC, obteniendo un valor nominal de diámetro de 21,9988 milímetros. Este valor nominal es necesario para la realización de la evaluación indicada según el “error de palpado de tamaño, PS”.

A continuación se detalla la posición de la esfera patrón con respecto a la base del brazo articulado.

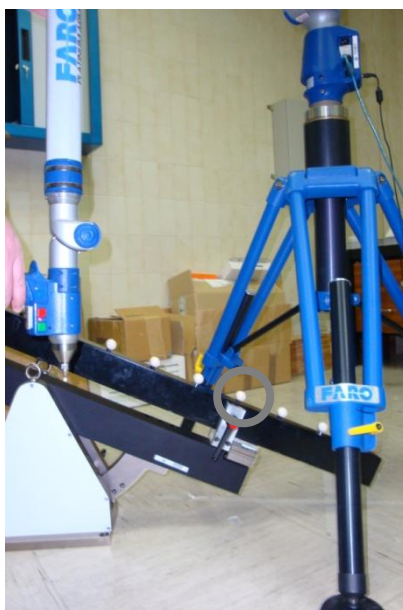
Posición	Distancia respecto brazo	Altura respecto nivel cero
1	1000 mm	760 mm
2	600 mm	0 mm
3	300 mm	-180 mm



Posición 1 de la esfera patrón en la prueba de error de palpado.



Posición 2 de la esfera patrón en la prueba de error de palpado.



Posición 3 de la esfera patrón en la prueba de error de palpado.

A continuación se presentan las coordenadas de cada centro de esfera y el radio de la esfera patrón que se ha obtenido, para cada repetición, en las 3 posiciones, para cada uno de los operarios. Asimismo, se adjunta un gráfico con todos los radios obtenidos en ambas evaluaciones de cada operario.

OPERARIO 1.

POSICIÓN 1					
Repetición	1	2	3	4	5
X	261,7895	261,7984	261,7971	261,7844	261,7701
Y	182,5257	182,5724	182,5139	182,5485	182,5708
Z	-948,0045	-947,9979	-948,0089	-947,9992	-947,9924
Radio (mm)	10,9831	10,9673	11,0195	10,9718	10,9639

POSICIÓN 2					
Repetición	1	2	3	4	5
X	-532,0473	-532,0389	-532,0457	-532,0451	-532,0525
Y	-599,8674	-599,8758	-599,8845	-599,8695	-599,8584
Z	155,8564	155,8545	155,874	155,8617	155,8695
Radio(mm)	11,0042	10,9971	11,007	10,9981	10,9873

POSICIÓN 3					
Repetición	1	2	3	4	5
X	223,9701	224,0055	223,9637	223,9638	223,9569
Y	-778,2275	-778,2157	-778,2405	-778,239	-778,2445
Z	162,6685	162,6617	162,651	162,6722	162,6682
Radio(mm)	10,9861	10,9716	10,9868	10,9932	10,9976

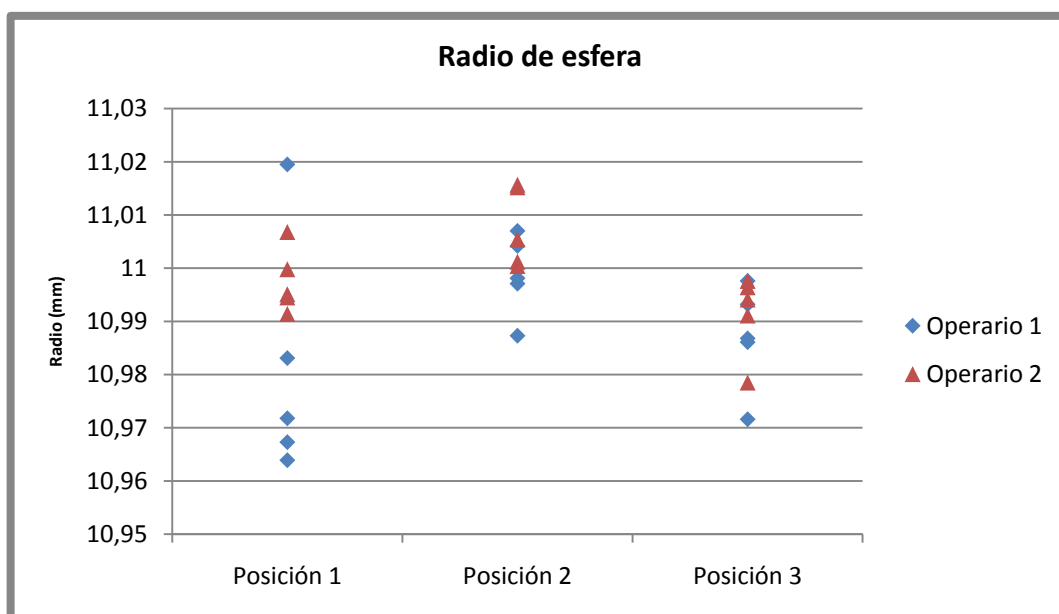
OPERARIO 2.

POSICIÓN 1					
Repetición	1	2	3	4	5
X	262,7593	262,9166	262,9077	262,9507	262,9224
Y	182,58	182,5921	182,5894	182,595	182,6031
Z	-948,703	-948,7563	-948,7745	-948,745	-948,7219
Radio(mm)	10,9951	11,0068	10,9945	10,9998	10,9914

POSICIÓN 2					
Repetición	1	2	3	4	5
X	-532,0488	-531,9565	-531,9796	-531,9807	-531,9727
Y	-599,8658	-599,8865	-599,8903	-599,8689	-599,8678
Z	155,8593	155,7944	155,752	155,7766	155,7659
Radio(mm)	11,0004	11,0152	11,0157	11,0054	11,0012

POSICIÓN 3					
Repetición	1	2	3	4	5
X	223,9615	224,0052	223,9716	223,9892	223,9936
Y	-778,2325	-778,2436	-778,2303	-778,2282	-778,2348
Z	162,6639	162,7145	162,7279	162,7182	162,7186
Radio(mm)	10,9976	10,9785	10,9911	10,9941	10,9964

GRÁFICOS.



Radios de esferas en ambas evaluaciones de cada operario, según la posición de la “prueba de error de palpado”.

2.2.1. ERROR DE PALPADO DE POSICIÓN DE LA ESFERA.

De cada grupo de cinco puntos de medición, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados. Para cada posición de la prueba, se obtienen cinco centros de esfera que tienen coordenadas x , y , z . Se calcula la distancia máxima entre dos de estos cinco centros. Finalmente, la mayor distancia de las tres máximas para las tres posiciones de la esfera, es el error de palpado, PL , de posición de la esfera.

Es decir, para cada posición de la prueba, se obtienen diez distancias entre los centros, es decir, 30 en total, la mayor de las cuales es PL .

A continuación se presentan los errores obtenidos para cada operario, así como gráficos comparativos.

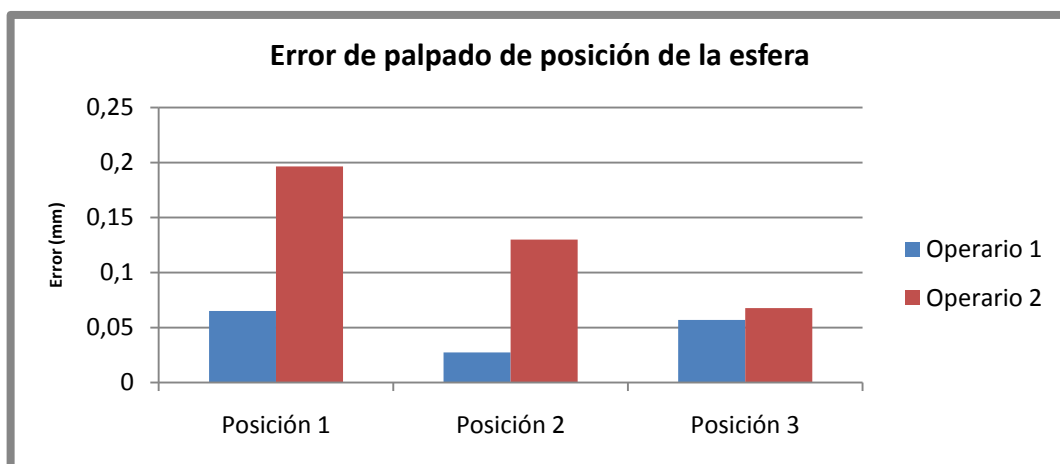
OPERARIO 1.

PL (mm)	Posición 1	Posición 2	Posición 3
centro1_centro2	0,0480	0,0120	0,0379
centro1_centro3	0,0147	0,0246	0,0227
centro1_centro4	0,0240	0,0061	0,0136
centro1_centro5	0,0506	0,0167	0,0215
centro2_centro3	0,0595	0,0224	0,0498
centro2_centro4	0,0277	0,0114	0,0489
centro2_centro5	0,0289	0,0267	0,0569
centro3_centro4	0,0381	0,0194	0,0213
centro3_centro5	0,0651	0,0273	0,0189
centro4_centro5	0,0273	0,0155	0,0097

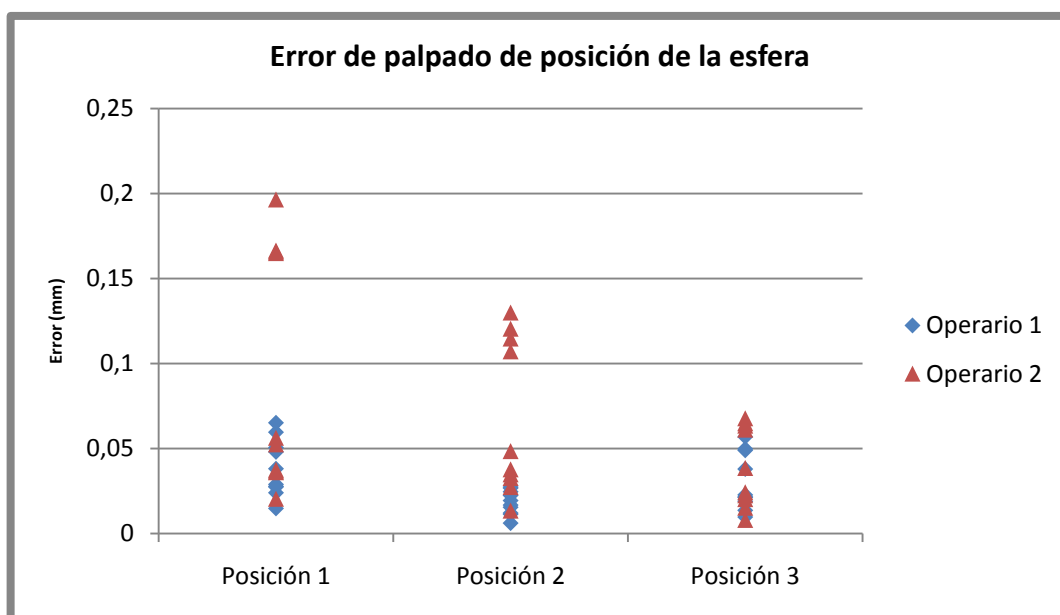
OPERARIO 2.

PL (mm)	Posición 1	Posición 2	Posición 3
centro1_centro2	0,1665	0,1147	0,0678
centro1_centro3	0,1650	0,1300	0,0648
centro1_centro4	0,1965	0,1072	0,0611
centro1_centro5	0,1658	0,1205	0,0635
centro2_centro3	0,0204	0,0484	0,0385
centro2_centro4	0,0360	0,0348	0,0225
centro2_centro5	0,0366	0,0377	0,0151
centro3_centro4	0,0524	0,0326	0,0202
centro3_centro5	0,0563	0,0273	0,0243
centro4_centro5	0,0374	0,0134	0,0079

GRÁFICOS.



PL máximo para cada posición de la prueba y cada operario.



Error de palpado de posición de la esfera para cada posición de la prueba y cada operario.

Tras la presentación de los resultados, se observa, para la evaluación de la “prueba de error de posición de la esfera”, un error muy superior en las evaluación realizada por el “operario 2” respecto al “operario 1”, visible para las posiciones 1 y 2. Esta diferencia, puede haber sido debida a la realización de una presión excesiva con el palpador sobre la esfera patrón durante la captura de puntos.

2.2.2. ERROR DE PALPADO DE TAMAÑO.

De los 25 puntos medidos por cada posición de la prueba, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados. Para cada una de las tres posiciones de la esfera, se determina la desviación del diámetro de la esfera comparándolo con el valor de calibración de la esfera. El mayor valor absoluto de los errores de diámetro para las tres posiciones de la esfera, es el error de palpado, *PS*, de tamaño.

A continuación se presentan los datos referentes a las esferas obtenidas, así como los errores para cada operario, así como gráficos comparativos. Para el cálculo de la siguiente evaluación es necesario conocer el dato del diámetro calibrado de la esfera patrón número 4 de la barra patrón de esferas, 21,9988 mm.

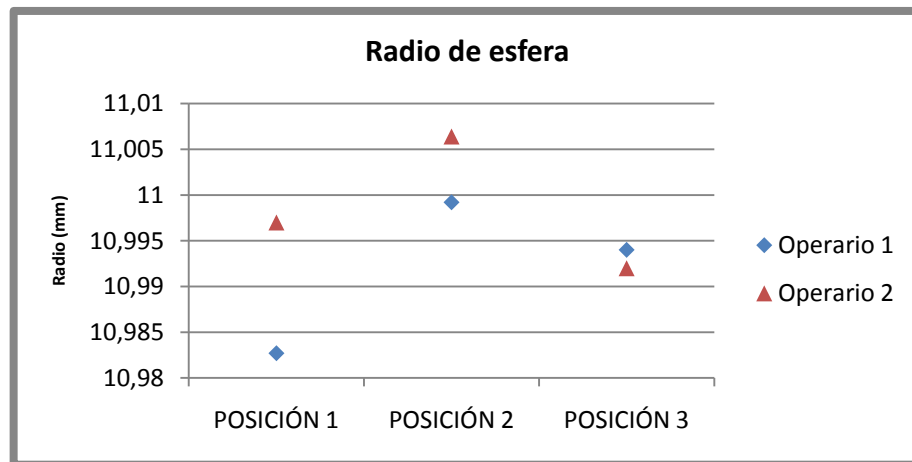
OPERARIO 1.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3
X	261,7892	-532,0465	223,9687
Y	182,5444	-599,8735	-778,2429
Z	-947,9976	155,8641	162,6644
Radio (mm)	10,9827	10,9992	10,994
Diámetro (mm)	21,9654	21,9984	21,988
PS (mm)	0,0334	0,0004	0,0108

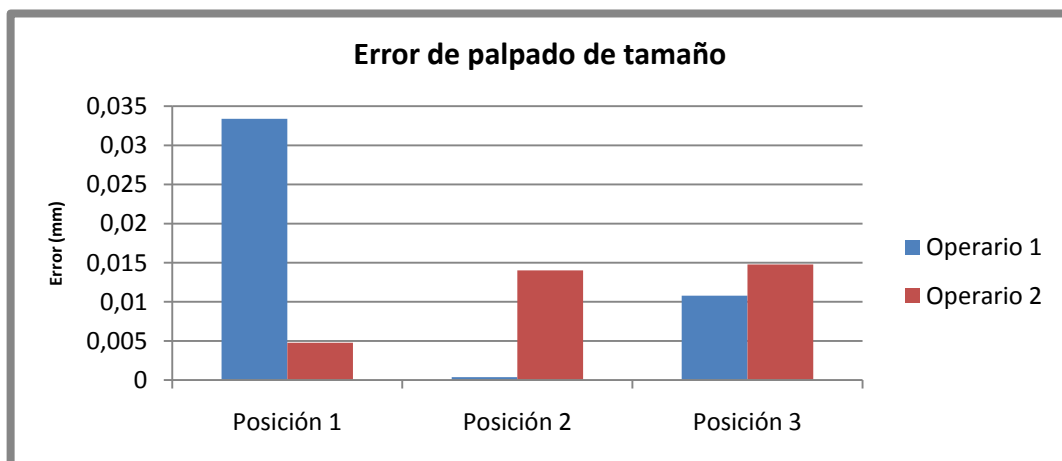
OPERARIO 2.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3
X	262,8851	-531,9947	223,9813
Y	182,5911	-599,8793	-778,2357
Z	-948,7361	155,791	162,7094
Radio (mm)	10,997	11,0064	10,992
Diámetro (mm)	21,994	22,0128	21,984
PS (mm)	0,0048	0,0140	0,0148

GRÁFICOS.



Radio de esfera obtenido para la evaluación de cada operario, según la posición de la prueba.



PS para cada posición de la prueba y cada operario.

Tras la presentación de los resultados, se observa, para la evaluación del “error de palpado de tamaño”, un error muy superior en la evaluación realizada por el “operario 1” respecto al “operario 2”, para la posición 1. Esta diferencia, se debe que el cálculo de la esfera se realiza, de acuerdo a la normativa, mediante la regresión gaussiana de 25 puntos, lo que conlleva, en caso de existir algún cierto punto de los 25 totales, con una cierta desviación, existe una influencia en el radio (diámetro) obtenido para la esfera en esa posición.

2.2.3. ERROR DE PALPADO DE FORMA.

De acuerdo a la regresión calculada para la evaluación anterior “error de palpado de tamaño”, se calcula para cada posición de la prueba, el rango de radios de todos los 25 puntos de medida, es decir, las distancias desde el centro común. El mayor de los rangos de los radios de las tres posiciones de la prueba es el error de palpado, *PF*, de forma.

A continuación se presentan los datos obtenidos para cada operario (radio máximo, radio mínimo y rango radios) en cada posición, así como gráficos comparativos.

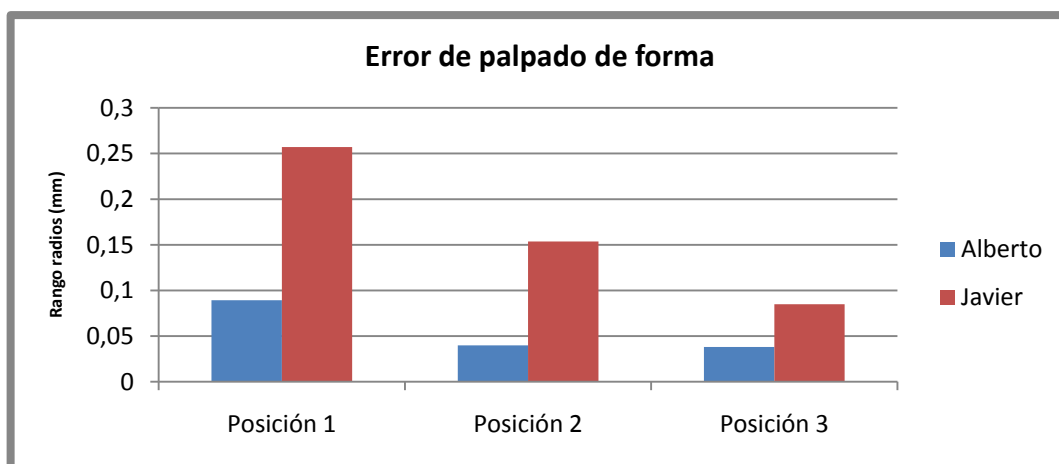
OPERARIO 1.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Radio máximo (mm)	11,0368	11,0189	11,0116
Radio mínimo (mm)	10,9475	10,9791	10,9735
Rango radios (mm)	0,0893	0,0399	0,0381

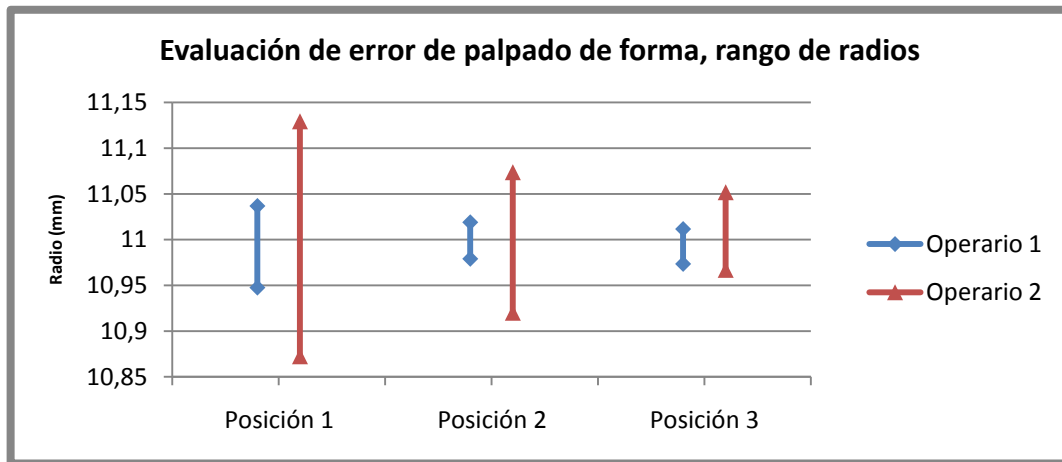
OPERARIO 2.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Radio máximo (mm)	11,1294	11,0738	11,0518
Radio mínimo (mm)	10,8724	10,9201	10,9669
Rango radios (mm)	0,2570	0,1537	0,0849

GRÁFICOS.



PF para cada posición de la prueba y cada operario.



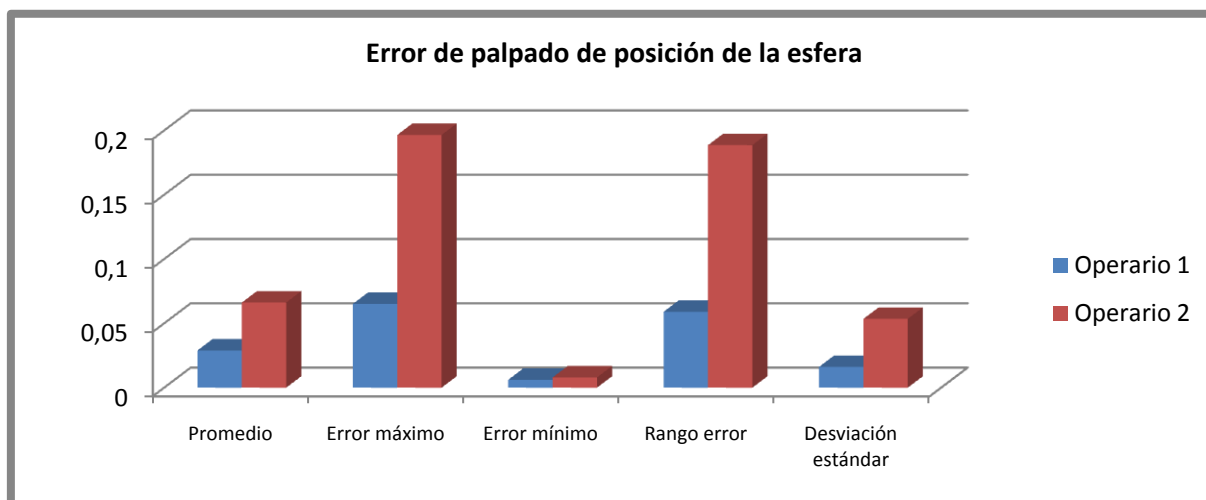
Rango de radios para cada posición y cada operario.

Tras la presentación de los resultados, se observa, para la evaluación del “error de palpado de forma”, rangos de radios superiores en las evaluación realizada por el “operario 2” respecto al “operario 1”, visible para las posiciones 1 y 2. Esta diferencia, se debe al mismo error que se muestra para el “error de palpado de posición de la esfera”, lo que significa que dicho operario 2, durante la captura de puntos mediante el brazo articulado, ejerció una presión excesiva con el palpador sobre la esfera patrón (radios menores) y en otros casos, ejerció una presión menor a la recomendable con el palpador sobre la esfera patrón (radios mayores).

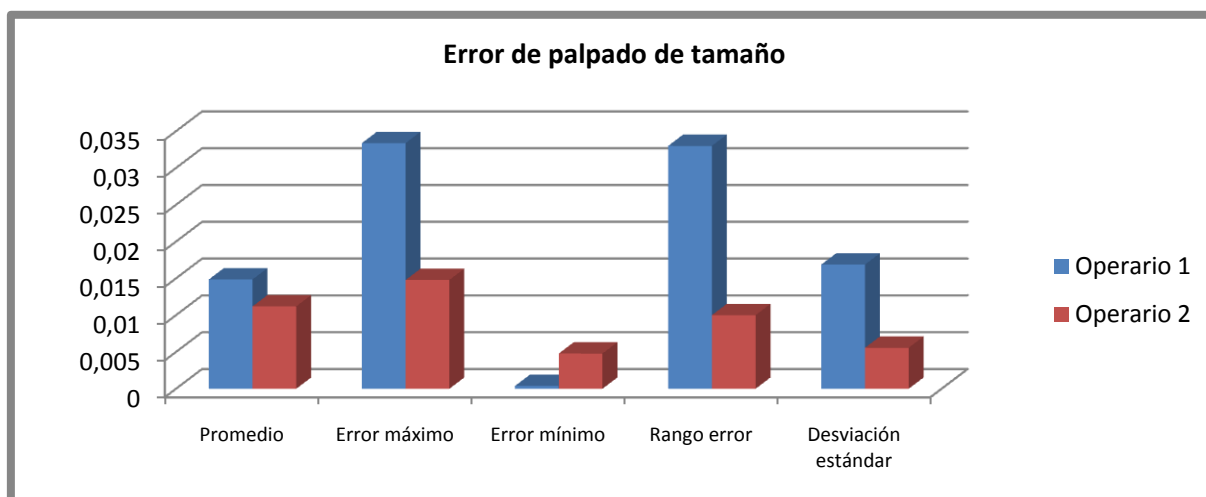
2.2.4. RESÚMEN DE LA PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.

A continuación, a modo de visión global, se resumen los datos obtenidos tras su análisis, mediante parámetros más generales como son: promedio del error, error máximo, error mínimo, rango de errores y desviación estándar, según la evaluación realizada y según el operario.

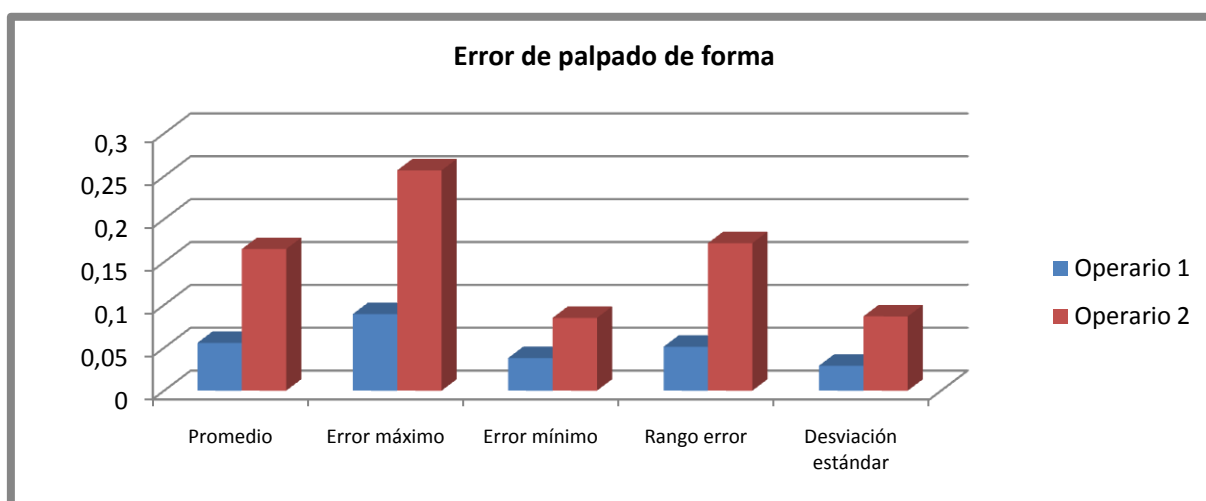
	Posición de la esfera, PL		Tamaño, PS		Forma, PF	
	Operario 1	Operario 2	Operario 1	Operario 2	Operario 1	Operario 2
Promedio (mm)	0,0289	0,0662	0,0148	0,0112	0,0558	0,1652
Error máximo (mm)	0,0651	0,1965	0,0334	0,0148	0,0893	0,2570
Error mínimo (mm)	0,0061	0,0079	0,0004	0,0048	0,0381	0,0849
Rango error (mm)	0,0590	0,1886	0,0330	0,0100	0,0512	0,1721
Desviación estándar	0,0161	0,0535	0,0169	0,0056	0,0291	0,0866



Parámetros generales de análisis para la evaluación 1, "error de palpado de posición de la esfera".



Parámetros generales de análisis para la evaluación 2, "error de palpado de tamaño".



Parámetros generales de análisis para la evaluación 3, "error de palpado de forma".

Los parámetros presentados para cada evaluación, permiten establecer ciertas conclusiones respecto a la prueba:

- El operario 2, influye de manera decisiva en la realización de la prueba, como demuestra su mayor promedio de errores y sus errores máximos analizados.
- La máquina de medición por coordenadas de brazo articulado evaluada, tiene capacidad de realizar mediciones de tamaño con un error mínimo entre 0,0004 - 0,0048 mm, como demuestran los valores mínimos de los errores para las evaluaciones de determinación del diámetro de la esfera patrón.
- El utilizar una gran cantidad de puntos de la esfera para caracterizarla, como ocurre en la evaluación de “error de palpado de tamaño”, aumenta el error cometido de la máquina, ya que la función regresión gaussiana para determina dicha esfera, se ve afectada de manera determinante por ciertos puntos que no han sido palpados correctamente durante la prueba.

2.3. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.

Es la segunda prueba realizada de acuerdo a la directriz “VDI/VDE 2617”. Consiste en verificar la capacidad de la máquina para determinar distancias cometiendo errores entre el error máximo permisible de indicación, MPE_E . La evaluación se lleva a cabo comparando los valores de calibrado de la barra patrón de esferas con los valores medidos, siendo necesario conocer los valores de distancia entre centros de esferas que aparecen en el certificado de calibración de la barra patrón.

Esta prueba realizada, a su vez, se realiza considerando el volumen completo de medición del brazo articulado, y posteriormente, considerando 4 volúmenes parciales indicados anteriormente en el documento “Memoria”.

2.3.1. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN COMPLETO.

Considerando el volumen de medición completo (2.400 mm), se realiza el procedimiento que describe la normativa, utilizando 7 disposiciones diferentes de la barra patrón dentro de dicho volumen de medición completo.

En cada una de las disposiciones, se caracterizan 5 longitudes entre centros de esferas, repitiendo 3 veces cada medida a determinar. Por tanto, 210 medidas de esferas serán efectuadas por cada operador para obtener un total de 105 longitudes entre centros de esferas.

Esta “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición completo”, fue realizada por dos operarios durante los días 14 y 18 de diciembre de 2009.

A continuación se detallan las longitudes caracterizadas en cada una de las siete disposiciones de la prueba, así como las esferas que determinan cada una de las longitudes.

		Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
DISPOSICIÓN 1	Distancia (mm)	1400	1200	1000	800	600
	Esferas	15 y 1	14 y 2	13 y 3	12 y 4	11 y 5
DISPOSICIÓN 2	Distancia (mm)	1400	1200	1000	800	600
	Esferas	15 y 1	14 y 2	13 y 3	12 y 4	11 y 5
DISPOSICIÓN 3	Distancia (mm)	1400	1200	1000	800	600
	Esferas	15 y 1	14 y 2	13 y 3	12 y 4	11 y 5
DISPOSICIÓN 4	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	13 y 1	12 y 2	11 y 3	10 y 4	9 y 5
DISPOSICIÓN 5	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	15 y 3	14 y 4	13 y 5	12 y 6	11 y 7
DISPOSICIÓN 6	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	13 y 1	12 y 2	11 y 3	10 y 4	9 y 5
DISPOSICIÓN 7	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	15 y 3	14 y 4	13 y 5	12 y 6	11 y 7



Disposición 1, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 2, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 3, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 4, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 5, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 6, dentro del volumen de medición completo.



Disposición 7, dentro del volumen de medición completo.

A continuación se presenta el conjunto de errores de indicación del tamaño de la medición obtenidos en la prueba de cada operario y el radio de las esferas determinadas, señalando en ambos casos, mediante sombreado, aquellos errores que han sido considerados espurios.

Los errores de indicación considerados espurios se han indicado en el documento “Memoria”, y aquellos radios de esferas considerados espurios tienen un radio $\pm 1\%$ mayor/menor que el radio teórico de cada esfera patrón (11 mm) de la barra patrón.

Asimismo, se adjunta un gráfico representativo de errores según disposiciones y un gráfico con todos los radios obtenidos, en los que se han obviado los valores espurios ya señalados, en ambas evaluaciones de cada operario.

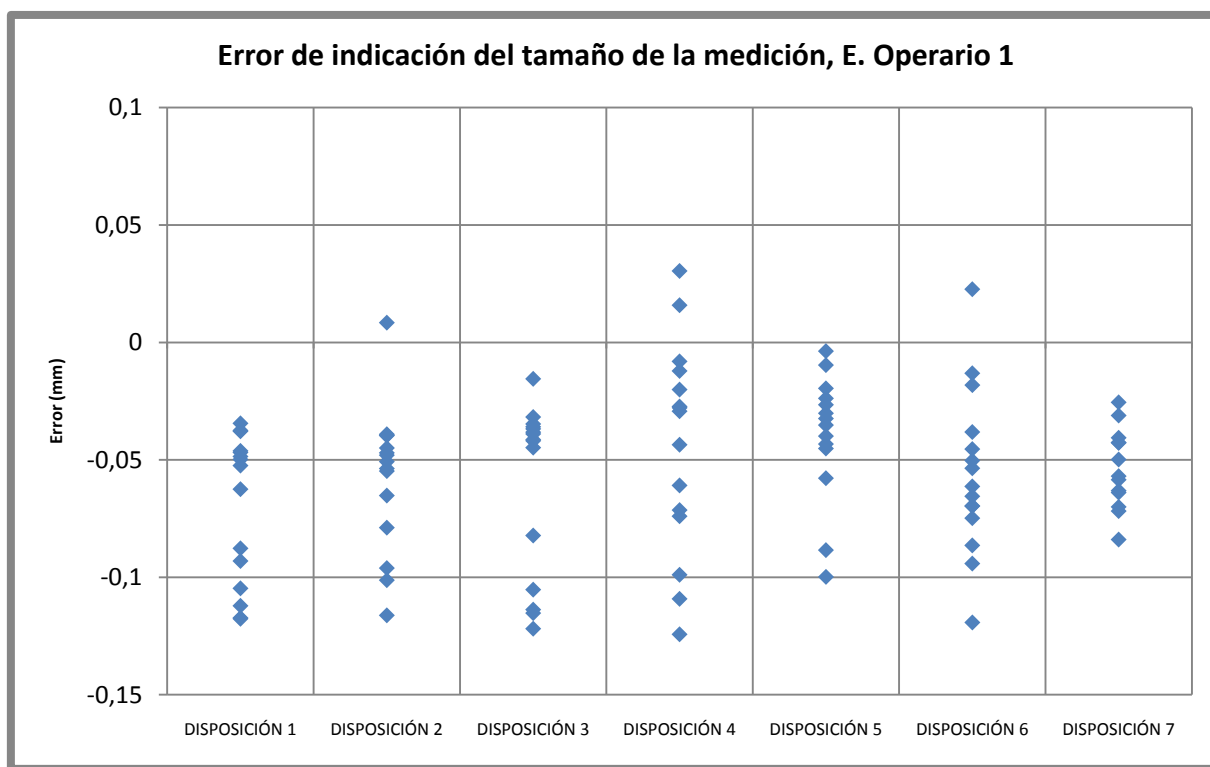
OPERARIO 1. ERRORES DE INDICACIÓN.

Error (mm)	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3	Disposición 4	Disposición 5	Disposición 6	Disposición 7
Longitud 1	-0,0378	-0,0470	-0,0382	-0,0081	-0,0578	-0,0613	-0,0839
	-0,1173	-0,1162	-0,1152	-0,1243	-0,0037	-0,0941	-0,0255
	-0,0625	-0,0548	-0,0419	-0,0278	-0,0998	-0,1192	-0,1810
Longitud 2	-0,0486	-0,0507	-0,0368	-0,0273	-0,0433	-0,0696	-0,0718
	-0,1121	-0,1012	-0,1219	-0,1091	-0,0301	-0,0864	-0,0427
	-0,0345	-0,0449	-0,0414	-0,0714	-0,1705	-0,0182	-0,1778
Longitud 3	-0,0498	-0,0480	-0,0347	-0,0436	-0,0399	-0,0697	-0,0631
	-0,1177	-0,0961	-0,1138	-0,0989	-0,0324	-0,0748	-0,0584
	-0,0524	-0,0537	-0,0448	0,0304	-0,0884	-0,0536	-0,0426
Longitud 4	-0,0468	-0,0396	-0,0359	-0,0200	-0,0352	-0,0503	-0,0569
	-0,1047	-0,0789	-0,1053	-0,0740	-0,0238	-0,0655	-0,0499
	-0,0462	-0,0391	-0,0389	-0,0293	-0,0096	0,0226	-0,0700
Longitud 5	-0,0930	0,0084	-0,0317	-0,0121	-0,0451	-0,0381	-0,0639
	-0,0877	-0,0652	-0,0822	-0,0609	-0,0266	-0,0454	-0,0406
	-0,0375	-0,0395	-0,0155	0,0158	-0,0196	-0,0131	-0,0311

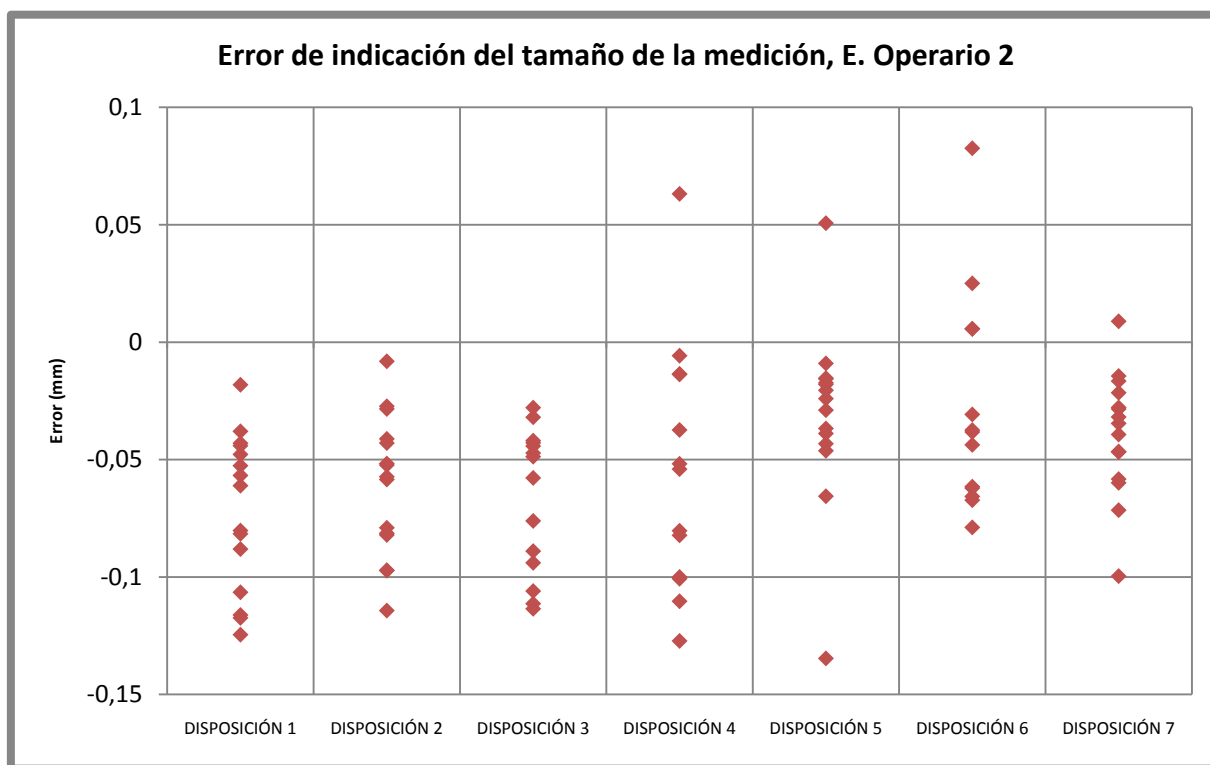
OPERARIO 2. ERRORES DE INDICACIÓN.

Error (mm)	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3	Disposición 4	Disposición 5	Disposición 6	Disposición 7
Longitud 1	-0,0567	-0,0585	-0,0472	-0,0518	-0,0156	-0,0657	-0,0996
	-0,1174	-0,1143	-0,1113	-0,1272	-0,0153	-0,0673	-0,0144
	-0,0182	-0,0273	-0,0890	-0,0803	-0,0241	0,0825	-0,0346
Longitud 2	-0,0441	-0,0517	-0,0428	-0,3839	-0,0389	-0,0615	-0,0715
	-0,1162	-0,0971	-0,1135	-0,1000	-0,0367	-0,0788	-0,0284
	-0,0816	-0,0821	-0,0419	-0,6093	-0,0433	-0,0383	0,0089
Longitud 3	-0,0526	-0,0081	-0,0443	-0,0374	-0,0205	-0,0621	-0,0583
	-0,1246	-0,0973	-0,1060	0,0631	-0,0463	0,1734	-0,0468
	-0,0802	-0,0523	-0,0578	-0,1008	-0,1347	0,0057	-0,0166
Longitud 4	-0,0430	-0,0412	-0,0319	-0,1103	0,0507	-0,0437	-0,0599
	-0,1065	-0,0813	-0,0939	-0,0822	-0,0289	-0,4156	-0,0393
	-0,0611	-0,0430	-0,1732	-0,0137	-0,0180	0,0250	-0,0215
Longitud 5	-0,0380	-0,0284	-0,0279	-0,0135	-0,0656	-0,0307	-0,0318
	-0,0881	-0,0573	-0,0761	-0,0541	-0,0173	-0,0374	-0,0278
	-0,0478	-0,0790	-0,0488	-0,0058	-0,0091	0,0057	-0,0466

GRÁFICOS. ERRORES DE INDICACIÓN.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen completo, según disposiciones. Operario 1.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen completo, según disposiciones. Operario 2.

OPERARIO 1. RADIOS DE ESFERAS.

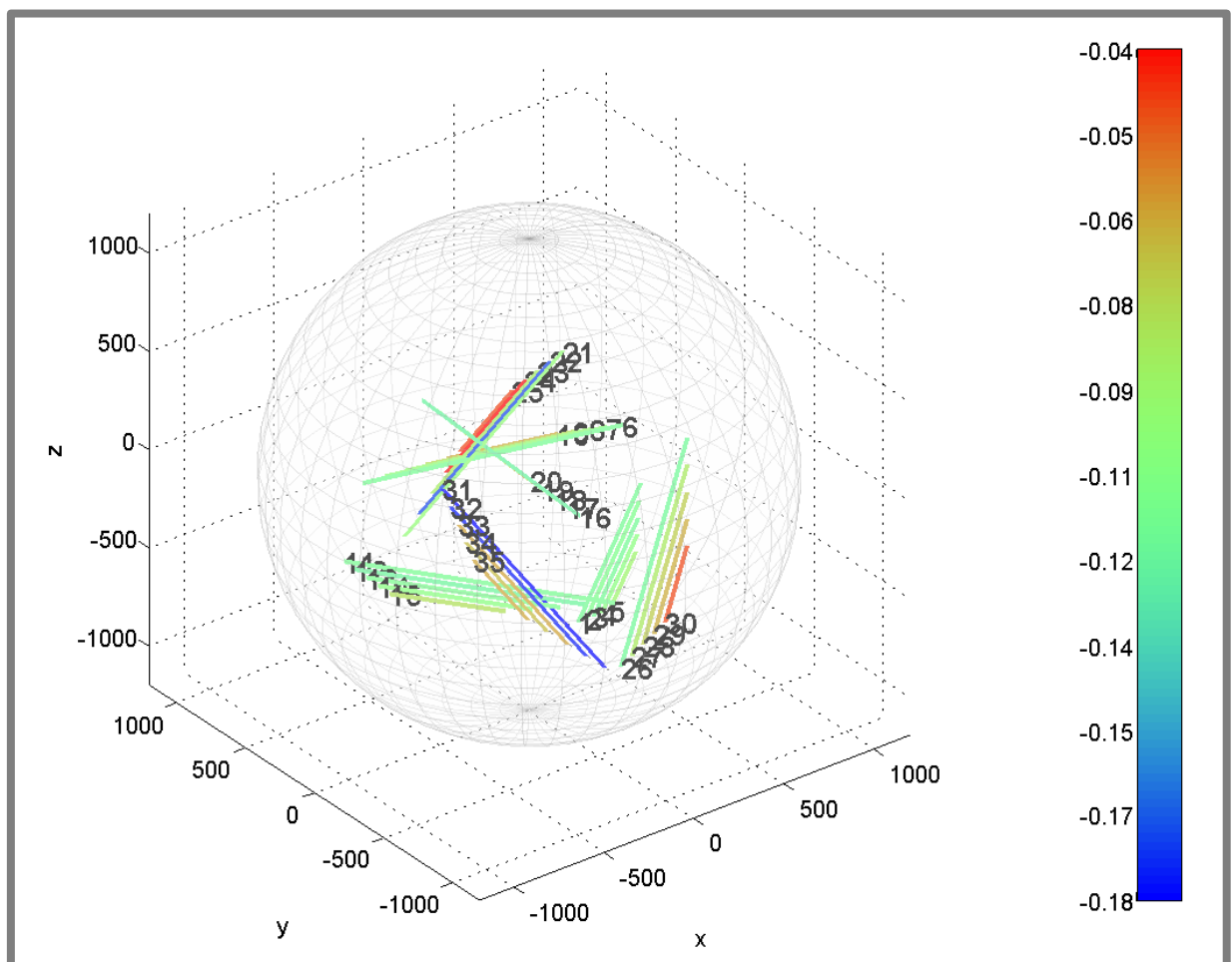
Radio (mm)	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3	Disposición 4	Disposición 5	Disposición 6	Disposición 7
Longitud 1 Esfera inicial	10,988	10,9872	10,987	10,9926	10,9764	10,9863	10,9865
	10,9929	10,9935	10,9879	11,0007	10,9857	10,9928	10,9853
	10,9896	10,983	10,9798	10,9884	10,9886	10,9908	11,0185
Longitud 1 Esfera final	10,9903	10,9924	10,9911	10,9813	10,9948	10,9905	10,9905
	10,9889	10,9923	10,9911	10,9852	11,0022	10,9901	10,9953
	10,9899	10,9865	10,9897	11,0026	10,9962	11,0125	10,9989
Longitud 2 Esfera inicial	10,9882	10,9894	10,988	10,9918	10,9815	10,9956	10,983
	10,9921	10,9906	10,9916	10,9945	10,9899	10,9939	10,9871
	10,9774	10,9863	11,0022	10,9911	10,9945	10,9856	11,0108
Longitud 2 Esfera final	10,9901	10,9882	10,9899	10,9855	10,9909	10,9967	10,9937
	10,9918	10,9947	10,9934	10,994	10,9933	10,9918	10,9966
	10,9984	10,99	10,9874	10,9819	10,8973	10,9966	10,9589
Longitud 3 Esfera inicial	10,9911	10,9885	10,9882	10,9913	10,9877	10,9919	10,9852
	10,9945	10,9915	10,9889	10,9946	10,9903	10,9935	10,9898
	10,9961	10,9996	11,0052	11,0042	10,9767	10,97	10,9982
Longitud 3 Esfera final	10,9908	10,9886	10,9925	10,9896	10,9925	10,9932	10,9918
	10,9931	10,991	10,9938	10,9864	10,9887	10,9848	10,9952
	10,9889	10,9822	10,9905	11,0101	10,9874	11,0863	11,0011
Longitud 4 Esfera inicial	10,9912	10,9911	10,991	10,992	10,9796	10,9943	10,9883
	10,992	10,9902	10,9918	10,9919	10,9871	10,9951	10,9952
	10,9914	10,9935	11,0054	10,9938	10,975	11,002	10,9947
Longitud 4 Esfera final	10,9914	10,9922	10,9891	10,9918	10,9919	10,9905	10,9954
	10,9914	10,9931	10,9921	10,9748	10,9944	10,9919	10,9977
	10,9994	10,9902	10,984	11,0023	10,9977	10,9947	10,9889
Longitud 5 Esfera inicial	10,9901	11,0157	10,9928	10,9955	10,9989	10,995	10,9914
	10,9922	10,9922	10,9915	10,9959	10,9937	10,9922	10,9981
	10,9912	10,9903	10,9988	10,9959	10,9963	10,9946	10,9986
Longitud 5 Esfera final	10,9935	10,9927	10,9913	10,9909	10,9908	10,9951	10,991
	10,9949	10,9962	10,9908	10,9944	10,9884	10,9891	10,9937
	10,9889	10,9893	10,9866	10,9948	10,9892	11,0015	10,9893

OPERARIO 2. RADIOS DE ESFERAS.

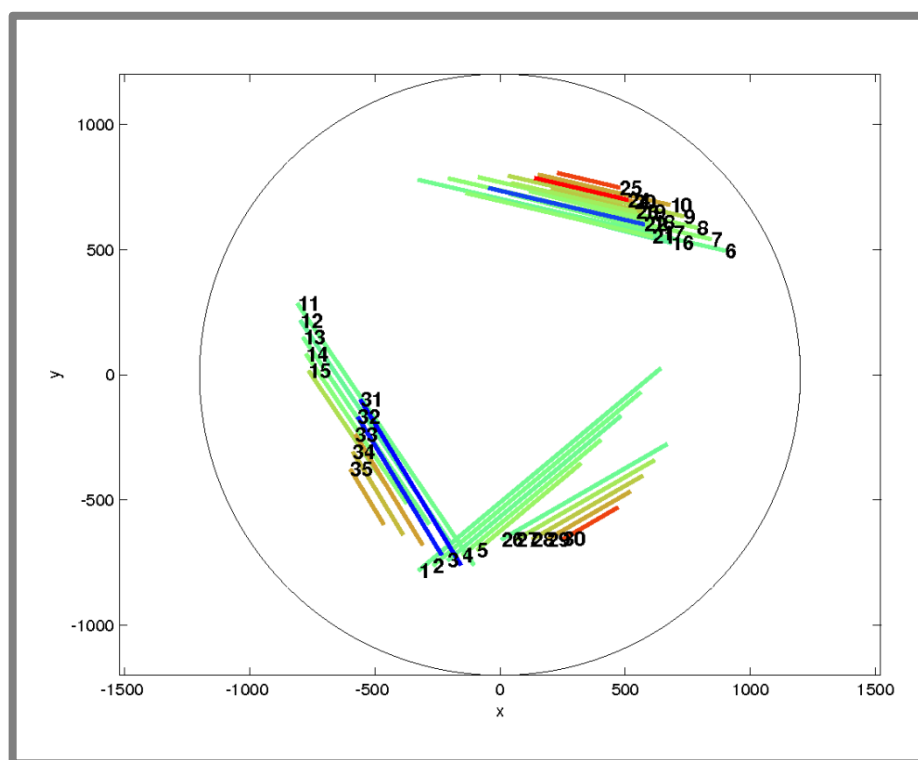
Radio (mm)	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3	Disposición 4	Disposición 5	Disposición 6	Disposición 7
Longitud 1 Esfera inicial	10,9938	10,9866	10,9873	10,9953	10,994	11,0035	10,9899
	10,9937	10,9882	10,9932	10,993	10,9865	10,9904	10,9898
	11,0274	11,05	10,9895	10,9924	10,9925	11,1843	10,9954
Longitud 1 Esfera final	10,9921	10,9931	10,9931	10,9914	10,9944	10,9914	10,9954
	10,9867	10,9898	10,9911	10,9959	10,9942	10,9797	10,9994
	11,0699	10,9918	10,9842	11,0448	10,9958	10,996	10,9956
Longitud 2 Esfera inicial	10,9919	10,9937	10,992	10,9983	10,9916	11,0043	10,9925
	10,992	10,9902	10,9889	10,9926	10,9905	10,9901	10,9873
	10,9945	10,9908	11,1449	10,9933	10,9918	11,0189	10,9895
Longitud 2 Esfera final	10,9944	10,991	10,9953	11,1576	10,9954	10,9925	10,9969
	10,9894	10,9905	10,9949	10,9881	10,997	10,9908	10,9972
	10,9886	10,9943	10,9953	10,9842	10,9969	10,9888	10,9909
Longitud 3 Esfera inicial	10,9918	10,9926	10,9944	10,9971	10,9885	10,9995	16,9927
	10,9909	10,9916	10,9978	11,0556	10,9954	11,1097	10,9912
	10,9936	10,9939	11,0032	10,9946	10,9893	10,9944	10,9904
Longitud 3 Esfera final	10,9875	11,1178	10,9935	10,9923	10,9978	10,993	11,0004
	11,0422	10,9907	10,993	10,9922	10,9952	10,991	10,9964
	10,999	10,9958	11,0166	10,9925	10,9224	11,0796	11,0024
Longitud 4 Esfera inicial	10,9945	10,9919	10,9952	10,9915	11,0794	10,996	10,9951
	10,9911	10,9896	10,9918	10,9941	10,992	10,9949	10,9923
	10,9936	10,9955	11,0954	11,0002	10,9899	11,0304	10,9947
Longitud 4 Esfera final	10,995	10,991	10,9955	10,9934	11,0388	10,9924	10,997
	10,9906	10,9969	10,9928	10,9912	10,9974	11,184	11,0014
	10,9956	10,9999	11,137	10,9907	10,9943	11,0268	10,992
Longitud 5 Esfera inicial	10,99	10,9971	10,9899	10,9964	11,0235	10,9977	10,9902
	10,9939	10,9929	10,9933	10,9985	10,9935	10,9947	10,9903
	10,9982	10,9524	10,9903	11,0678	10,9949	11,0651	10,9955
Longitud 5 Esfera final	10,9933	10,9943	10,9897	10,9932	11,0006	10,9968	10,9911
	10,9955	10,9936	10,9963	10,9922	10,9975	10,9929	10,9927
	10,9978	10,9946	10,9942	10,9908	10,9915	10,996	10,9918

Finalmente, desde la perspectiva de la precisión evaluada de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado, se adjunta una representación del volumen de medición completo con las diferentes disposiciones de la barra patrón de esferas en el que figuran las longitudes medidas. El gráfico muestra, en un mapa de colores, una mayor o menor precisión en la medición, determinada por el error cometido. Para cada disposición del patrón, se visualizan 5 longitudes que corresponden a aquellas en las que el error ha sido el máximo de cada una de las 3 repeticiones por longitud evaluada.

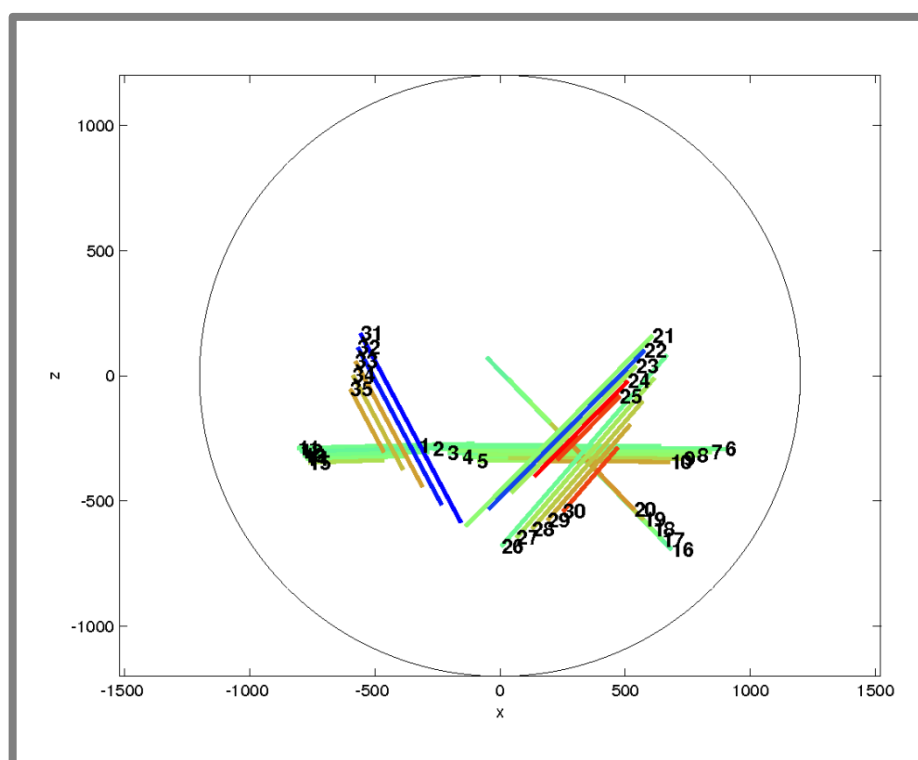
Indicar también que el mapa de colores siguiente, es realizado a partir de los datos del operario 1, ya que la influencia del operario en sus mediciones es menor, como veremos en las conclusiones del resumen de la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”.



Mapa de color para el error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición completo.



Vista superior del volumen de medición completo.



Vista frontal del volumen de medición completo.

Se destaca del mapa de color presentado que predominan los errores que se corresponden en el espectro de 0,08-0,12 mm.

Las longitudes cuyo error hemos destacado anteriormente, como dato espurio, debido a interferencia del operario, se observan claramente en la vista frontal, en color azul.

En otras disposiciones, se observan colores (marrón y rojo) que se corresponden con los errores de indicación menores. Para estas disposiciones, mayoritariamente la 6 y 7, se destaca que la máquina muestra mayor precisión, debido fundamentalmente a la cercanía de esas disposiciones con la base del brazo, y a que no se realizan movimientos bruscos del brazo articulado para esas mediciones entre esferas patrón.

2.3.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN PARCIAL.

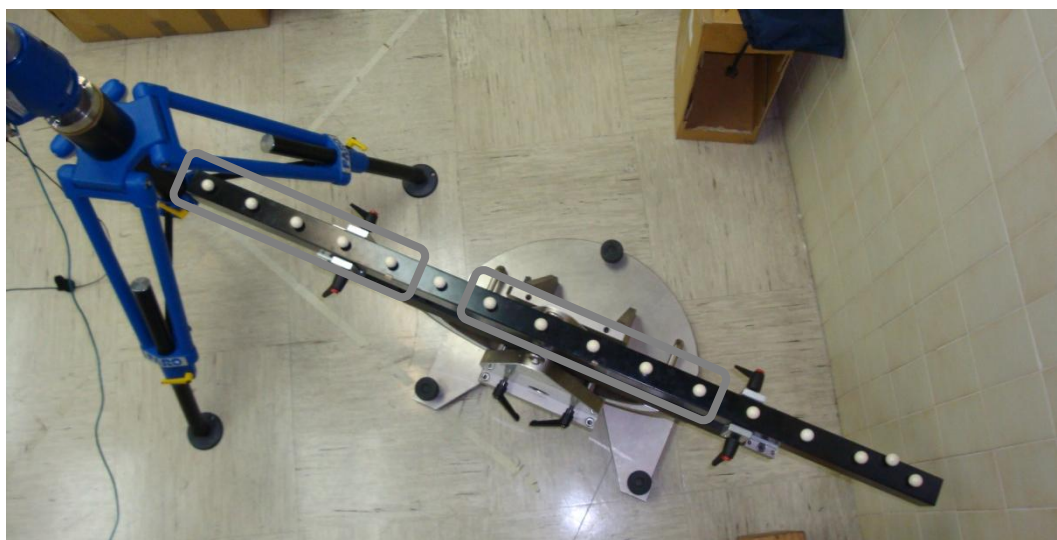
Considerando el volumen de medición completo de alcance del brazo, es dividido en 4 volúmenes parciales (indicados en el documento “Memoria”). En cada volumen parcial, el patrón se mide en 3 disposiciones distintas, una disposición radial respecto a la base del brazo y dos disposiciones ortogonales respecto al eje del brazo articulado.

En cada disposición, se caracterizan 5 longitudes entre centros de esferas, repitiendo 3 veces cada medida a determinar. Por tanto, 360 medidas de esferas serán efectuadas por cada operador para obtener un total de 180 longitudes entre centros de esferas.

Esta “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición parcial”, fue realizada por dos operarios durante los días 11, 12 y 14 de diciembre de 2009.

A continuación se detallan las longitudes caracterizadas en cada una de las siete disposiciones de la prueba, así como las esferas que determinan cada una de las longitudes.

		Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
DISPOSICIÓN RADIAL	Distancia (mm)	1000	800	600	400	200
	Esferas	15 y 5	14 y 6	13 y 7	12 y 8	11 y 9
DISPOSICIÓN ORTOGONAL 1	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	13 y 1	12 y 2	11 y 3	10 y 4	9 y 5
DISPOSICIÓN ORTOGONAL 2	Distancia (mm)	1200	1000	800	600	400
	Esferas	15 y 3	14 y 4	13 y 5	12 y 6	11 y 7



Disposición radial, dentro del volumen de medición parcial.



Disposición ortogonal 1, dentro del volumen de medición parcial.



Disposición ortogonal 2, dentro del volumen de medición parcial.

A continuación se presenta el conjunto de errores de indicación del tamaño de la medición obtenidos en la prueba de cada operario y el radio de las esferas determinadas, señalando en ambos casos, mediante sombreado, aquellos errores que han sido considerados espurios.

Los errores de indicación considerados espurios se han indicado en el documento “Memoria”, y aquellos radios de esferas considerados espurios tienen un radio $\pm 1\%$ mayor/menor que el radio teórico de cada esfera patrón (11 mm) de la barra patrón.

Asimismo, se adjunta un gráfico representativo de errores según disposiciones y un gráfico con todos los radios obtenidos, en los que se han obviado los valores espurios ya señalados, en ambas evaluaciones de cada operario.

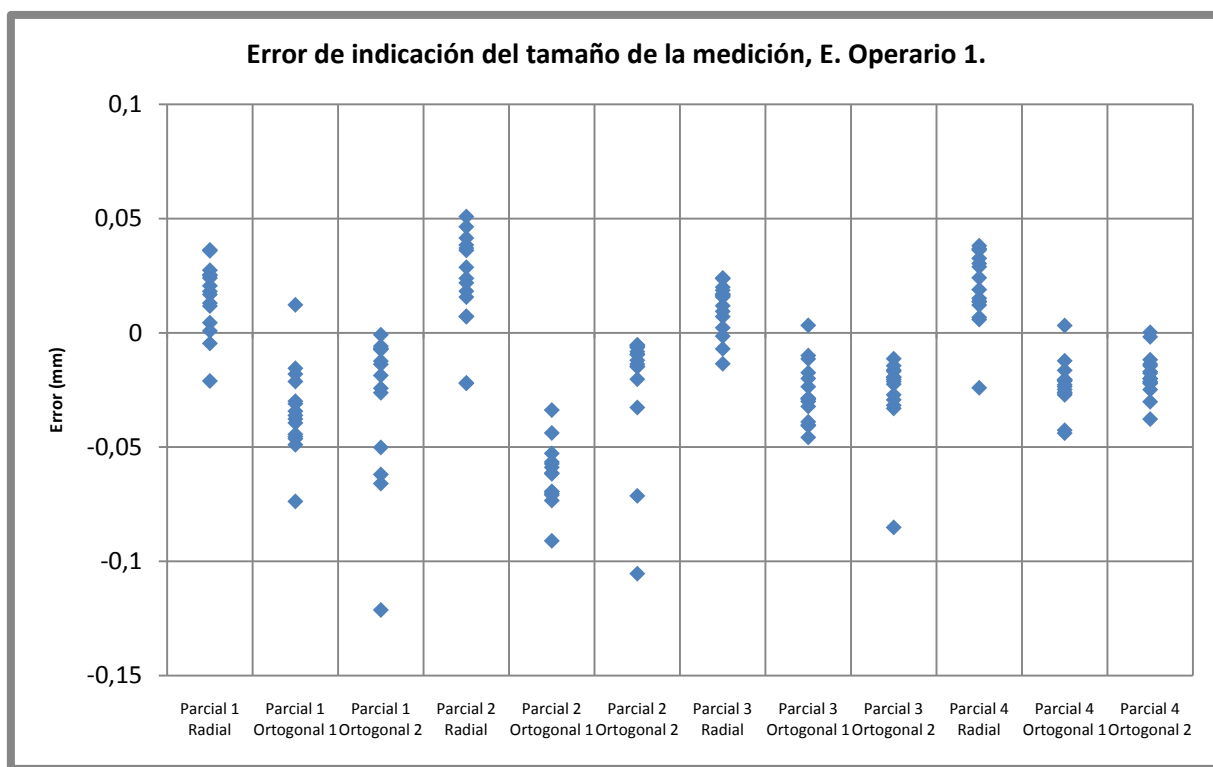
OPERARIO 1. ERRORES DE INDICACIÓN.

Error (mm)		Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 1	Radial	0,0251	0,0363	0,0181	0,0117	0,0044
		0,0359	0,0254	0,0274	0,0168	0,0008
		-0,0046	0,0240	0,0206	0,0130	-0,0211
	Ortogonal 1	-0,0180	-0,0361	-0,0463	-0,0444	-0,0343
		-0,0155	-0,0377	-0,0299	-0,0394	-0,0310
		0,0122	-0,0213	-0,0490	-0,0738	-0,0454
	Ortogonal 2	-0,0501	-0,0620	-0,0008	-0,0262	-0,0068
		-0,0124	-0,0243	-0,0068	-0,0074	-0,0138
		-0,1213	-0,0660	-0,0059	-0,0186	-0,3101
Parcial 2	Radial	0,0509	0,0415	0,0219	0,0239	0,0157
		0,0464	0,0384	0,0287	0,0183	0,0072
		0,0371	-0,0219	0,0361	-0,0221	0,0071
	Ortogonal 1	-0,0703	-0,0695	-0,0617	-0,0574	-0,0338
		-0,0695	-0,0589	-0,0734	-0,0528	-0,0438
		0,2378	-0,0614	-0,0565	-0,0910	-0,0710
	Ortogonal 2	-0,1054	-0,0713	-0,0096	-0,0093	-0,0137
		-0,0203	-0,0055	-0,0060	-0,0052	-0,0083
		-0,0327	-0,0149	-0,0120	-0,0146	-0,0065
Parcial 3	Radial	0,0200	0,0237	0,0186	0,0162	0,0071
		-0,0070	0,0240	0,0157	0,0167	0,0022
		-0,0135	0,0170	-0,0015	0,0119	0,0094
	Ortogonal 1	-0,0114	-0,0286	-0,0403	-0,0322	-0,0236
		0,0033	-0,0287	-0,0407	-0,0389	-0,0292
		-0,0200	-0,0301	-0,0100	-0,0457	-0,0174
	Ortogonal 2	0,4115	-0,0144	-0,0331	-0,0213	-0,0194
		-0,0851	-0,0317	-0,0293	-0,0204	-0,0225
		-0,0194	-0,0271	-0,0113	-0,0168	-0,0163
Parcial 4	Radial	0,0303	0,0381	0,0289	0,0138	0,0151
		0,0368	0,0362	0,0241	0,0135	0,0058
		0,0067	0,0326	0,0189	-0,0240	0,0121
	Ortogonal 1	0,0032	-0,0205	-0,0426	-0,0235	-0,0122
		-0,0207	-0,0261	-0,0272	-0,0211	-0,0205
		-0,0164	-0,0248	-0,0227	-0,0439	-0,0263
	Ortogonal 2	-0,0017	-0,0215	-0,0170	-0,0118	-0,0177
		-0,0144	-0,0202	-0,0200	-0,0214	-0,0222
		0,0002	-0,0137	-0,0249	-0,0377	-0,0301

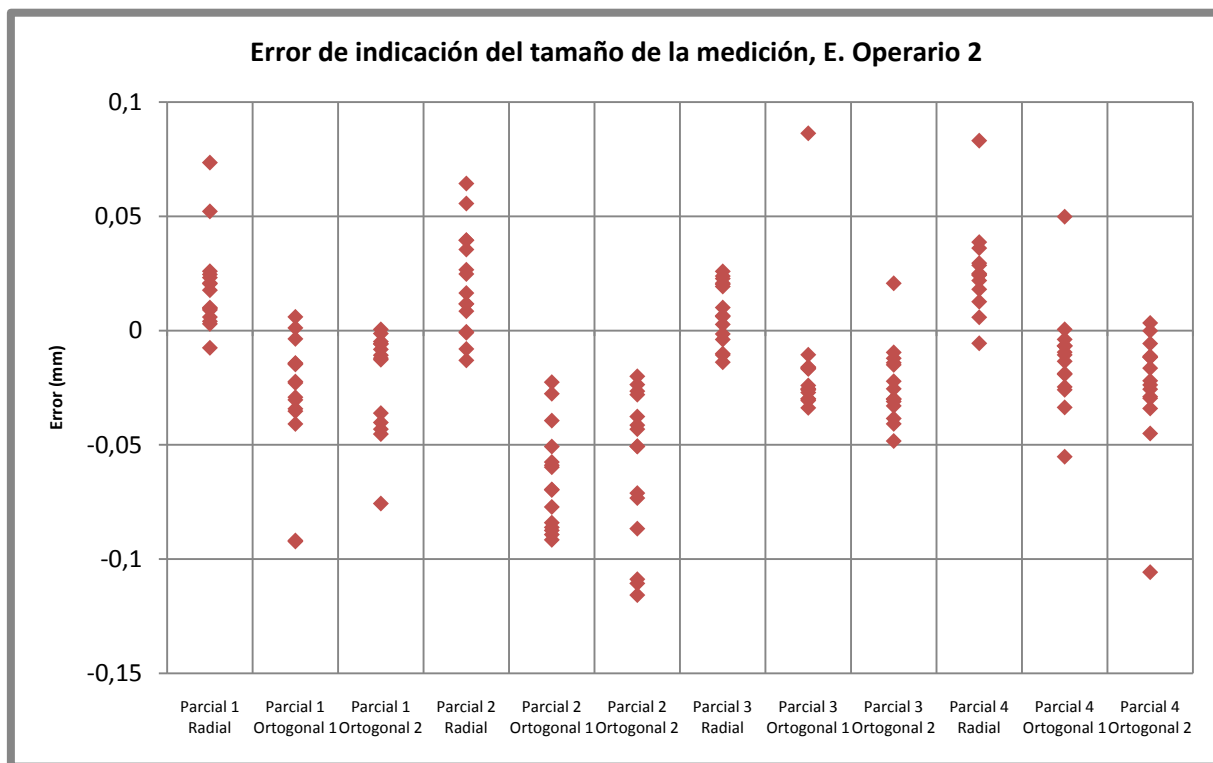
OPERARIO 2. ERRORES DE INDICACIÓN.

Error (mm)		Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 1	Radial	0,0735	0,0232	0,0208	0,0205	0,0097
		0,0521	0,0246	0,0177	0,0101	0,0041
		0,0091	0,0260	0,0059	0,0029	-0,0075
	Ortogonal 1	-0,0923	-0,0303	-0,0291	-0,0144	-0,0148
		-0,0919	-0,0409	-0,0353	-0,0342	-0,0223
		0,0060	-0,0036	-0,0229	-0,0142	0,0012
	Ortogonal 2	-0,0757	-0,0431	-0,0058	-0,0361	-0,0121
		1,0588	-0,0048	-0,0058	-0,0082	-0,0013
		-0,0453	-0,0127	-0,0402	-0,0108	0,0005
Parcial 2	Radial	0,0643	0,0396	0,0396	0,0164	0,0085
		0,0556	0,0355	0,0248	0,0116	0,0118
		0,0266	-0,0009	-0,0006	-0,0130	-0,0080
	Ortogonal 1	-0,0893	-0,0772	-0,0695	-0,0589	-0,0394
		-0,0841	-0,0875	-0,0598	-0,0576	-0,0276
		-0,0861	-0,0915	-0,0697	-0,0508	-0,0226
	Ortogonal 2	-0,0376	-0,0506	-0,0414	-0,0200	-0,0280
		-0,0733	-0,1158	-0,0265	-0,0432	-0,0236
		-0,1088	-0,1106	-0,0867	-0,0711	-0,0507
Parcial 3	Radial	0,0207	0,0239	0,0193	0,0027	0,0061
		0,0259	0,0202	0,0228	0,0101	0,0065
		-0,0015	-0,0106	-0,0138	-0,0101	-0,0039
	Ortogonal 1	-0,0106	-0,0165	-0,0271	-0,0298	-0,0161
		-0,0254	-0,0160	-0,0338	-0,0300	-0,0259
		-0,0240	-0,0167	-0,0306	-0,0258	0,0864
	Ortogonal 2	0,5086	0,0207	-0,0310	-0,0385	-0,0255
		-0,0299	-0,0301	-0,0408	-0,0330	-0,0222
		-0,0150	-0,0483	-0,0095	-0,0141	-0,0121
Parcial 4	Radial	0,0361	0,0286	0,0245	0,0250	0,0387
		0,0831	0,0295	0,0242	0,0219	0,0058
		-0,0055	0,4201	0,4954	0,0126	0,0181
	Ortogonal 1	0,0005	-0,0038	-0,0552	-0,0106	-0,0191
		-0,0067	-0,0067	-0,0259	-0,0247	-0,0094
		0,0498	-0,0336	-0,0134	-0,0188	-0,0067
	Ortogonal 2	-0,0450	-0,1057	-0,0289	-0,0001	-0,0164
		-0,0257	-0,0341	-0,0296	-0,0238	-0,0220
		0,0033	-0,0056	-0,0116	-0,0112	-0,0117

GRÁFICOS. ERRORES DE INDICACIÓN.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen parcial, según disposiciones. Operario 1.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen parcial, según disposiciones. Operario 2.

OPERARIO 1. RADIOS DE ESFERAS.

Radio (mm)			Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 1	Radial	Esfera inicial	10,9876	10,9867	10,99	10,9919	10,9871
			10,9808	10,99	10,9867	10,9875	10,99
			10,9925	10,9876	10,9999	10,9886	10,9882
		Esfera final	10,9965	10,993	10,9891	10,9922	10,9902
			10,9894	10,9927	10,9899	10,9933	10,99
			10,9896	11,0019	10,9912	10,9884	11,0025
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9943	10,9848	10,9806	10,9823	10,9902
			10,9845	10,9825	10,9865	10,993	10,9894
			10,9901	10,9946	11,0183	10,9628	10,9812
		Esfera final	10,9905	10,9713	10,9855	10,9921	10,9867
			10,9818	10,9839	10,9783	10,9867	10,9848
			10,9545	10,9603	10,9357	10,9448	10,977
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9728	10,9406	10,9776	10,9836	10,9856
			10,9781	10,9749	10,9709	10,9814	10,9828
			10,9746	10,9882	10,9745	11,005	10,6409
		Esfera final	10,9878	10,9861	10,9869	10,9925	10,9901
			10,983	10,9873	10,9886	10,9904	10,9899
			10,993	10,9763	10,9878	10,9789	11,0011
Parcial 2	Radial	Esfera inicial	10,9807	10,9837	10,9912	10,984	10,989
			10,9861	10,9877	10,9912	10,9906	10,9912
			11,0289	10,9556	10,9938	10,9917	10,9866
		Esfera final	10,9956	10,9925	10,9886	10,9901	10,9911
			10,9906	10,9914	10,9912	10,9924	10,9878
			10,9928	11,0004	10,9938	10,9836	10,9911
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9937	10,987	10,9968	10,992	10,9872
			10,9975	10,988	10,9962	10,9962	10,9903
			10,9759	10,984	10,9969	10,9928	10,9924
		Esfera final	10,9828	10,9842	10,9868	10,9807	10,9909
			10,9789	10,9815	10,9875	10,9884	10,9889
			10,999	11,0459	10,9789	10,9754	10,9931
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9857	10,9835	10,9892	10,9897	10,9916
			10,9949	10,9918	10,9919	10,9964	10,987
			10,9738	10,9993	10,9906	10,9957	10,9968
		Esfera final	10,9894	10,9958	10,9949	10,9942	10,9885
			10,9902	10,9989	10,9988	10,9934	10,9962
			10,9907	10,9927	11,0571	10,9919	11,0034

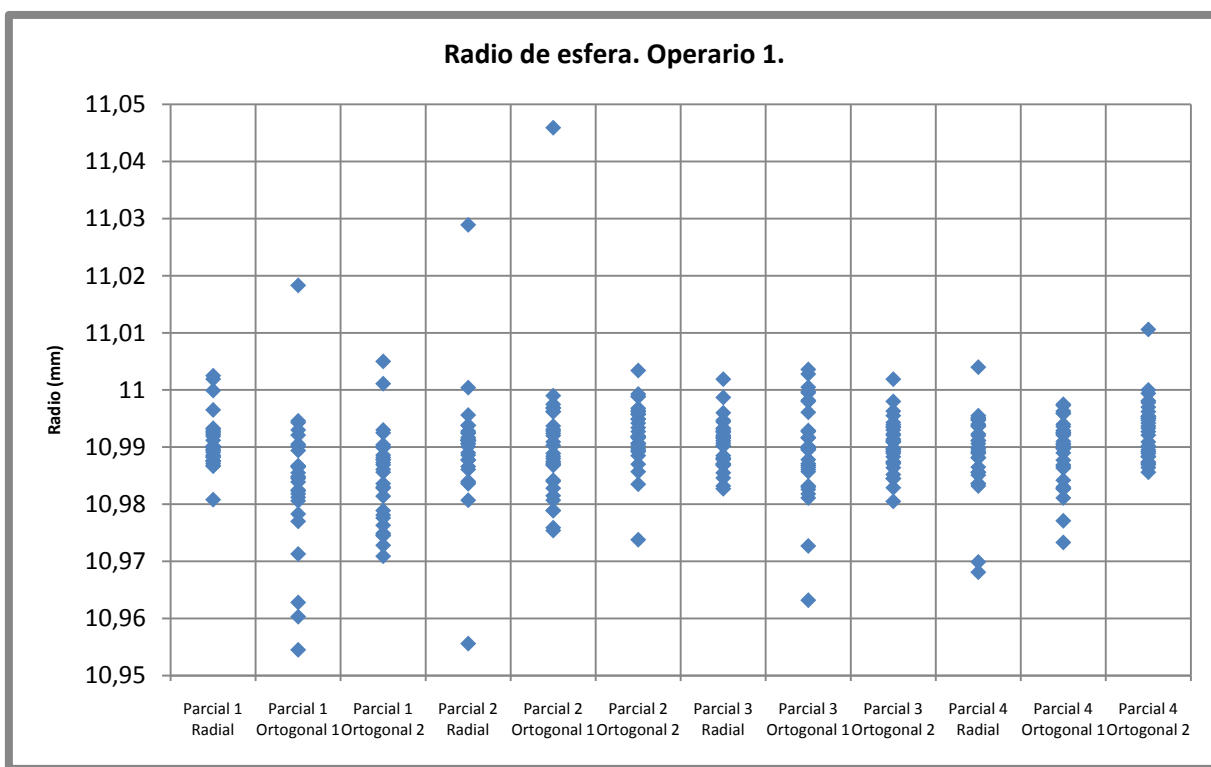
Radio (mm)			Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 3	Radial	Esfera inicial	10,9855	10,9927	10,9881	10,9871	10,987
			10,9846	10,9917	10,9903	10,9885	10,9868
			10,9932	10,9869	10,9832	10,9827	11,0019
		Esfera final	10,9878	10,9928	10,9911	10,9918	10,9926
			10,9915	10,9947	10,9933	10,9907	10,988
			10,9987	10,9944	10,9902	10,9921	10,996
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9826	10,9818	10,9899	10,9916	10,9898
			10,9961	10,9857	10,9865	10,9895	10,9897
			11,0036	10,9917	10,9995	10,9901	11,0028
		Esfera final	10,9727	10,9832	10,9811	10,983	10,9878
			10,9632	10,9861	10,9868	10,9871	10,9929
			10,9997	10,9927	10,998	11,0005	10,9982
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9805	10,9883	10,9871	10,9892	10,9914
			10,9864	10,9852	10,9845	10,9889	10,9935
			10,9829	11,0019	10,9893	10,9921	10,9909
		Esfera final	10,9874	10,9955	10,9935	10,998	10,9943
			10,9898	10,9874	10,9909	10,9939	10,9923
			10,9845	10,9896	10,9963	10,9912	10,993
Parcial 4	Radial	Esfera inicial	10,9882	10,9865	10,9851	10,9912	10,9881
			10,9856	10,9906	10,9897	10,9893	10,9938
			10,9911	10,9891	10,9856	10,9836	10,9889
		Esfera final	10,995	10,994	10,9936	10,992	10,9952
			10,9955	10,9949	10,9923	10,99	10,9947
			11,004	10,9836	10,9832	10,9699	10,9681
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9963	10,9926	10,989	10,994	10,9904
			10,9842	10,9959	10,9973	10,9897	10,991
			10,9869	10,9975	10,9959	10,9866	10,9898
		Esfera final	10,9827	10,983	10,9923	10,9925	10,9921
			10,9811	10,9929	10,9877	10,9863	10,9936
			10,9827	10,9733	10,9901	10,9906	10,9771
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9856	10,9921	10,9884	10,9902	10,9895
			10,99	10,9892	10,9883	10,9889	10,9954
			11,0106	10,9951	10,9869	10,9874	10,9864
		Esfera final	10,9927	10,9942	10,9962	10,9947	10,9981
			10,995	10,9994	10,9954	10,997	10,9909
			10,9937	10,9933	10,9872	10,9978	11

OPERARIO 2. RADIOS DE ESFERAS.

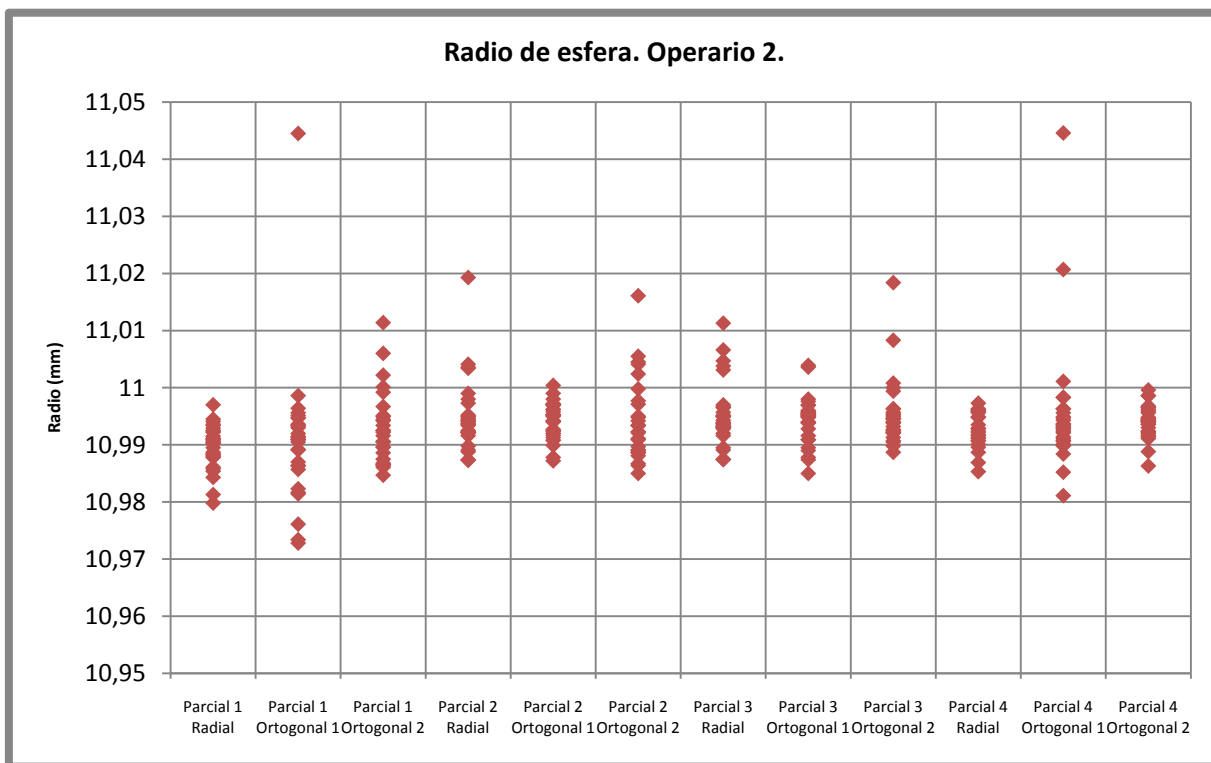
Radio (mm)			Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 1	Radial	Esfera inicial	10,9861	10,9854	10,9895	10,9882	10,9902
			10,9798	10,9858	10,991	10,9884	10,9878
			10,9813	10,9883	10,9904	10,9936	10,9879
		Esfera final	10,9843	10,9922	10,9925	10,997	10,9905
			10,9934	10,9911	10,9911	10,9945	10,9907
			10,9887	10,9915	10,9924	10,9941	10,9929
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,992	10,9909	10,9964	11,0445	10,9915
			10,9892	10,9857	10,9956	10,9986	10,9951
			10,987	10,9864	10,9947	10,9913	10,9936
		Esfera final	10,9728	10,9947	10,9891	10,9909	10,9905
			10,9734	10,9817	10,9823	10,991	10,9934
			10,9761	10,9814	10,9863	10,9933	10,993
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9861	10,9847	10,9905	10,9865	10,9916
			10,9866	10,9896	10,9864	10,9868	10,9875
			11,0022	11,0114	10,9896	10,9906	10,9886
		Esfera final	10,9925	10,9967	10,9992	10,9949	10,9934
			11,5542	10,9925	10,9925	10,9944	10,9922
			10,9905	11,0001	10,9942	10,9951	11,006
Parcial 2	Radial	Esfera inicial	10,9925	10,9873	10,9916	10,9922	10,9922
			10,9935	10,9888	10,9898	10,9943	10,9921
			10,9874	10,9937	10,9943	10,999	10,9938
		Esfera final	10,9973	10,9946	10,9891	10,995	10,9921
			10,9934	10,9941	10,9949	10,9923	10,9952
			11,0193	11,0034	11,0041	11,0036	10,998
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9942	10,9953	10,9952	10,9969	10,994
			10,9913	10,9962	10,9971	10,9958	10,9962
			10,9942	10,997	10,999	10,9972	10,9953
		Esfera final	10,9872	10,995	10,9899	10,9923	10,9917
			10,9878	10,998	10,9925	10,9908	10,9952
			10,992	11,0004	10,9927	10,9908	10,9971
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9864	10,9881	10,9934	10,9891	10,9887
			10,9886	11,1351	10,985	10,9921	10,9897
			11,1125	10,9887	10,989	10,9934	10,9934
		Esfera final	10,9867	10,9998	10,9971	11,0041	10,9911
			11,0055	10,9909	10,9942	10,995	10,9977
			10,9923	10,9948	11,0161	11,0024	11,0045

Radio (mm)			Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Longitud 5
Parcial 3	Radial	Esfera inicial	10,9875	10,9895	10,992	10,9935	10,9938
			10,9874	10,993	10,9891	10,9931	10,9933
			11,0113	10,9928	10,9916	10,997	10,9957
		Esfera final	10,9943	10,9938	10,995	10,9939	10,9931
			10,9932	10,9952	10,995	10,9967	10,9949
			11,0047	11,0066	11,0038	10,9965	11,0031
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9959	10,9955	10,994	10,997	10,9952
			10,9954	10,9953	10,9976	10,995	10,996
			10,9948	10,9951	11,0039	10,9956	10,9909
		Esfera final	10,9895	10,9878	10,985	10,9939	10,9949
			10,9928	10,9909	10,9916	10,9956	10,998
			11,0036	10,989	10,9938	10,9874	10,9969
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9946	10,9963	10,9913	10,9938	10,9949
			10,9921	10,9921	10,9921	10,9957	10,9932
			10,9898	10,9954	10,9907	10,994	10,9952
		Esfera final	11,5402	11,0184	10,9946	10,994	10,9924
			10,9887	10,9905	10,9927	10,9945	10,9963
			10,9994	11,0083	10,9925	11,0008	11
Parcial 4	Radial	Esfera inicial	10,9887	10,9901	10,9948	10,9935	11,0743
			10,9853	10,9913	10,9911	10,9916	10,9924
			10,9907	11,3105	11,2678	10,9949	10,9922
		Esfera final	10,9869	10,9959	10,9961	10,9928	10,9918
			11,1066	10,9958	10,9973	10,9956	10,9961
			10,9907	10,9963	11,6491	10,9929	10,9896
	Ortogonal 1	Esfera inicial	10,9914	10,9983	10,9947	10,9963	10,9935
			10,9911	10,9949	10,9943	10,9908	10,9926
			11,0446	10,9963	10,9983	11,0207	10,993
		Esfera final	10,9884	10,9932	11,0011	10,9898	10,9906
			10,9923	10,9901	10,9937	10,9899	10,9935
			10,9811	10,9852	10,9921	10,9956	10,9929
	Ortogonal 2	Esfera inicial	10,9924	10,9921	10,9956	10,9911	10,9943
			10,9966	10,9936	10,9959	10,9948	10,9942
			10,9914	10,9916	10,9863	10,9923	10,9944
		Esfera final	10,9968	10,9941	10,9946	11,078	10,9936
			10,9996	10,9939	10,9941	10,9965	10,993
			10,9919	10,9888	10,9986	10,9986	10,9962

GRÁFICOS. RADIOS DE ESFERAS.



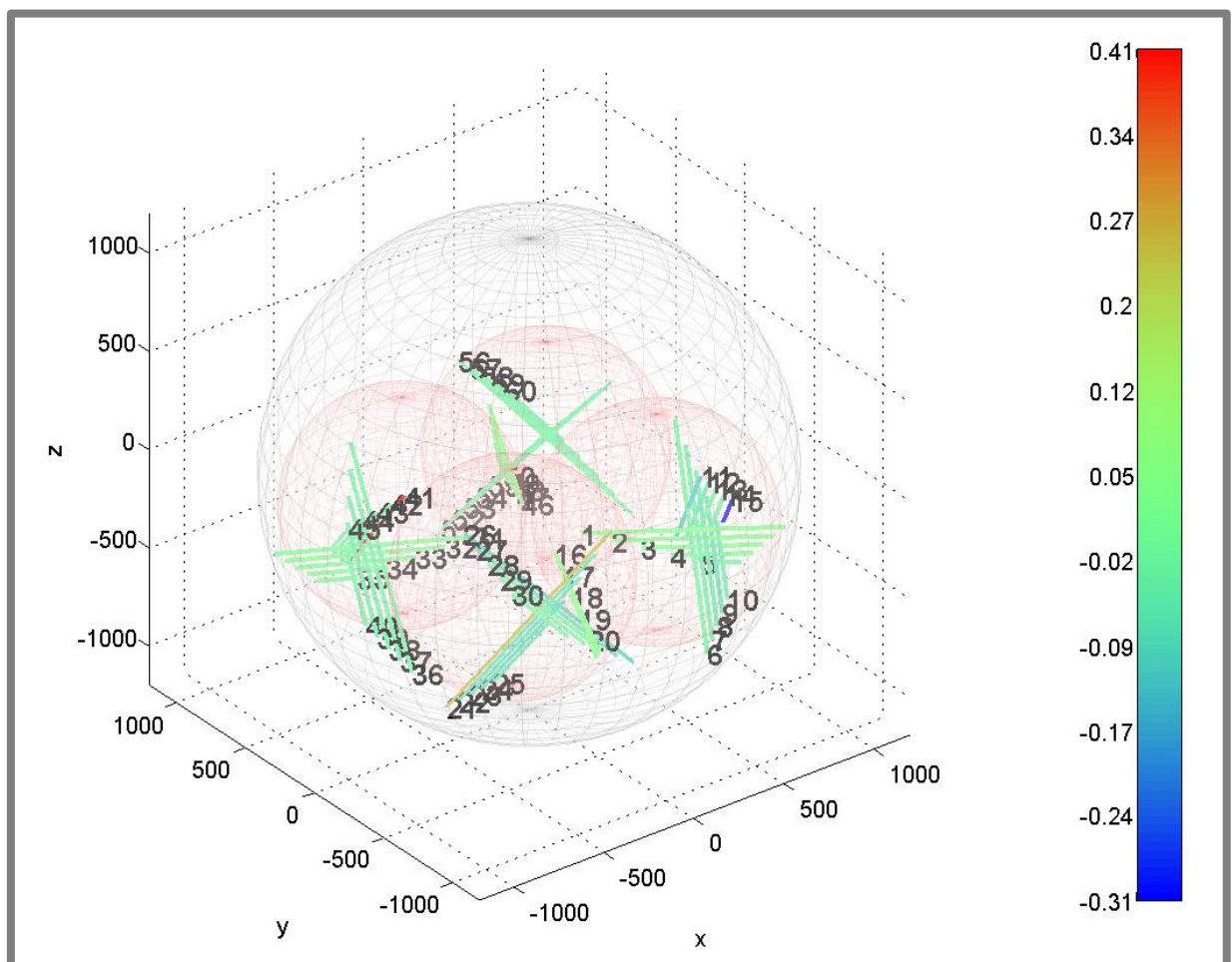
Radios de esfera obtenidos. Operario 1.



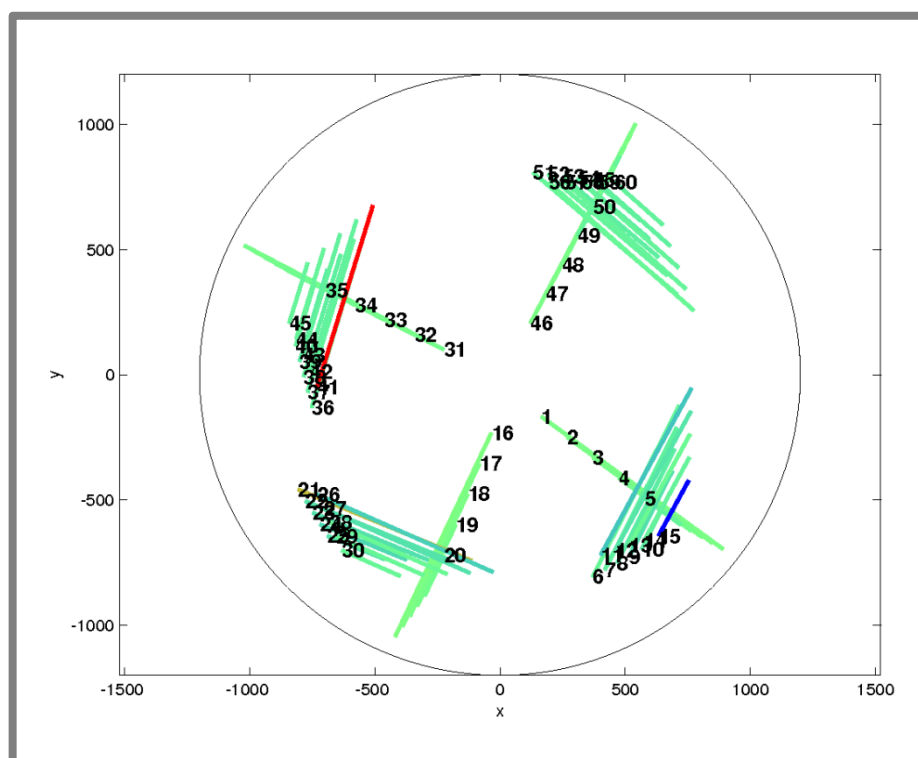
Radios de esfera obtenidos. Operario 2.

Finalmente, desde la perspectiva de la precisión evaluada de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado, se adjunta una representación de los volúmenes de medición parciales con las diferentes disposiciones de la barra patrón de esferas en el que figuran las longitudes medidas. El gráfico muestra, en un mapa de colores, una mayor o menor precisión en la medición, determinada por el error cometido. Para cada disposición del patrón, se visualizan 5 longitudes que corresponden a aquellas en las que el error ha sido el máximo de cada una de las 3 repeticiones por longitud evaluada.

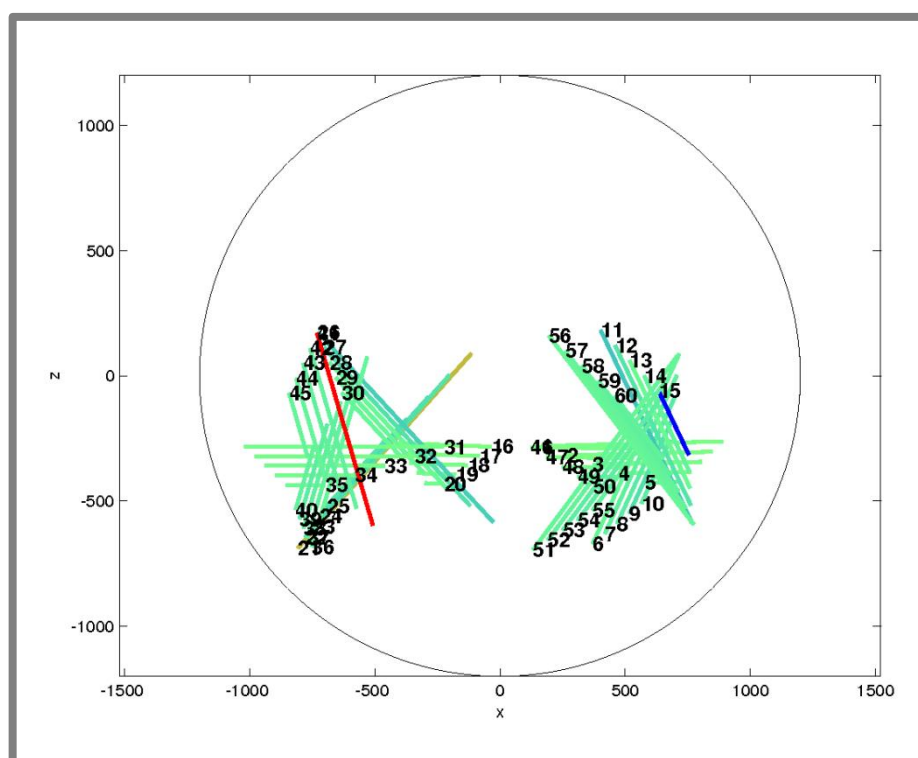
Indicar también que el mapa de colores siguiente, es realizado a partir de los datos del operario 1, ya que la influencia del operario en sus mediciones es menor, como veremos en las conclusiones del resumen de la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”.



Mapa de color para el error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición parcial.



Vista superior del volumen de medición parcial.



Vista frontal del volumen de medición parcial.

Se destaca del mapa de color presentado que predominan los errores que se corresponden en el espectro de 0,02-0,12 mm.

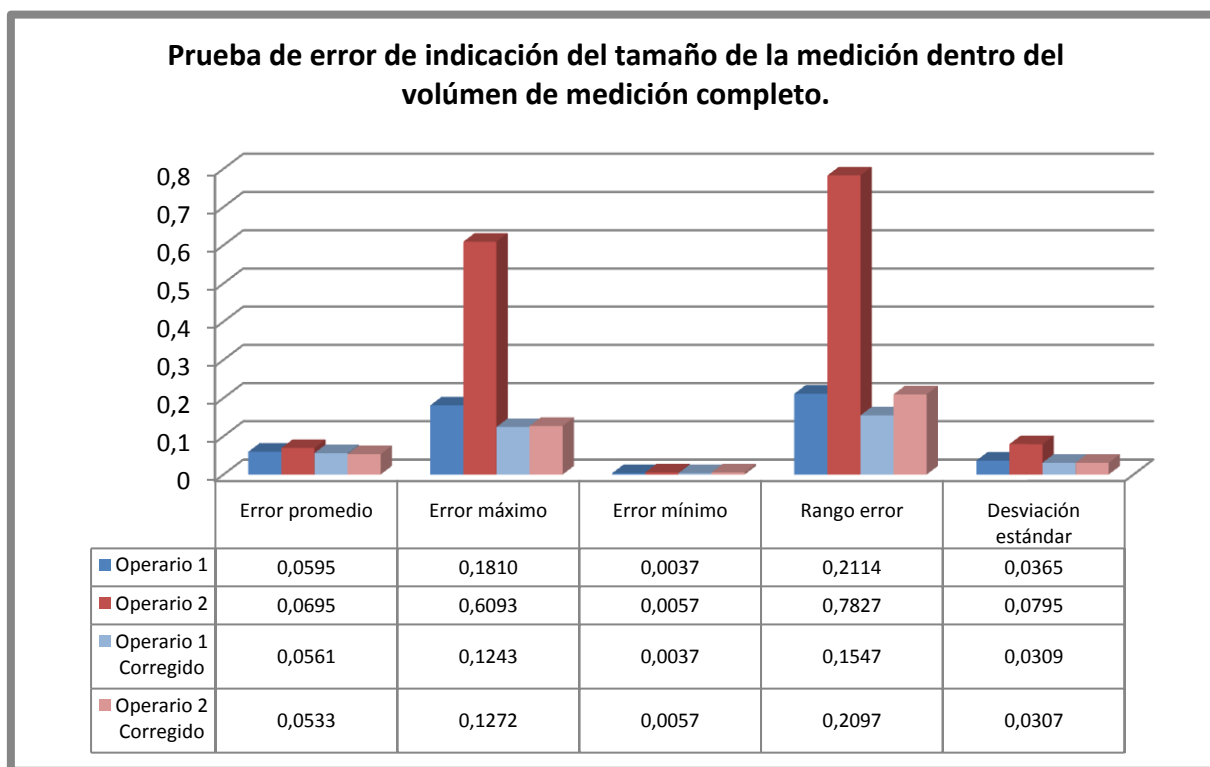
Las longitudes cuyo error hemos destacado anteriormente, como dato espurio, debido a interferencia del operario, se observan claramente en la vista frontal, en color azul, marrón y rojo, para los parciales 1, 2 y 3 respectivamente.

En general, los errores que muestra este mapa de colores son similares y tolerables para la evaluación realizada, y se comprueba, que la máquina tiene un rendimiento correcto en cada uno de los 4 parciales en los que se ha dividido el volumen de medición completo.

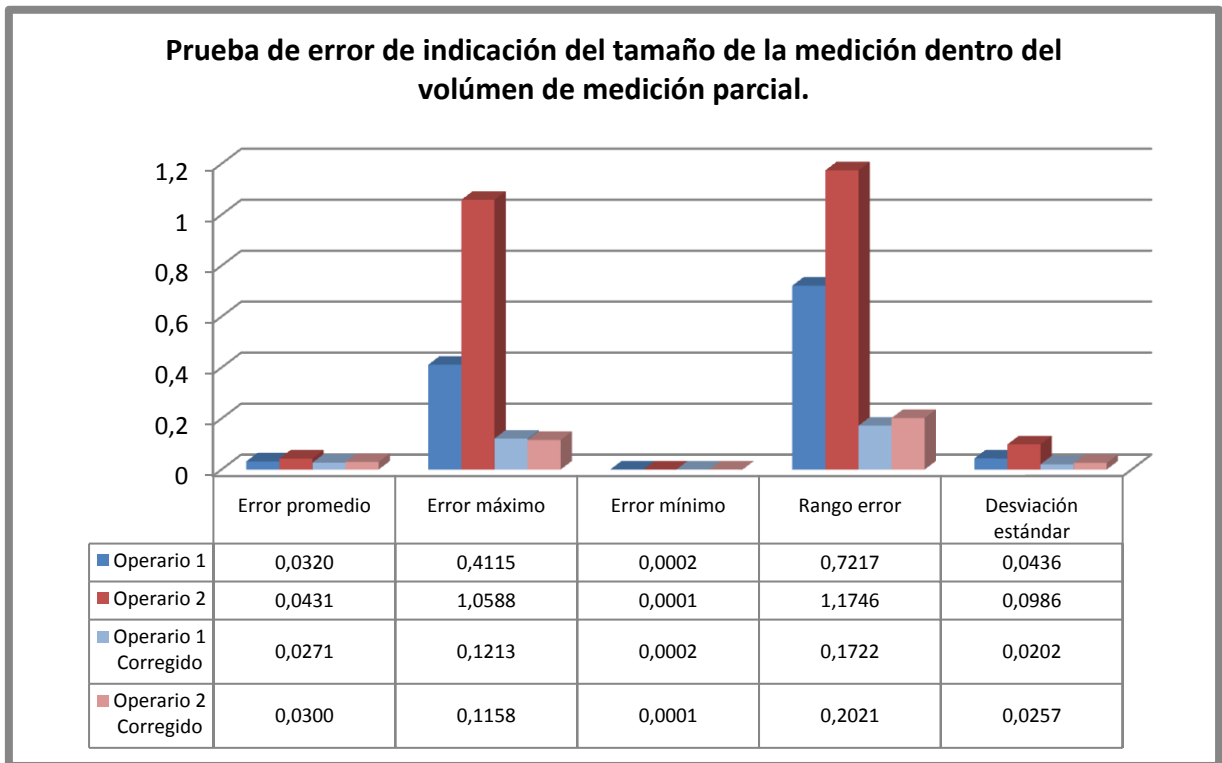
2.3.3. RESÚMEN DE LA PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.

A continuación, a modo de visión global, se resumen los datos obtenidos para la citada “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, tras su análisis, mediante parámetros más generales como son: promedio del error (sobre valores absolutos), error máximo, error mínimo, rango de errores y desviación estándar, según la evaluación realizada y según el operario.

Dicho gráfico representa los parámetros que caracterizan cada prueba, así como parámetros corregidos en los que han sido obviados los datos considerados espurios ya indicados en el documento “Memoria”.



Parámetros generales de análisis para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición completo”.



Parámetros generales de análisis para la “prueba de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición parcial”.

Los parámetros presentados para cada “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, considerando el volumen de medición completo y parcial, permiten establecer ciertas conclusiones respecto a la prueba:

- El operario 2, influye de manera decisiva en la realización de la prueba, como demuestra su mayor error promedio y sus errores máximos analizados, así como el rango de errores que comete en su prueba. Además, según el criterio seguido para determinar aquellos radios de esferas obtenidos durante la prueba que no cumplen la tolerancia respecto a la calibrada (criterio del $\pm 1\%$), el operario 2 caracteriza un 5% de radios de esferas fuera de esos límites de tolerancia en el global de la prueba frente a un 1% del operario 1. Cabe destacar que el obtener para una esfera un radio desvirtuado respecto a su radio teórico, no influye de manera directa en el error de indicación, puesto que dicho error se calcula respecto a la distancia entre centros de esferas y el centro de esfera para aquella que su radio no ha sido caracterizado correctamente, no sufre una desviación excesiva como ocurre con el dato del radio de esfera.
- La máquina de medición por coordenadas de brazo articulado evaluada, tiene capacidad de realizar mediciones de indicación de tamaño con un error mínimo entre 0,0001 - 0,0057 mm, como demuestran los valores mínimos de los errores para pruebas tanto de volumen de medición completo como volumen de medición parcial.

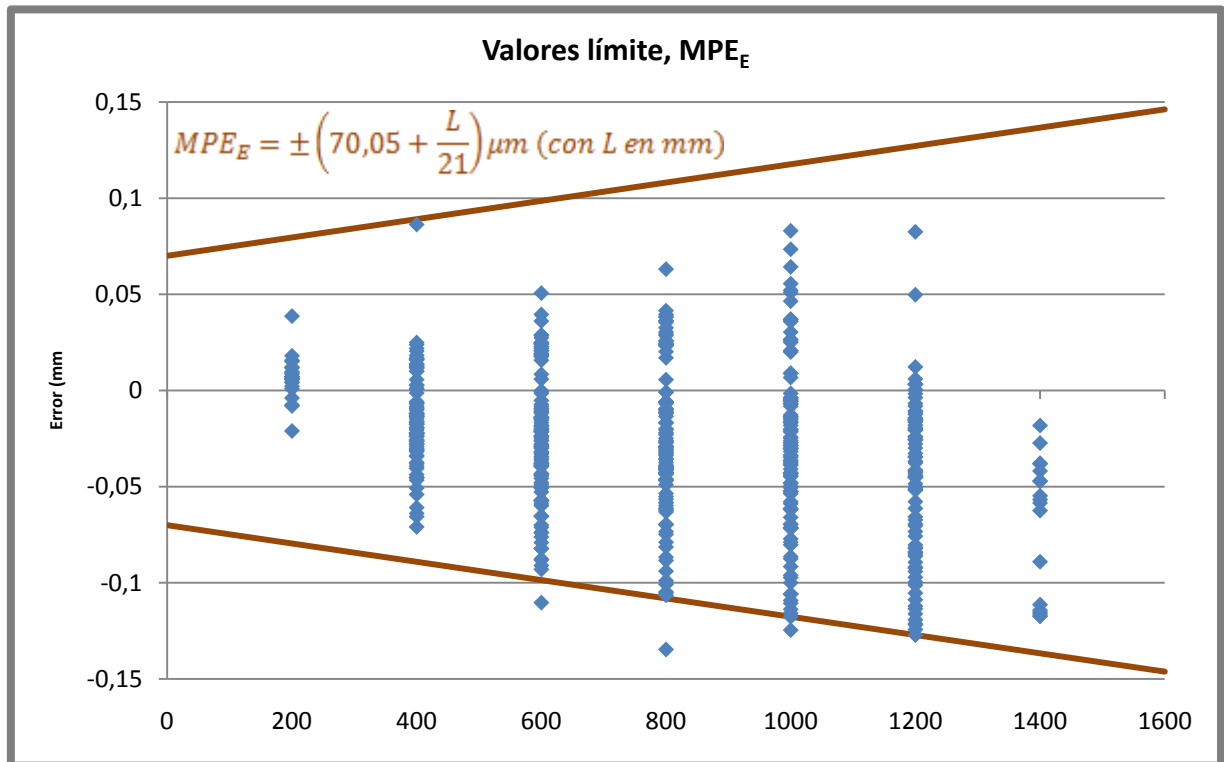
- La evaluación de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado, caracteriza en esta prueba de error de indicación, un error promedio entre 0,0320-0,0695 mm considerando los datos globales de la prueba, y un error promedio entre 0,0271-0,0561 mm considerando los datos en los que se han excluido aquellos valores espurios ya citados. Son valores en cuyo intervalo se encuentra el valor de error de 0,043 mm que el fabricante FARO incluye como dato de evaluación de la máquina según la norma “ASME B89.4.22-2004”.
- El error de indicación del tamaño de la medición es mayor cuando se realiza la prueba dentro del volumen de medición completo con respecto a considerar el volumen de medición parcial. Es decir el rango de errores promedio para el volumen de medición completo es 0,0546-0,0561 mm, mientras que para el volumen de medición parcial, dicho rango de errores promedio es 0,0271-0,0297 mm. Por tanto se verifica que el considerar un volumen de trabajo completo del brazo articulado, genera un mayor error en la medida que considerando un volumen concreto o parcial dentro de la capacidad de medida completa del brazo articulado. Esto es generado, debido a una mayor cantidad de movimientos y a mayores distancias que se realizan en dicha prueba de volumen de medición completo, donde se generan errores debido a los encoders ubicados en cada articulación de la maquina que transmiten información de cada giro producido en cada articulación para el cálculo de la coordenada medida.
- La realización de la citada “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, genera que se produzcan errores no debidos a la máquina sino al operario, debido a la repetitividad de longitudes y medidas, sin existir durante el periodo de captura de puntos, un sistema de verificación de las medidas, puesto que ese análisis es a posteriori y no puede aplicarse, en el momento de la medición, la exigencia que describe la prueba, de comprobar si el resultado de ese error no es coherente, para proceder a repetirlo hasta un máximo de 10 veces, como especifica la directriz “VDI/VDE 2617”.

2.3.4. ERROR MÁXIMO PERMISIBLE.

A continuación se representa el gráfico de valores límite de error máximo permisible, MPE_E , según la normativa UNE-EN ISO 10360-1. Dicho gráfico ha sido calculado mediante todos los errores obtenidos en la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, dentro del volumen de medición completo y dentro del volumen de medición parcial, incluyendo los errores de los 2 operarios que han intervenido en la prueba, obviando aquellos datos indicados como espurios en el documento “Memoria”.

Por tanto, se obtiene a partir de los errores calculados, el gráfico MPE_E de valores límite que caracteriza los valores de precisión de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado, evaluada. Además, complementa la información de la máquina empleada durante la evaluación, ya que como ha sido indicado en el documento “Memoria”, el fabricante del equipo, FARO, no aporta ningún tipo de

gráfico de estas características para este equipo, siendo necesario según la directriz “VDI/VDE 2617” para la verificación de la máquina.



Valores límite junto con la recta representativa MPE_E . Gráfico global para la máquina evaluada.

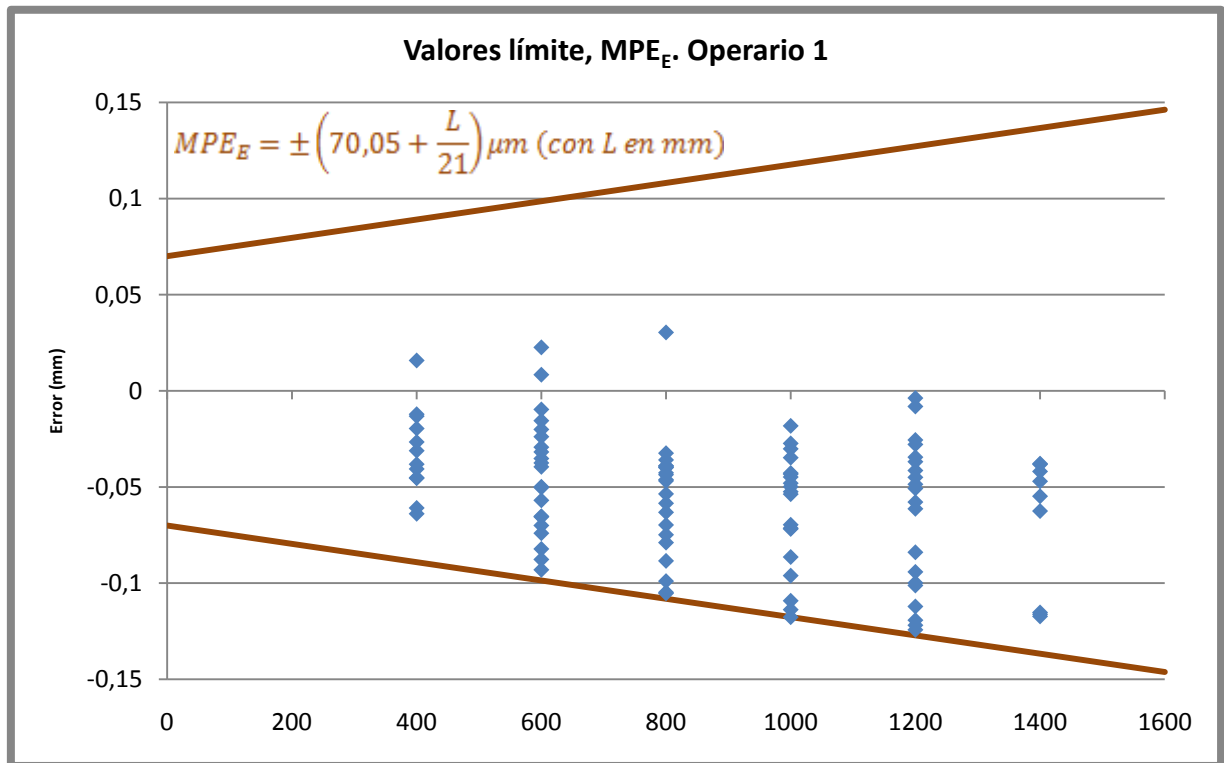
La función de dicha recta de error máximo permisible, MPE_E , ha sido obtenida experimentalmente a partir del gráfico de errores presentado:

$$MPE_E = \pm \left(70,05 + \frac{L}{21} \right) \mu m (\text{con } L \text{ en mm})$$

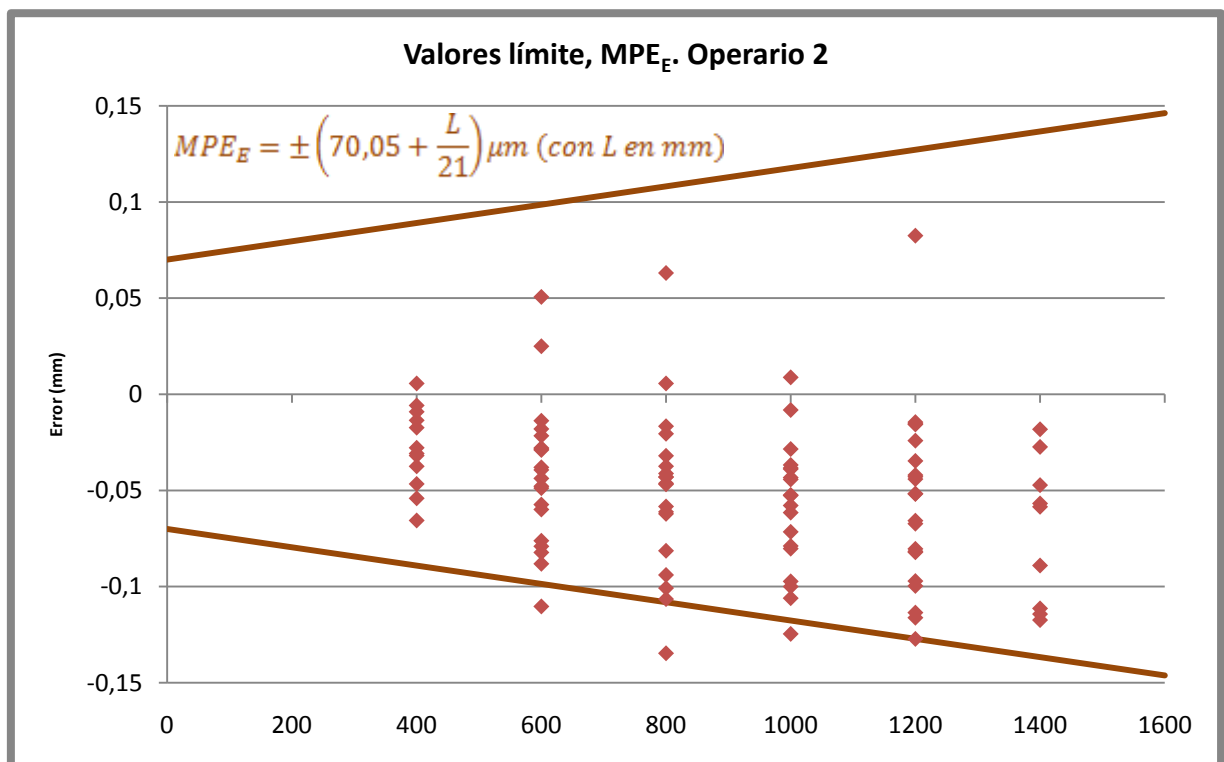
Donde:

- A = 70,05, es una constante positiva, expresada en micrómetros.
- K = 21, es una constante positiva adimensional.
- L, es la dimensión medida, en milímetros.

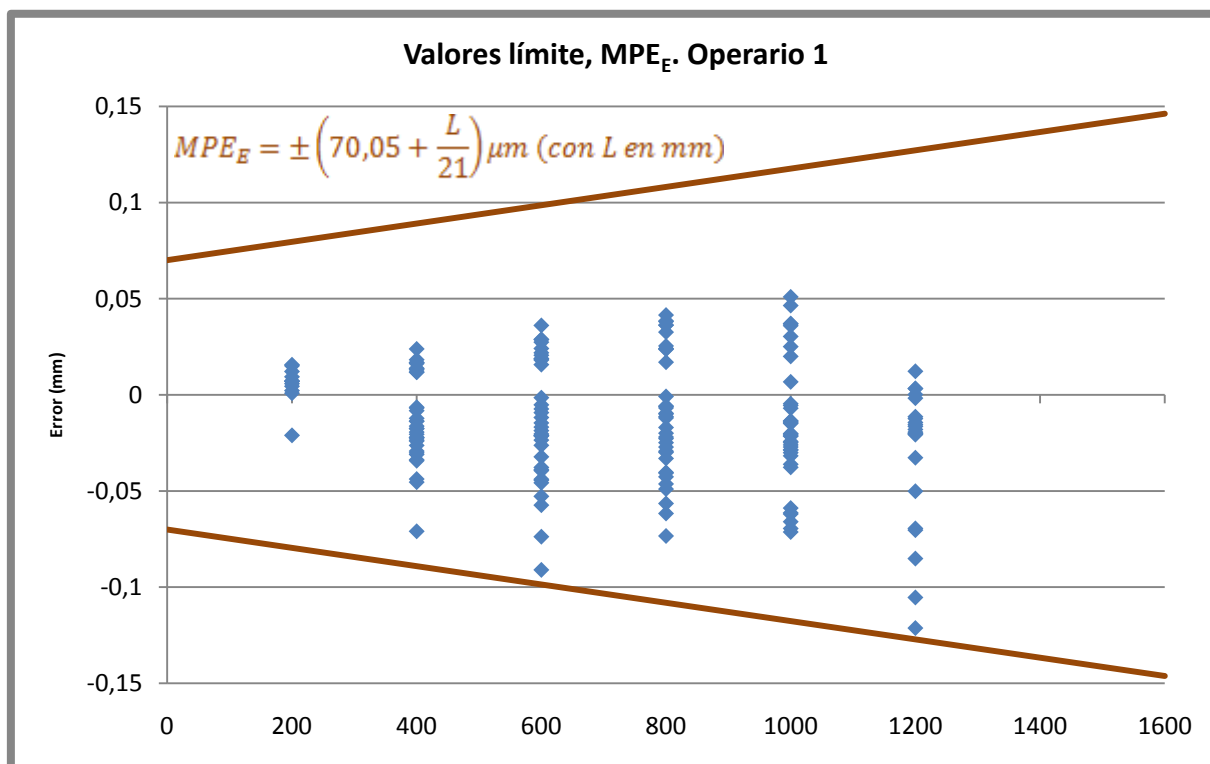
Asimismo, se incluyen a continuación, los gráficos de errores de ambas pruebas (volumen de medición completo y volumen de medición parcial) en función de la longitud medida, para establecer comparaciones respecto a esos errores y dicha recta de error máximo permisible, MPE_E , en función del volumen de medición caracterizado. Dichos gráficos fueron presentados con anterioridad en el documento “Memoria”.



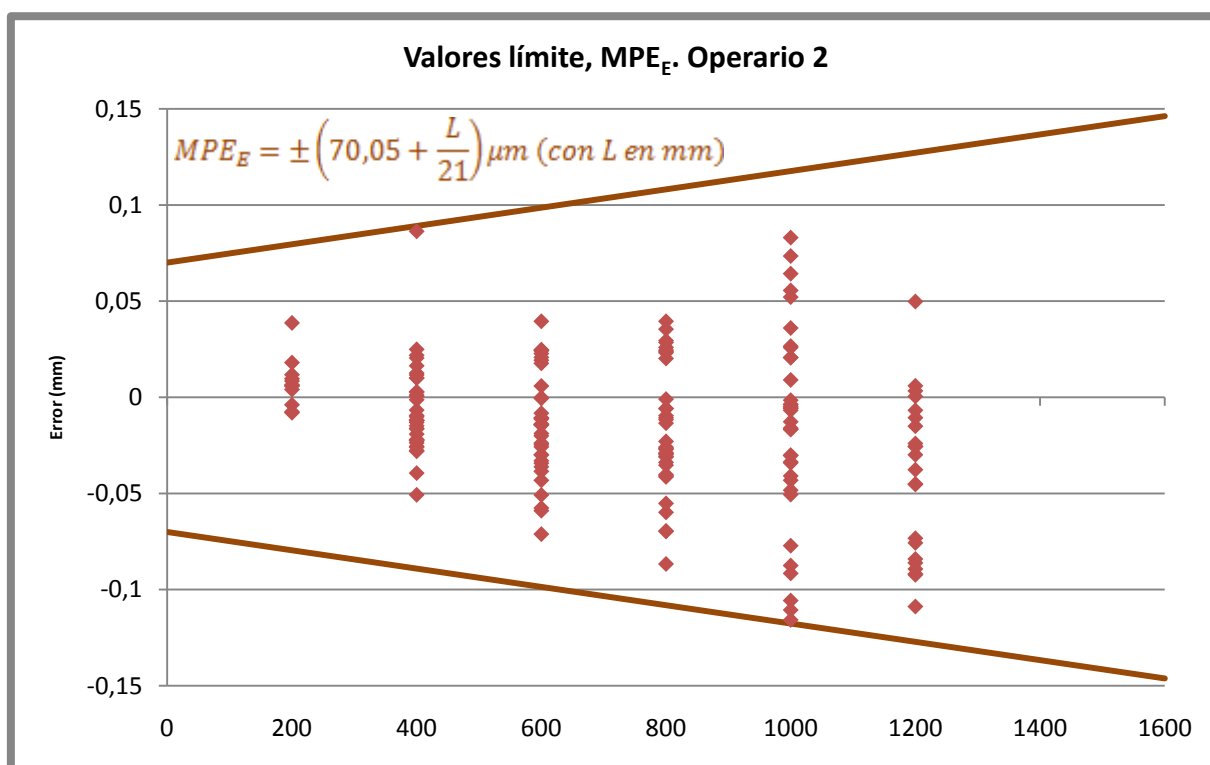
Valore límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición completo”. Operario 1.



Valore límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición completo”. Operario 2.



Valore límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición parcial”. Operario 1.



Valore límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen de medición parcial”. Operario 2.

De los gráficos presentados, que caracterizan el error de la medición junto con la recta de error máximo permisible, MPE_E , se concluye como más característico que es la prueba realizada dentro del volumen de medición completo, la que determina dicha recta de error máximo permisible, MPE_E , debido a que para las longitudes caracterizadas, sus errores límites coinciden o son muy próximos a la recta MPE_E .

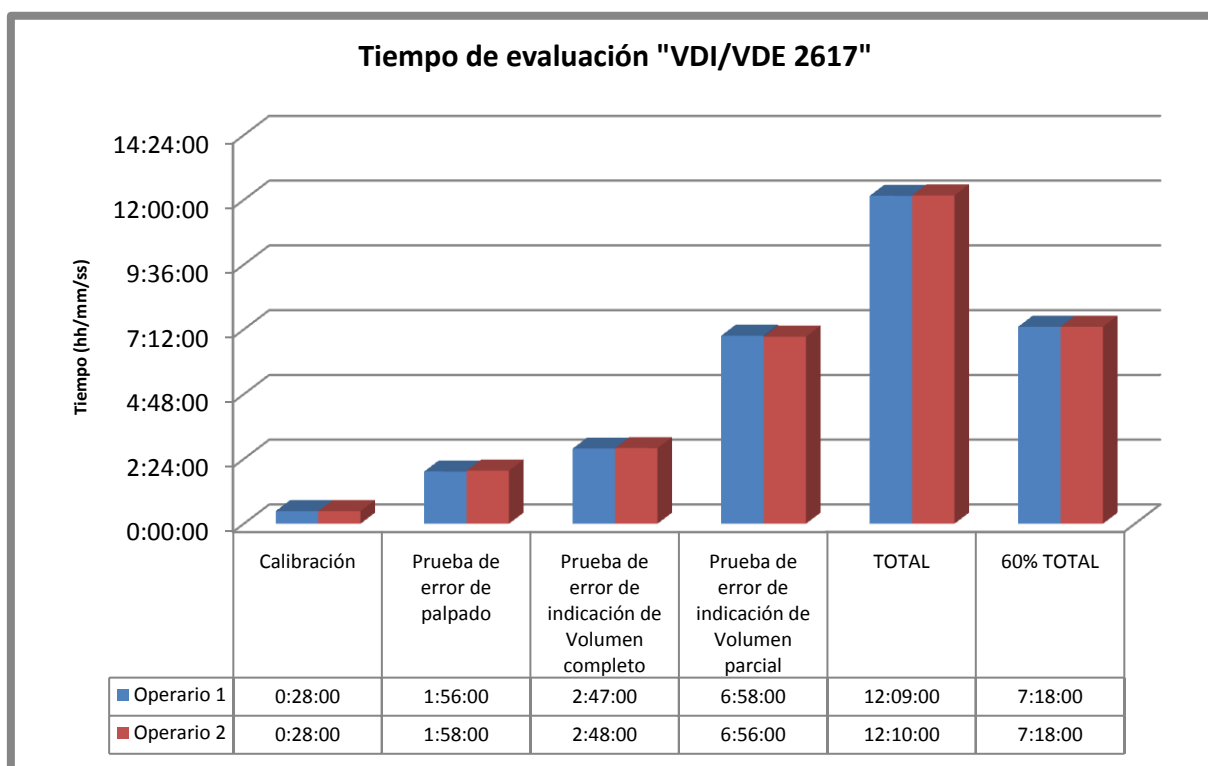
Asimismo, para la prueba realizada dentro del volumen de medición parcial, la mayoría de los errores se encuentran más concentrados, en un rango aproximado entre 0,05 y -0,05 mm, y a diferencia de la conclusión anterior, los errores límite para esta prueba se encuentran más alejados de la recta MPE_E . Ello es debido a que la prueba se desarrolla en un único parcial, y la influencia debida al movimiento de las articulaciones de la máquina, es menor.

También destacar la naturaleza del error dependiendo de la posición del patrón, es decir, en las disposiciones radiales de la prueba desarrollada dentro del volumen parcial, la longitud medida suele superar a la longitud calibrada, mientras que en disposiciones en las que el patrón se encuentra girado, la longitud medida suele ser inferior a la longitud calibrada.

2.4. ANÁLISIS DE TIEMPO.

Como análisis final sobre la evaluación de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado, se especifica a continuación el tiempo empleado en la prueba durante su evaluación en laboratorio, es decir, el tiempo que se utilizaron dichas instalaciones junto a todos los equipos para la ejecución de la prueba explicada.

Los datos se refieren a las operaciones realizadas, junto con el tiempo global de la prueba realizando sobre el mismo, una corrección de tiempo del 60%, debido a la inexperiencia de los operarios que realizan ambas evaluaciones. Dicha corrección sirve para eliminar del dato de tiempo total, dicha inexperiencia para presentar un dato de tiempo más real respecto al verdadero tiempo que necesita ser empleado para llevar a cabo dicha evaluación.



Tiempo de evaluación del brazo articulado mediante la directriz "VDI/VDE 2617".

3. COMPARATIVA NORMATIVAS INTERNACIONALES.

A continuación, en el siguiente apartado se realiza un análisis comparativo entre las normativas que han sido abordadas en el presente proyecto. Por un lado, la directriz “VDI/VDE 2617” que ha abarcado la totalidad del estudio del presente proyecto, y por otro lado, la norma “ASME B89.4.22-2004”, de la que se toman datos característicos del estudio realizado por Javier Bonilla en el Proyecto Final de Carrera.

Dicho análisis abarca la comparativa de pruebas semejantes realizadas para ambas normativas así como errores obtenidos en cada de esas pruebas. También se realiza una comparativa del tiempo necesario de uso de laboratorio de metrología para ejecutar cada una de las pruebas de acuerdo a su guía, así como el coste de cada una de ellas.

Por último, también se detalla una comparativa entre los criterios de verificación que sigue cada normativa, así como las aplicaciones de dichos procedimiento.

3.1. ERROR OBTENIDO.

El parámetro más interesante que es posible comparar entre ambas normativas es aquel que cuantifica el error o precisión de la máquina evaluada. Para ello, se han tomado parámetros generales (error promedio, error máximo y desviación estándar) en pruebas de ambas normativas, para poder realizar una comparación entre pruebas con procedimientos similares.

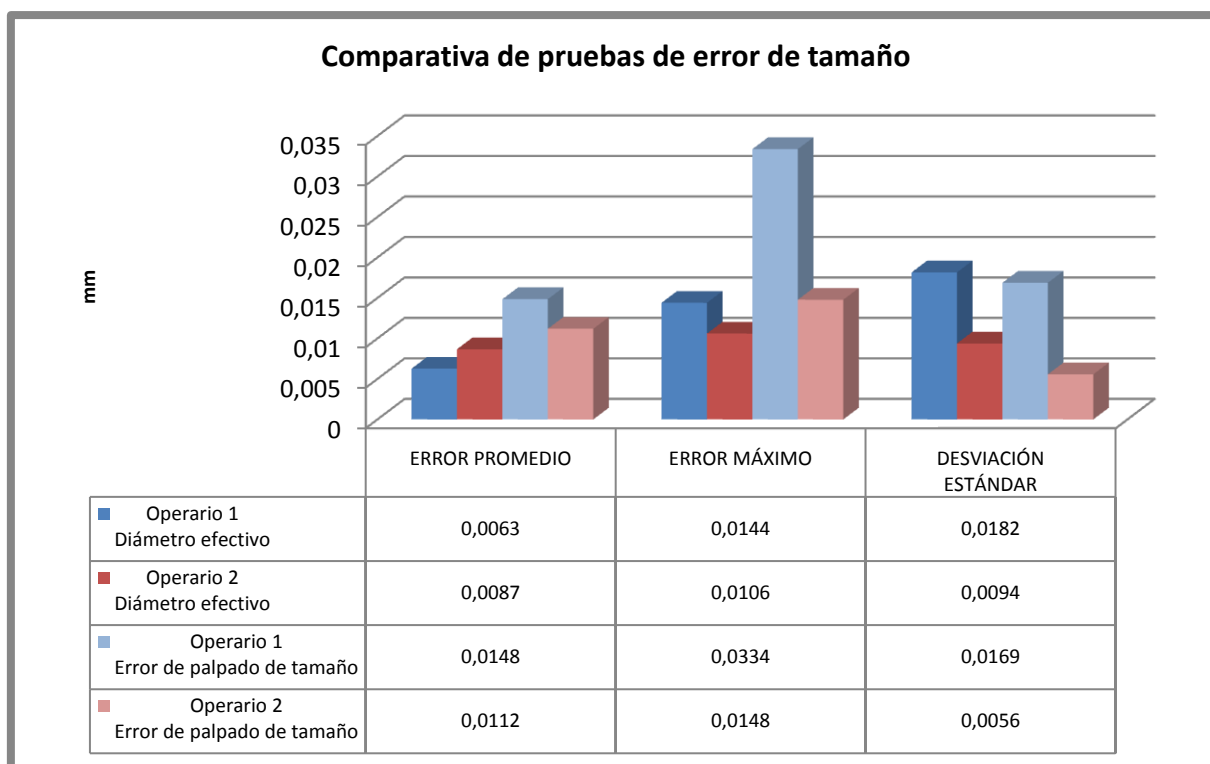
De este modo, partiendo de las tres pruebas de las que se compone la norma “ASME B89.4.22-2004”, “prueba del diámetro efectivo”, “prueba de articulación de punto único (SPAT)” y “prueba de rendimiento volumétrico”, se comparan sus datos con aquellas pruebas con la misma estructura de la directriz “VDI/VDE 2617”, tomando la evaluación de “error de palpado de tamaño”, “error de palpado de posición de la esfera” y “error de indicación del tamaño de la medición”, respectivamente.

3.1.1. PRUEBAS DE ERROR DE TAMAÑO.

A continuación se representa el gráfico comparativo entre la “prueba de diámetro efectivo” de la norma “ASME B89.4.22-2004” y la evaluación de “error de palpado de tamaño” recogida en la “prueba de error de palpado” de la directriz “VDI/VDE 2617”. El objetivo de estas pruebas, en ambas normativas, es el cálculo del diámetro de la esfera mediante el brazo articulado y comparar ese valor con el dato del diámetro calibrado de la esfera.

Existe la diferencia que en la normativa ASME, se caracteriza la esfera mediante 3 repeticiones tomando 9 puntos en una única disposición, mientras que en la normativa VDI/VDE se caracteriza a la esfera tomando 25 puntos en 3 disposiciones diferentes.

Se destaca del gráfico presentado, un mayor error promedio en los resultados de la prueba para la normativa VDI/VDE, debido a que en dicha evaluación, se calcula el diámetro de la esfera mediante 25 puntos frente a los 9 puntos de la otra prueba de la norma ASME, lo que propicia que se calcule una esfera con mayor error de tamaño.



Comparativa “prueba de diámetro efectivo” (ASME) y “error de palpado de tamaño” (VDI/VDE).

3.1.2. PRUEBAS DE ERROR DE POSICIÓN.

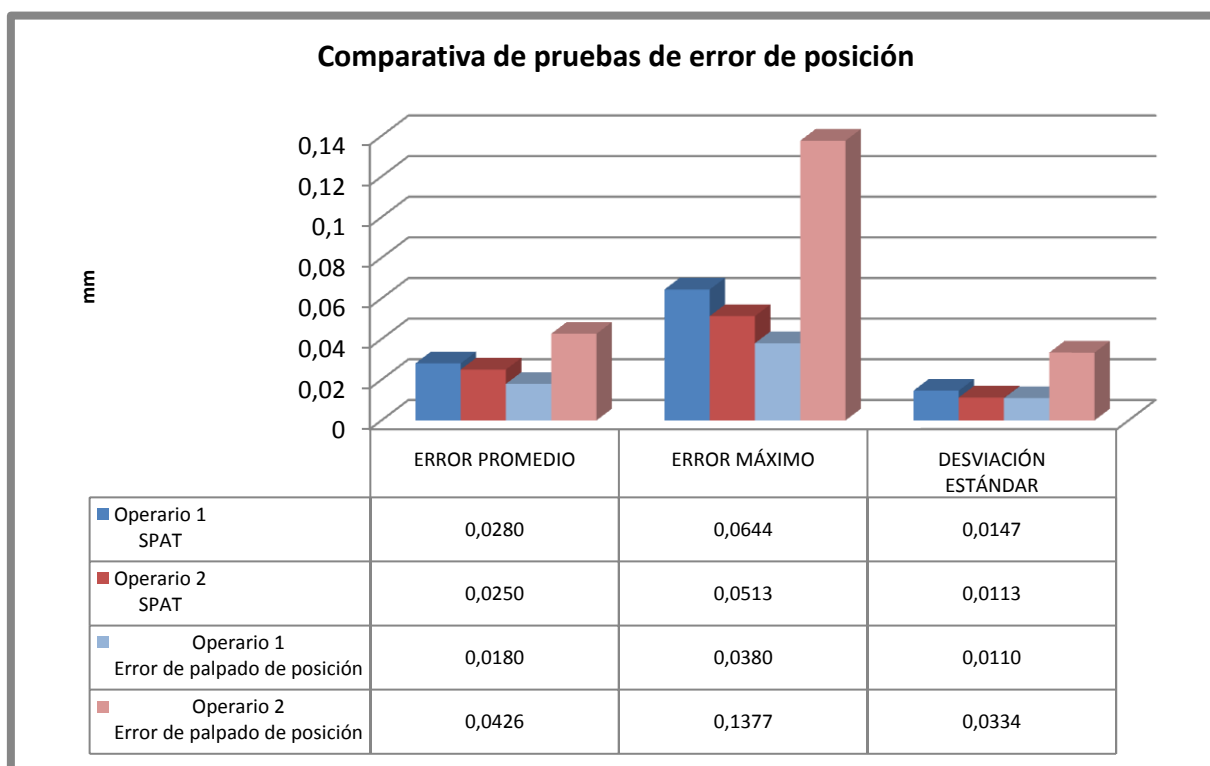
A continuación se representa el gráfico comparativo entre la “prueba de articulación de punto único (SPAT)” de la norma “ASME B89.4.22-2004” y la evaluación de “error de palpado de posición de la esfera” recogida en la “prueba de error de palpado” de la directriz “VDI/VDE 2617”. El objetivo de estas pruebas, en ambas normativas, es el cálculo de la posición de un punto en el espacio, en el sistema de referencia del brazo articulado. Dicho punto, es el que define el asiento cinemático para la prueba ASME, y el centro de una esfera para la prueba VDI/VDE.

Existe la diferencia que en la normativa ASME, se caracteriza un asiento cinemático tomando 10 puntos en 3 disposiciones distintas, mientras que en la

normativa VDI/VDE se caracteriza el centro de esfera mediante 5 repeticiones tomando 5 puntos en 3 disposiciones diferentes.

Indicar que para la realización de la siguiente comparativa, se recalculó la evaluación de “error de palpado de posición de la esfera” de acuerdo al procedimiento de la norma “ASME B89.4.22-2004”, ya que aunque ambas normativas evalúan un error de posición de un punto en el espacio, ese cálculo difiere para cada procedimiento, de manera que aplicando sobre los 2 grupos de datos, el mismo procedimiento, puede establecerse una comparación real. Por lo tanto, el procedimiento aplicado consiste en evaluar el error como la distancia de cada centro de esfera obtenido, al punto medio de los centros de esfera obtenidos para cada posición de la prueba.

Se destaca del gráfico presentado, a diferencia de la comparativa anterior, que no existe una gran desviación entre los valores de error promedio y error máximo, por lo que el error que pueda producirse de posicionar un punto en el espacio, frente al error de determinar la dimensión de un patrón, es menos relevante. Esto se verifica debido a que la desviación estándar para esta prueba, es menor a la otra comparativa.



Comparativa “prueba de articulación de punto único (SPAT)” (ASME) y “error de palpado de posición de la esfera” (VDI/VDE).

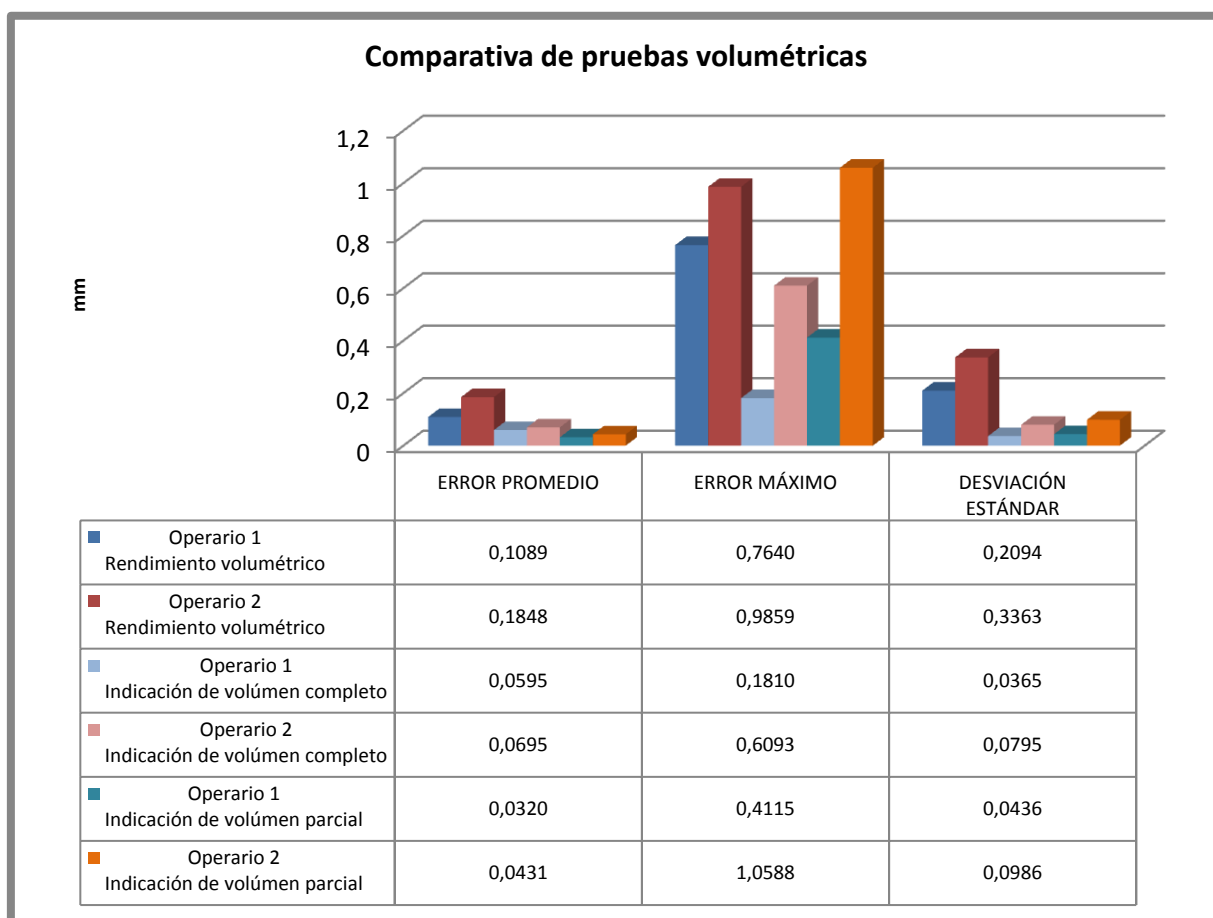
3.1.3. PRUEBAS VOLUMÉTRICAS.

A continuación se representa el gráfico comparativo entre la “prueba de rendimiento volumétrico” de la norma “ASME B89.4.22-2004” y la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” de la directriz “VDI/VDE 2617”, incluyendo el volumen de medición completo y parcial. El objetivo de estas pruebas, en ambas normativas, es evaluar el rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado en su volumen de trabajo. En cada normativa, se evalúa dicho rendimiento mediante disposiciones diferentes, de una barra patrón de esferas, que cubren el volumen de medición en el que la máquina puede actuar. En dichas disposiciones se caracteriza una longitud entre 2 centros de esferas del patrón empleado.

Existe la diferencia que en la normativa ASME, se caracteriza 1 longitud en cada una de las 20 disposiciones en las que se sitúa la barra patrón de esferas, mientras que en la normativa VDI/VDE se caracterizan 5 longitudes medidas 3 veces en un total de 7 disposiciones diferentes en la prueba del volumen de medición completo, y se caracterizan 5 longitudes medidas 3 veces en cada una de las 3 disposiciones utilizadas en cada uno de los 4 parciales en los que se divide el volumen de medición para la prueba del volumen de medición parcial.

Destacar también que para la prueba de la norma ASME, se emplean 2 longitudes a determinar, una larga y otra corta, mientras que en la prueba de la directriz VDI/VDE se subdivide la prueba, tomando para una, como referencia, el volumen de medición completo y para la otra prueba, el volumen de medición parcial, a fin de obtener errores debido a los movimientos capaces de realizar la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado en todo un volumen de trabajo, en posiciones más cercanas y más alejadas.

Se destaca del gráfico presentado, que el error promedio es alrededor de un 50% menor para las pruebas de la directriz VDI/VDE respecto a la prueba de la norma ASME, recalcando a su vez que se han caracterizado una número muy superior de longitudes para dicha prueba, por lo que se expone que al efectuar más mediciones de longitud, dicho error promedio de medida será menor y más real respecto a la precisión de la máquina, por lo tanto la norma ASME, desvirtúa este error de tamaño respecto a la directriz VDI/VDE.

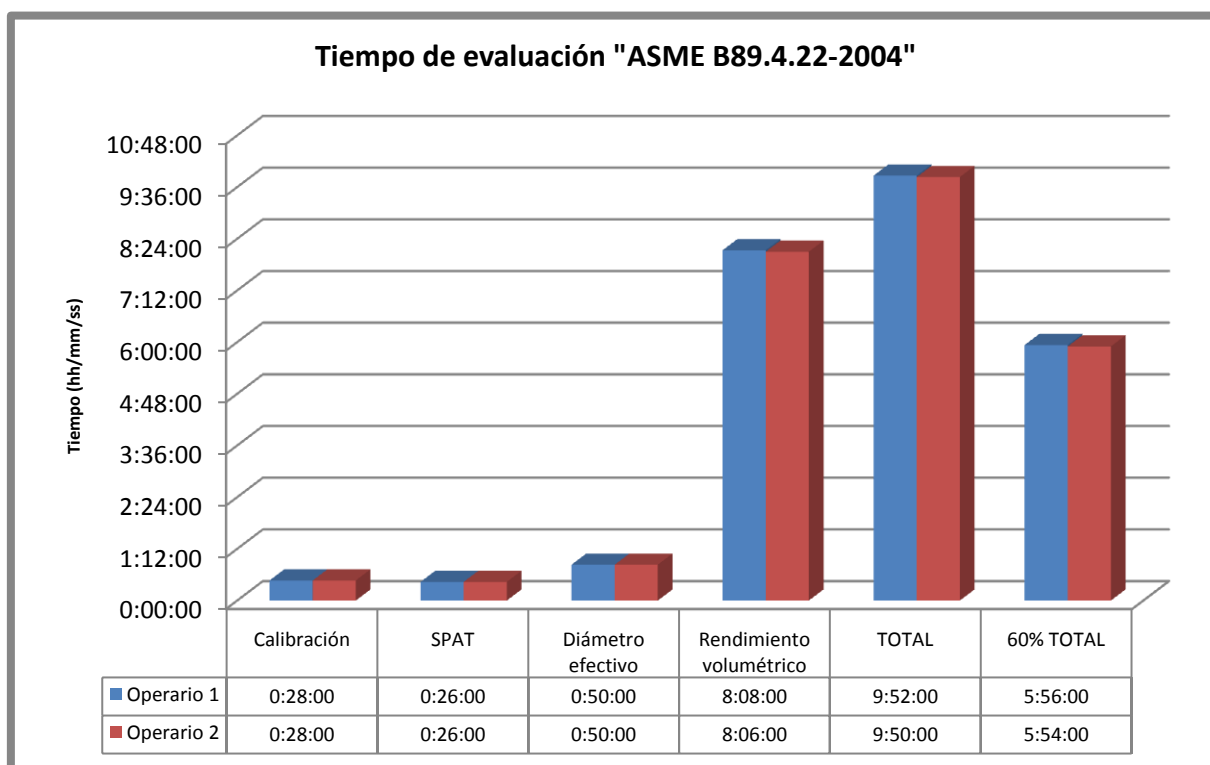


Comparativa “prueba de rendimiento volumétrico” (ASME) y “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” (VDI/VE).

3.2. TIEMPO EMPLEADO.

Con el objetivo de conocer el tiempo empleado en la ejecución de ambas normativas a comparar, “VDI/VDE 2617” y “ASME B89.4.22-2004”, se detallan gráficamente los tiempos de uso del laboratorio de metrología para la directriz alemana (en párrafo 2.4.), y para la norma americana, según la prueba realizada, así como el total de ejecución de todas las pruebas.

A continuación se detalla el gráfico de tiempo de evaluación de la norma “ASME B89.4.22-2004”. Destacar que este mismo gráfico representativo para la directriz “VDI/VDE 2617” fue expuesto en el apartado “2.4. Análisis de tiempo”.



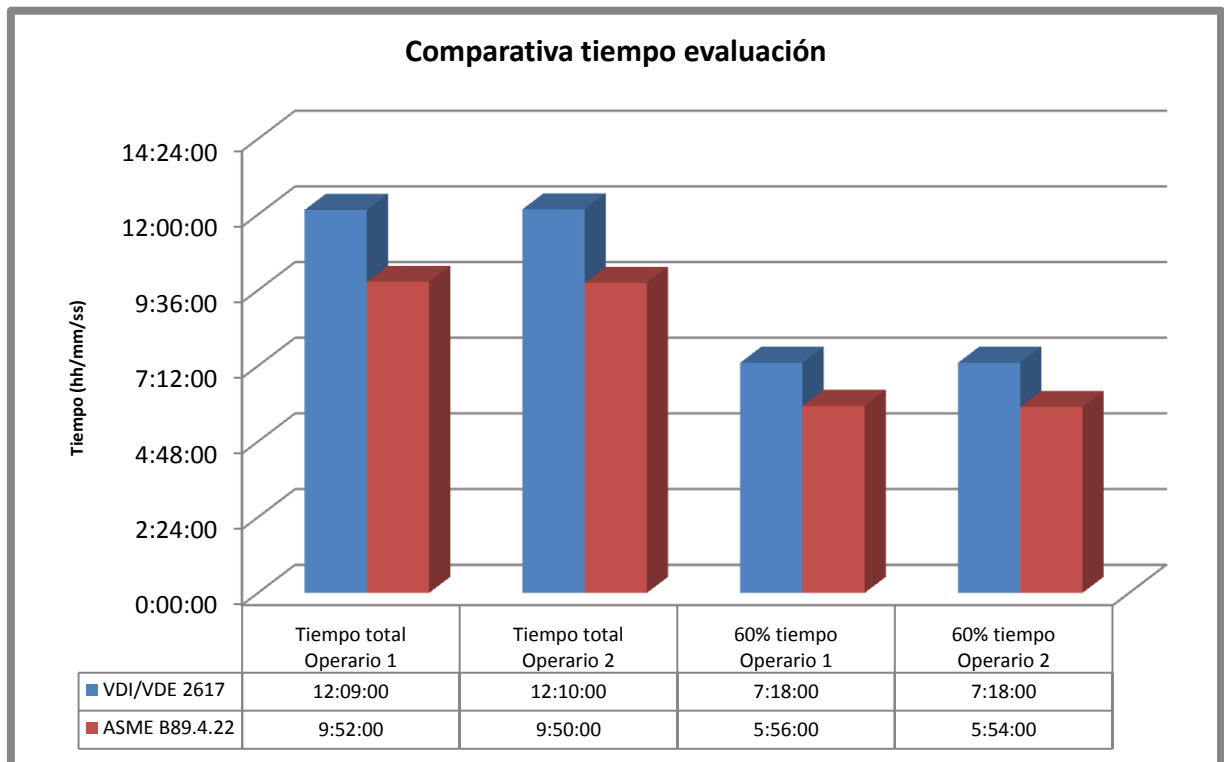
Tiempo de evaluación del brazo articulado mediante la norma “ASME B89.4.22-2004”.

En ambos gráficos se especifica un tiempo de calibración del palpador idéntico de 28 minutos, ya que esa prueba de calibración es la misma para cada normativa y se realiza previamente al global de las pruebas realizadas.

Asimismo, se resume el tiempo total que ha sido necesario para llevar a la práctica cada una de las normativas mencionadas, realizando sobre el mismo, una corrección para considerar únicamente el 60% de ese tiempo total, como el tiempo estimado que es necesario para cada evaluación. Dicha corrección se realiza debido a la inexperiencia de los operarios que llevaron a cabo estas pruebas, puesto que se plantea que la realización continua de las mismas pruebas proporcionaría una mayor destreza y las permitiría realizar en un menor tiempo. Es decir, es un factor de corrección de tiempo debido a la habilidad del operario.

Destacar que el tiempo total que ha sido referido, representa el tiempo de evaluación de la máquina que fue empleado por el operario en el laboratorio de metrología, es decir, no incluye el tiempo empleado en el análisis de datos, puesto que existen múltiples métodos que pudieran seguirse para dichos análisis. Por ejemplo, extraer los datos automáticamente del software del brazo articulado, no aumentaría significativamente el tiempo de evaluación, sin embargo, en el presente proyecto, los datos han sido calculados con software externo, “MATLAB” y “EXCEL”, que si supone un aumento considerable respecto al global de la prueba. De esta manera este tiempo global no está influenciado por dicho análisis de datos.

A continuación, finalmente, se presenta la comparativa entre ambas normativas según el tiempo total empleado por cada operario:



Tiempo de evaluación del brazo articulado mediante directriz “VDI/VDE 2617” y norma “ASME B89.4.22-2004”.

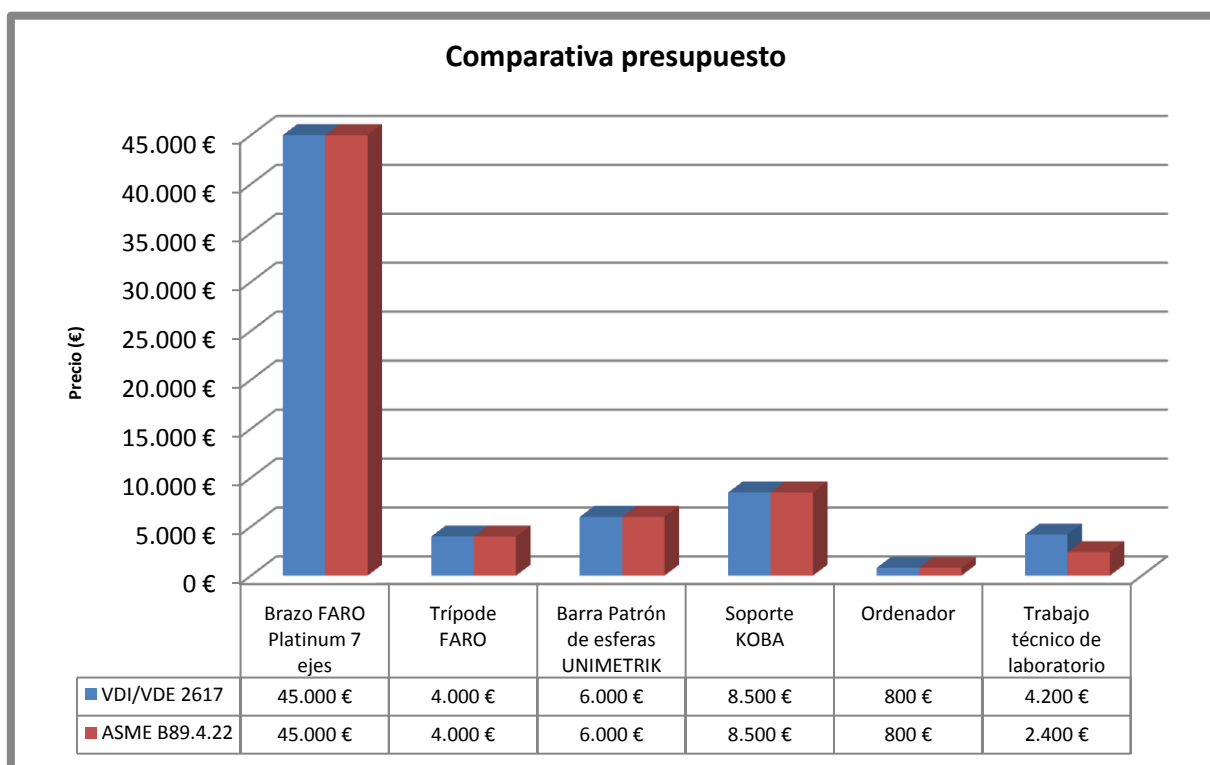
En la comparativa final de ambas normativas, se diferencia claramente una mayor duración de la evaluación según la directriz “VDI/VDE 2617” respecto a la norma “ASME B89.4.22-2004”, que podríamos resumir en un rango de 1 a 2 horas de mayor duración del trabajo, lo que en síntesis no es muy significativo respecto al tiempo total de trabajo. Por el contrario, si se evalúa el tiempo de trabajo posterior de análisis de datos y resultados, es destacable que en la normativa alemana, se caracterizan un total de 585 esferas frente a las 43 esferas y 3 asientos cinemáticos que se caracterizan en la normativa americana, lo que hace, dependiendo del tipo método de análisis utilizado, un aumento considerable del tiempo de trabajo completo.

3.3. PRESUPUESTO.

A continuación se cuantifica la inversión que supone llevar a cabo cada una de las normativas descritas. La inversión es determinada por los equipos utilizados durante la evaluación y el trabajo realizado por el operario, considerando 60€ por hora de trabajo del operario, incluyendo en ese precio el uso del laboratorio de metrología.

Por lo tanto, esta comparativa únicamente se ve influenciada por la duración del trabajo del operador de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado. Para la comparativa, se ha considerado un tiempo de trabajo de 40 horas para la realización de la evaluación de acuerdo a la norma “ASME B89.4.22-2004”, y 70 horas para la realización de la evaluación de acuerdo a la directriz “VDI/VDE 2617”. Ese tiempo incluye, la propia evaluación del brazo articulado en el laboratorio de metrología ya especificado antes, junto con un tiempo de preparación teórica para la realización de las mediciones, mediante el conocimiento de normativas y procedimientos, y un tiempo dedicado al análisis y obtención de resultados que especifica cada normativa, mediante el empleo de los software mencionados como “FARO CAM2 MEASURE”, “MATLAB” y “EXCEL”.

Seguidamente se presenta el gráfico comparativo del presupuesto de realización de ambas normativas, especificando el coste de cada concepto.



Comparativa presupuesto necesario para la ejecución de ambas normativas.

3.4. CRITERIOS DE VERIFICACIÓN.

Cada una de las normativas tiene unos métodos distintos de aceptación de la especificación de rendimiento y precisión de la máquina evaluada.

Como se explica en el documento “Memoria”, en la directriz “VDI/VDE 2617”, cada valor de error de cada prueba realizada, debe situarse por debajo de un error máximo permisible, *MPE*. Por lo que el rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado se verifica si todos los valores de error se encuentran dentro del rango de conformidad.

Por otro lado, la norma “ASME B89.4.22-2004” especifica que los valores de error deben situarse en zonas de error incluidos por el fabricante del equipo, pero en este caso, no se refiere a errores máximos permisibles, *MPE*, como la normativa anterior.

En ambos casos se refieren a unos valores de margen de error que el fabricante no distribuye, ya que para la máquina empleada, los únicos datos de precisión incluidos por el fabricante fueron el error verificado para la máquina en la “prueba de articulación de punto único (SPAT)” y “prueba de rendimiento volumétrico” de la norma “ASME B89.4.22-2004”.

Asimismo en caso de obtención de errores fuera de esos márgenes de error, se especifica que debe procederse de la siguiente manera:

La directriz “VDI/VDE 2617” únicamente especifica para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” que cada longitud de la prueba que muestre un valor extremo, se medirá otras diez veces en la misma posición y dirección, y se verificará el rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado, si todos los valores del error de indicación para estas mediciones repetidas, se encuentran dentro del rango de conformidad.

Asimismo, la norma “ASME B89.4.22-2004” explica que si el resultado de la prueba se encuentra en una zona de rechazo de no más del 25% del valor de la especificación, entonces la prueba se puede repetir (una única vez). La media aritmética de los resultados de ambos ensayos, se considerará el resultado.

Para ambas normativas, una medida errónea debe ser repetida, puesto que en principio, ese error es achacable al operario. Pero para ambos casos, es difícil determinar durante la prueba si se ha realizado una medida errónea o no, fundamentalmente para la prueba de la directriz VDI/VDE, donde se determinan 585 esferas.

3.5. APLICACIONES.

Ambas normativas, tienen la misma aplicación fundamental, describir los procedimientos para verificar los valores de precisión para la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado distribuidos por el fabricante.

La directriz “VDI/VDE 2617” especifica las características que sirven para describir la precisión de las máquinas de medición por coordenadas (CMMs) y describe los procedimientos para el control de estas características.

La directriz describe procedimientos para evaluar brazos articulados de medición por coordenadas por palpadores de contacto. Se puede aplicar en:

- Aceptación de pruebas que permitan verificar la conformidad de la máquina de medición por coordenadas y su palpador, con las especificaciones del fabricante.
- Pruebas de verificación adicional realizadas por el usuario para comprobaciones periódicas del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador.
- Comprobaciones provisionales realizadas por el usuario para la vigilancia del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador entre pruebas de verificación.

Asimismo, el principal objetivo de la norma “ASME B89.4.22-2004”, es clarificar el procedimiento de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMMs) y facilitar las comparaciones entre máquinas. La norma “ASME B89.4.22-2004” define los métodos de prueba capaces de obtener resultados adecuados para la mayoría de de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado y no pretende remplazar pruebas más completas que son requeridas para aplicaciones especiales.

La intención de esta norma es especificar los métodos más simples que pueden ser usados para una evaluación razonable. Se reconoce que una evaluación más completa puede ser apropiada para aplicaciones especiales. Estos métodos, sin embargo, se deben especificar detalladamente en la especificación de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado.