

**ESCUELA UNIVERSITARIA
DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

**ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE
VERIFICACIÓN DE BRAZOS ARTICULADOS
DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.**

NORMA ASME B89.4.22-2004

Realizado por:
JAVIER BONILLA GONZÁLEZ

Dirigido por:
D. CARLOS E. CAJAL HERNANDO
D. JORGE SANTOLARIA MAZO



INGENIERÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

Mayo, 2010

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.2 ÁMBITO	5
1.3 ALCANCE	8
2 PLANIFICACIÓN	9
3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO.....	11
3.1 APRENDIZAJE DE SOFTWARES	11
3.1.1 CAM2 MEASURE (FARO).....	11
3.1.2 MATLAB.....	13
3.1.3 MICROSOFT EXCEL.	14
3.2 DOCUMENTACIÓN GENERADA	15
4 DIFICULTADES Y DESVIACIONES RESPECTO A LA PLANIFICACIÓN	25
4.1 DIFICULTADES DE TRATAMIENTO DE DATOS.....	25
4.2 DIFICULTADES DE COLOCACIÓN	26
4.3 DIFICULTADES DE LOGÍSTICA	26
5 DEDICACIÓN	27
6 CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES ADQUIRIDAS	29
7 ASPECTOS ECONÓMICOS	31
8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	32
8.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO	32
8.2 CONCLUSIONES PERSONALES	33
8.3 LÍNEAS FUTURAS	33
ANEXO A. EFFECTIVE DIAMETER PERFORMANCE TEST.	35
ANEXO B. SINGLE-POINT ARTICULATION TEST.....	49
ANEXO C. VOLUMETRIC PERFORMANCE TEST.....	70
ANEXO D. COMPARACIÓN CON VDI	103
ANEXO E. CERTIFICADO BARRA PATRÓN DE ESFERAS	110



1.- INTRODUCCIÓN

El proyecto que se describe a continuación ha sido realizado por Javier Bonilla González en colaboración con el *Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación*, perteneciente al Área de Procesos de fabricación, ubicado en el Centro Politécnico Superior de la universidad de Zaragoza, edificio Torres Quevedo. Este proyecto ha sido tutorizado por Carlos E. Cajal Hernando y Jorge Santolaria Mazo como directores de proyecto.

El Proyecto consiste en la evaluación del estado y propiedades generales de un brazo de medida de marca Faro, un brazo de gama alta con las siguientes características:

- Modelo: Brazo Faro Platinum 7 ejes.
- Rango de medida: 2,4 metros (diámetro del volumen de trabajo).
- Nº de serie: P08-05-0521419.
- Certificado 2sigma (Single point articulation performance test): +/- 0,030mm.
- Fecha certificación: 14 de Noviembre de 2007.



Figura 1.1: Brazo FARO Platinum.



Otro de los elementos a tener en cuenta en la realización es de este proyecto, debido a que la mayor parte de las pruebas requieren de su uso, es la barra patrón de esferas, la cual presenta las siguientes particularidades:

- Marca: UNIMETRIK.
- Código de Identificación: UMTK1605.
- Campo de medida (mm): 1400,000.



Figura 1.2: Vista del trípode y de la barra patrón con su soporte en dos posiciones.

Certificado de calibración de la barra patrón de esferas (se adjunta en Anexo):

- Número: U20279.
- ENAC Calibración: Nº 115/LC289.
- Unimetrik, S.A. Laboratorio de calibración.
- Fecha de calibración: 1 de Julio de 2004.
- Director laboratorio: Jesús Albéniz Puelles.

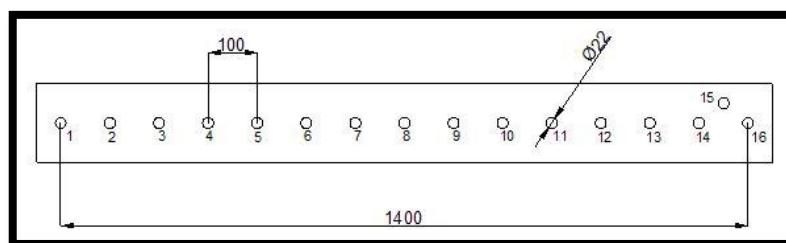


Figura 1.3: Representación esquemática de la barra patrón de esferas.



1.1.- OBJETIVOS

Este proyecto tiene por objetivo principal la evaluación del funcionamiento de un brazo articulado de medición por coordenadas mediante la *Norma ASME B89.4.22-2004 (Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines)*, norma americana (The American Society of Mechanical Engineers) dedicada a los *Métodos para la evaluación del funcionamiento de brazos articulados de medición por coordenadas*, con fecha de emisión 12 de Agosto de 2005.

1.2.- ÁMBITO

El presente proyecto, del que es objeto esta memoria, se centra exclusivamente en el análisis de la precisión de un brazo articulado de medición con la ayuda de una barra patrón de esferas y un asiento cinemático.

Dada la creciente demanda y uso de estos equipos, se hace necesario el establecimiento de pruebas normalizadas debido a la falta de normalización en este campo. De esta manera sería posible comparar entre distintos equipos y así justificar su precio. En cualquier caso, esto sería causado por las características metrológicas y no tanto por criterios comerciales.

Para ello salió a la luz la norma ASME B89.4.22-2004. Se trata de una norma elaborada por un comité de trabajo dentro del comité B89 de metrología dimensional de ASME, formado por componentes provenientes del mundo industrial, del ámbito de la investigación y de los principales fabricantes de brazos articulados. La norma hereda la experiencia acumulada en la definición y realización de procedimientos de evaluación propios de cada fabricante recomendando, los procedimientos que han de seguirse para una evaluación fiable del comportamiento del brazo de medida.



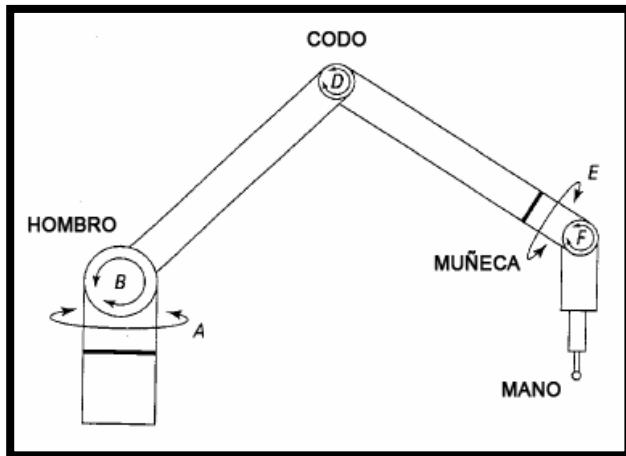
Dicha norma propone la realización de diferentes pruebas para llevar a cabo la evaluación de las características metrológicas de los brazos de medida:

- Prueba de esfera punto a punto o prueba de diámetro efectivo.
- Prueba de articulación de punto sencillo, de repetibilidad de punto o de cono.
- Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico.

Dichos ensayos se explicarán con detenimiento más adelante.

El ámbito de este proyecto es el de la verificación mediante el seguimiento de la Norma ASME B89.4.22-2004, realizando todos y cada uno de los ensayos que propone dicha reglamentación y que está específicamente dirigida a los brazos articulados de medición por coordenadas. Dichos aparatos, cuya función es determinar las coordenadas X, Y, Z de un punto en su volumen de trabajo con respecto a un sistema de referencia global, están formados por una serie de tramos rectos unidos por articulaciones giratorias que proporcionan los grados de libertad necesarios para alcanzar las posiciones de medida requeridas. Otra característica de gran importancia es su modo de operación manual, por la cual se debe tener en cuenta la posible influencia del operario que lo maneje.

Un brazo articulado de medida consiste en una serie de tramos conectados generalmente por articulaciones dobles que permiten realizar al brazo los giros necesarios para alcanzar una posición en el espacio. Estas articulaciones dobles materializan giros entorno a ejes perpendiculares entre si. Su naturaleza de operación manual hace que no se presenten configuraciones con articulaciones prismáticas que complicarían su manipulación, por lo que, los brazos de medida existentes en la actualidad, presentan configuraciones basadas en articulaciones giratorias.



En todos los brazos de medida, es posible diferenciar cuatro zonas. La forma de denominar a estas cuatro zonas es hombro, codo, muñeca y mano, por su similitud con un brazo humano.

Figura 1.4: Zonas y configuración de un brazo de medida.

Cada una de estas zonas representa la o las articulaciones correspondientes, cada una de ellas con uno o dos grados de libertad. Existen dos formas generalizadas de describir la configuración de un brazo en función de los grados de libertad de sus articulaciones. La primera de ellas consiste en indicar, mediante tres números consecutivos los grados de libertad de las articulaciones del hombro, del codo y de la mano o muñeca respectivamente. Por otro lado, otra forma de definir las rotaciones presentes en cada parte del brazo es especificar mediante una cadena de letras cada una de las rotaciones posibles de las articulaciones. En caso de que el brazo tenga menos grados de libertad, se eliminará de la cadena la letra correspondiente a la articulación, empezando a nombrar por la primera articulación o giro "a".

Además de diferentes configuraciones, existen diferentes volúmenes de trabajo definidos para brazos de medida en función de la aplicación final a la que vayan destinados y al catálogo de cada fabricante. El volumen de trabajo de un brazo de medida está determinado por su longitud total, que define una esfera de radio la longitud del brazo. La forma habitual de especificar el rango de trabajo es mediante la indicación de la longitud total del brazo, es decir, del radio de la esfera. Los rangos disponibles en el mercado varían normalmente entre 1 y 3,5 metros, siendo posibles otros rangos en función de la aplicación final del brazo.



1.3.- ALCANCE

En el vigente trabajo, en lo que se refiere a mis competencias, se pensó en las siguientes tareas a realizar:

- Aprendizaje del software que incorpora el brazo articulado.
- Noción de los posibles usos de la máquina de medición.
- Su utilización concretándola a la medida de esferas y patrones y su calibración.
- Cálculo de radios y de las longitudes entre esferas mediante programas informáticos tales como *MATLAB*.
- Uso de los procedimientos expuestos en la Norma ASME para dichos aparatos para el cálculo de los errores del brazo articulado.
- Representación mediante gráficos de estos errores y desviaciones mediante herramientas como *EXCEL*.
- Representación tridimensional del volumen de trabajo.
- Obtención de conclusiones al respecto de los resultados hallados.

Por otro lado, lo que no se realizaría:

- Medida de otros patrones de medición u objetos susceptibles de medición mediante brazo articulado de medición por coordenadas.
- Calibrado y toma de datos con otros aparatos de medición por coordenadas o incluso con otra marca de brazo articulado.
- Cálculo de los errores respectivos de cada articulación del brazo.



2.- PLANIFICACIÓN

El trabajo realizado durante estos meses se puede resumir con la siguiente cronología:

29 – Septiembre – 2009: 1^a Reunión (explicación general).

30 – Septiembre – 2009 al 13 – Octubre – 2009: Estudio de las principales características de los brazos articulados (Capítulo 3: Brazos articulados de medición por coordenadas).

14 – Octubre – 2009 al 20 – Octubre – 2009: Estudio de la Norma ASME B89.4.22-2004.

21 – Octubre – 2009 al 9 – Noviembre – 2009: Estudio de la Norma VDI/VDE 2617 Parte 9.

10 – Noviembre – 2009 al 18 – Noviembre – 2009: Realización de las tablas y descripción de los ensayos a realizar en ambas normas.

19 – Noviembre – 2009: El trípode que mantendrá al brazo en la misma posición ya está listo para ser utilizado.

26 – Noviembre – 2009: 1^a sesión con el brazo (pruebas de aprendizaje).

30 – Noviembre – 2009: Medida de esferas y realización del primer informe mediante la utilización del programa *MATLAB* para el cálculo de centros, radios, distancias y desviaciones de las esferas (Informe 1).

01 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de articulación de punto sencillo, de repetibilidad de punto o de cono (Single Point Articulation Performance Test), Prueba de esfera punto a punto o prueba de diámetro efectivo (Effective Diameter Performance Test) y Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test) en las posiciones P4 y P14.



02 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test). Posiciones: P8, P10, P11, P12, P13, P15, P16 y P17.

09 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test) en las posiciones P1, P2, P3, P5, P6, P7, P9, P18, P19 y P20. Ensayos VDI: Error de Sondeo en la posición P1.

10 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Error de Sondeo. Posiciones: P2 y P3.

11 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial. Posiciones: P1y P2.

12 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial. Posiciones: P2 y P3.

14 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial en las posiciones P3 y P4. Volumen Completo en las posiciones P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7.

18 – Diciembre – 2009: Recopilación y copia de datos exportándolos del software del brazo de medida.

19 – Diciembre – 2009 al 21 – Enero – 2010: Tratamiento de los datos obtenidos en el programa de cálculo *MATLAB*.

22 – Enero – 2010 al 05 – Marzo – 2010: Cálculo de errores y creación de gráficos mediante las hojas de *EXCEL* como resultados según la Norma ASME.

05 – Marzo – 2010 al 11 – Mayo – 2010: Redacción de la memoria.



3.- DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Para poder llevar a cabo esta evaluación se han seguido los siguiente pasos:

- En primer lugar, estudio y profundización del campo de los brazos de medición.
- En segundo lugar, familiarización y aprendizaje del uso de tales aparatos.
- En tercer lugar, toma de datos con el brazo de medir por coordenadas.
- En cuarto lugar, uso del software *CAM2 Measure* de la empresa Faro.
- En quinto lugar, exportación de tales datos al programa *MATLAB* para su posterior tratado y obtención de resultados.
- Y, por último, ordenación de resultados y creación de gráficos en *EXCEL*.

Las pruebas han sido en ambiente a temperatura de 20 °C +/- 1 °C.

La temperatura del brazo osciló entre 24,417 °C y 25,600 °C en los ensayos.

3.1.- APRENDIZAJE DE SOFTWARES

Para poder llevar a cabo los objetivos expuestos anteriormente se hace imprescindible la correcta utilización de distintos programas informáticos que faciliten el trabajo y optimicen los resultados. Son los expuestos a continuación.

3.1.1.- CAM2 MEASURE (FARO)

El software que proporciona la empresa FARO para sus brazos articulados de medición por coordenadas es el *CAM2 Measure*, programa de sencillo manejo y con un interface bien distribuido para facilitar su utilización por parte del usuario.



Este programa nos permite realizar muchas acciones con el propio brazo, pero sería conveniente centrarse en las usadas en el proyecto que nos ocupa:

- Calibración del palpador del brazo antes de comenzar a ser usado donde se pueden observar las características principales, tales como, por ejemplo:
 - Palpador de esfera de 6 mm.
 - Coordenadas X(-0,13459936) Y(0,16753297) Z(220,75418).
 - 2Sigma (0,0095005716).
 - Error (0,023127435).
 - Fecha y hora (dic. 01, 2009 16:29).
 - Temperatura (25,455751).
- Medida de esferas y de distancias entre sus respectivos centros.
- Medida de asientos cónicos o cinemáticos.



CAM2 Measure es un programa de recogida y tratado de datos que se capturan con el brazo de medición, y con el cual es posible realizar cálculos sencillos y obtener resultados tales como, por ejemplo, distancias, longitudes, radios o diámetros.

Figura 3.1: Portada *CAM2 Measure*.

Es un software muy sencillo y muy visual, con lo cual su aprendizaje es ameno y carece de dificultad, excepto para las visualizaciones de piezas que se están midiendo.

CAM2 Measure es un software de medición ideal para inspecciones y comparaciones de CAD contra pieza, donde cada parte medida se puede comparar con los archivos de ingeniería.

Sus aplicaciones más comunes son:

- Aeronáutica: Simulación, reparación y ajustes.
- Máquina y herramienta: Montaje y ajustes.
- Automoción: Carrocerías, prototipos, interiores.
- Moldes: Moldes preserie, composites, piezas de gran tamaño.



Cuenta con las siguientes especificaciones:

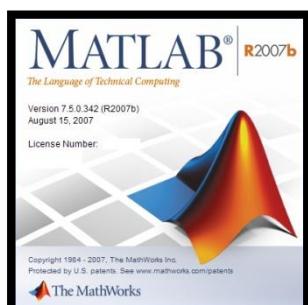
- Plataforma: Windows 2000, Windows XP.
- Entrada de datos: Incluido IGES, ASCII, VDA/FS & ACL.
- Opciones del coste: Unigraphics, Solidworks, Parasolid, CATIA, Solid Edge, ProE & Inventor.
- Salida de datos: IGES.
- Idiomas: Alemán, Chino, Español, Francés, Inglés, Italiano, Japonés, Portugués.

3.1.2.- MATLAB

MATLAB es un programa de cálculo matemático, análisis, visualización y desarrollo de algoritmos. Cubre una amplia gama de tareas en una gran variedad de sectores, desde el del automóvil y la electrónica al de equipamientos industriales y telecomunicaciones.

Este programa permite desarrollar desde un algoritmo, un análisis, un gráfico o un informe hasta una simulación de software. Su entorno flexible permite realizar análisis avanzados, visualizar datos y desarrollar algoritmos en una fracción del tiempo que se tarda en C, C++ o Fortran. El lenguaje abierto posibilita compartir rápidamente ideas y desarrollar soluciones.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.



MATLAB es la abreviatura de *MAT*rix *LAB*oratory (laboratorio de matrices). Es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Figura 3.2: Portada *MATLAB*.



Contiene más de 600 funciones matemáticas, estadísticas y técnicas, con lo que proporciona acceso inmediato al cálculo numérico de alto rendimiento. Esta funcionalidad se amplía con funciones gráficas interactivas para crear plots, imágenes, superficies y representaciones volumétricas.

El entorno MATLAB ofrece:

- Una plataforma de análisis flexible.
- Acceso directo a varios tipos de datos.
- Funciones para procesar datos, incluida la reducción y manipulación.
- Funciones de análisis rápidas y seguras.
- Métodos de análisis avanzado mediante toolboxes.
- Gráficos y métodos de redacción de informes para ayudarle a entender y presentar sus datos.

3.1.3.- MICROSOFT EXCEL

MICROSOFT EXCEL es una aplicación incluida dentro del paquete de programas Microsoft Office, muy utilizados en la actualidad. Es una hoja de cálculo que nos permite construir plantillas, cuadros estadísticos, registros de asistencias de notas, etc. Dicha aplicación introdujo el cálculo inteligente de celdas, donde celdas dependientes de otra que ha sido modificada, se actualizan al instante. Además tiene una amplia capacidad gráfica.



EXCEL es una aplicación para manejar hojas de cálculo. Este programa es utilizado normalmente en tareas financieras y contables. Fue la primera hoja de cálculo que permitió definir la apariencia de las fuentes, atributos de carácter y apariencia de las celdas.

Figura 3.3: Portada *MICROSOFT EXCEL*.



3.2.- DOCUMENTACIÓN GENERADA

Las pruebas propuestas por la norma ASME B89.4.22-2004 para la evaluación de las características metrológicas del brazo y que se han realizado como indica la propia normativa se detallan a continuación pormenorizadamente.

Prueba de esfera punto a punto o prueba de diámetro efectivo (*Effective Diameter Performance Test*):

Esta prueba consiste en medir una esfera calibrada, de diámetro entre 10 y 50 mm, posicionada aproximadamente a la mitad de distancia del alcance del brazo. La esfera debe ser medida tres veces en la misma posición. Cada una de las tres medidas debe realizarse con nueve puntos distribuidos en el hemisferio superior de la esfera, cuatro puntos en el ecuador, cuatro puntos a 45° y girados 45° con respecto a los tomados en el ecuador y un punto en el polo de la esfera. A lo largo de las tres medidas, las articulaciones del brazo deben cambiar lo menos posible.

El resultado de esta prueba en brazos de medida debe reflejar la desviación máxima en valor absoluto entre el diámetro de la esfera nominal y el diámetro medido en las tres medidas realizadas.

Table 1 Diameter Deviations

Formula	Diameter Deviation, μm
$D_1 - D_{\text{cal}}$	
$D_2 - D_{\text{cal}}$	
$D_3 - D_{\text{cal}}$	
Max. deviation	

Tabla 3.1: Desviaciones de diámetro.



Prueba de articulación de punto sencillo, de repetibilidad de punto o de cono (Single-Point Articulation Performance Test, SPAT):

El objetivo de este test es determinar la capacidad del brazo de repetir la medida de un mismo punto desde orientaciones diferentes, lo que exige configuraciones del brazo diferentes, cubriendo así distintas configuraciones de ángulos de articulación para una mismo punto medido.

Esta prueba no determina la repetibilidad de medida, ya que es necesario mantener las condiciones de medida invariadas entre captura de puntos. De este modo, el resultado de este ensayo de verificación arrojará la capacidad combinada de todos los elementos del sistema de medida para repetir las coordenadas de un punto fijo en el espacio que, dada la configuración cinemática del brazo, se considerará como su repetibilidad.

Para intentar conseguir el máximo número de orientaciones del brazo dentro del volumen de medida, la prueba se realiza en tres puntos del espacio distintos. Como en la mayor parte de sistemas de medida, es muy difícil establecer el mínimo número de posiciones del espacio de trabajo que deben cubrirse en cualquier test de evaluación o verificación para garantizar resultados extrapolables a todo el volumen de medida. La elección de tres posiciones para materializar los puntos fijos en el espacio tiene por objetivo aumentar el número de combinaciones de articulación que se comprobarán, aunque cualquier procedimiento de evaluación más profundo, exige la realización de esta prueba en muchos más puntos del espacio.

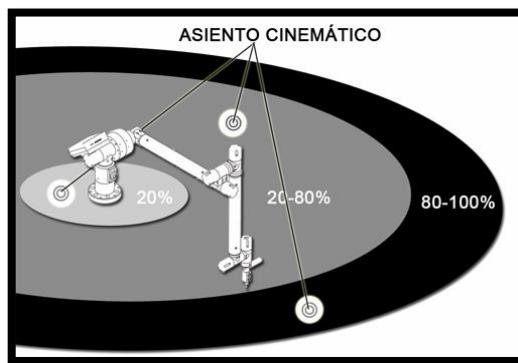


Figura 3.4: Localizaciones del asiento cinemático en el espacio.



El ensayo se realiza materializando el punto fijo a medir mediante un asiento o mediante asientos cinemáticos. El objeto de estos asientos es mantener el contacto entre el asiento y la esfera del palpador montado en el brazo en tres puntos, independientemente de la orientación de la mano del brazo. De este modo se asegura que, para todos los datos capturados, el centro de la esfera palpadora, que representa el punto medido, se encuentre siempre en la misma posición física.

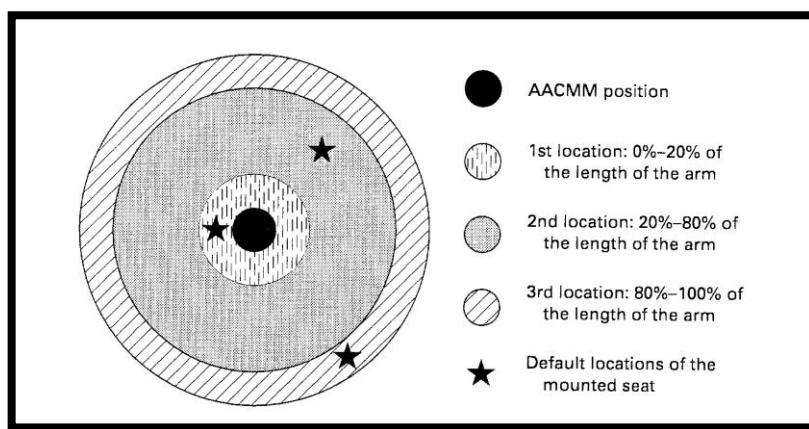
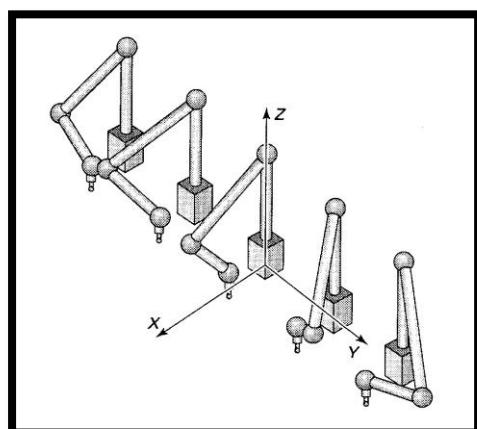


Figura 3.5: Las tres posiciones del asiento en el ensayo SPAT.

La primera posición para el asiento cinemático debe encontrarse en un radio respecto a la posición del brazo dentro del 20% de su longitud, centrado respecto a este. La segunda posición se elegirá dentro de un anillo entre el 20 y el 80% de la longitud del brazo, fijando la última posición en la zona restante.



Los procedimientos normalizados recomiendan diez posiciones del brazo en cada uno de los tres puntos, buscando la máxima variación en sus articulaciones.

Repetiendo las cinco posiciones de la figura en dos ocasiones.

Figura 3.6: Vista isométrica de las articulaciones.



Por ello, es recomendable que después de capturar cada punto, el palpador se retire del asiento y se vuelva a posicionar antes de la captura del siguiente punto en una orientación diferente, intentando mantener en lo posible constante la fuerza de palpado.

Para el caso de palpadores activos. En este caso, existe un procedimiento similar solo que el punto fijo se materializa con una esfera patrón, de modo que debe ser palpada en distintos puntos de su superficie en distintas orientaciones del espacio. De nuevo, en este caso, se toman tres posiciones de la esfera con diez puntos palpados en distinta orientación para cada una de ellas.

Con los datos obtenidos en las tres posiciones del asiento cinemático, equivalente en el caso de esfera patrón, debe calcularse la desviación de los puntos medidos con respecto a la media de cada uno de los diez puntos capturados para cada posición del asiento, que representará el punto X, Y, Z nominal. Esta desviación se obtendrá calculando la distancia euclídea de cada punto a la media en la posición correspondiente. Además, se obtendrá la desviación estándar de la distribución de distancias para cada uno de los tres puntos considerados. Con esto, el ensayo concluirá con la obtención del valor máximo de distancia (δ_{\max}) y de desviación (σ).

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2} \quad (1)$$

where

X_i, Y_i, Z_i = measured coordinates
 X_a, Y_a, Z_a = average coordinates

Figura 3.7: Ecuación (1). Desviación según ensayo SPAT.

$$2s_{SPAT} = 2\sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

where

n = number of measurements (in this case, $n = 10$)

Figura 3.8: Ecuación (2). Valor 2σ según ensayo SPAT.



Como resultado final de la prueba es habitual considerar el valor de distancia máximo y el valor 2σ de la distribución de distancias correspondiente a la posición del asiento que ha producido ese valor de distancia. Ambos deberán encontrarse por debajo del límite fijado por el fabricante o por el contrato de compraventa del equipo.

Los resultados obtenidos en esta prueba se resumen en la siguiente tabla:

Nº Medida	X _i	Y _i	Z _i	δ _i (1)	δ _i ²
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
Promedio					
δ _{max}					
2σ _{SPAT} (2)					

Tabla 3.2: Resultados para ensayo SPAT.

Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico
(Volumetric Performance Test):

El ensayo consiste en la medición de distancias materializadas por un artefacto patrón calibrado, dispuesto en distintas orientaciones del volumen de trabajo. Los patrones que materializan las distancias pueden ser de distinta forma y naturaleza siendo los más habituales los patrones escalonados y las barras de esferas. En el caso de barras de esferas, son necesarios patrones que materialicen dos distancias, una correspondiente aproximadamente al 60% de la longitud del brazo y la otra entorno al 130% de esa longitud. En el caso más general, los patrones de bolas materializan una distancia entre centros de esferas, que deberá estar calibrada.



El objetivo de esta prueba es comprobar el funcionamiento del brazo en todo su volumen, por lo que se divide el espacio de trabajo del brazo, que será una esfera de diámetro dos veces la longitud del brazo a partir del eje de su primera articulación, en dos hemisferios separados por el plano medio a la altura de la base del brazo.

Cada uno de estos hemisferios se divide en cuatro cuadrantes, de modo que el espacio total de trabajo del brazo queda dividido en ocho octantes. Según la referencia indicada por el fabricante para establecer la parte frontal del brazo, se establece la numeración de estos octantes.

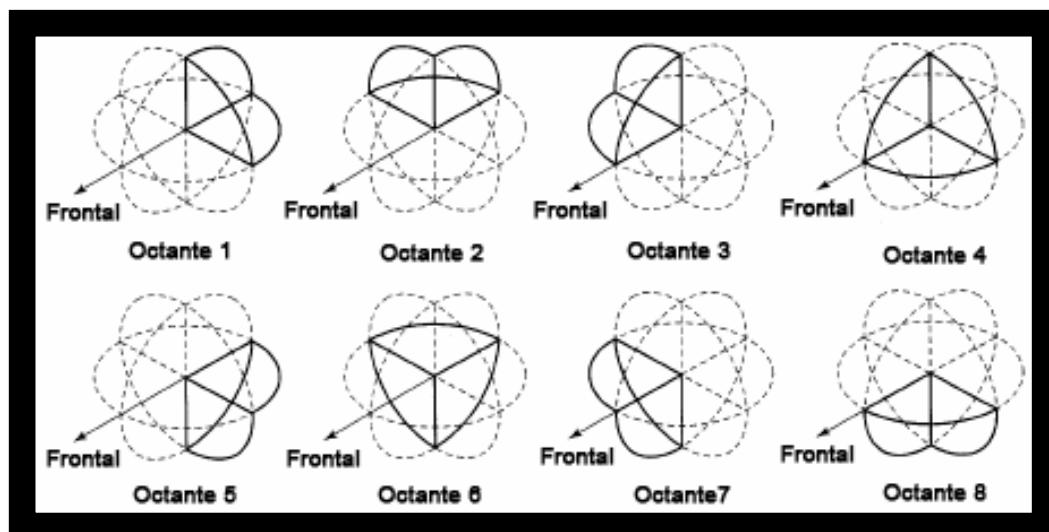


Figura 3.10: Numeración de los octantes del volumen de medida del brazo articulado.

Las barras de bolas deben ser posicionadas en horizontal, vertical y a 45 ° con respecto al brazo. La forma de determinar una posición para el ensayo vendrá dada por la especificación del tipo de patrón, largo o corto, los octantes a los que afecta, la inclinación, la distancia a la base del brazo y la dirección. La distancia a la base del brazo se especifica como cerca o lejos, entendiendo por cerca, las posiciones en las que la barra se encuentra a una distancia de la base menor que la mitad de la longitud total del brazo, y lejos, las posiciones más allá de la mitad de la longitud del brazo.



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



Con respecto a la dirección, las posiciones horizontales y a 45° quedarán completamente determinadas indicando si deben ser posicionadas radial o tangencialmente al brazo.

Posición	Longitud Patrón	Octantes	Inclinación	Distancia	Dirección
1	Corta	8	Horizontal	Cerca	Radial
2	Corta	5	Horizontal	Cerca	Radial
3	Corta	1-2	Horizontal	Lejos	Tangencial
4	Corta	4-7	45°	Lejos	Tangencial
5	Corta	7-3	Vertical	Lejos	Tangencial
6	Corta	1-5	Vertical	Lejos	Tangencial
7	Corta	2	Horizontal	Cerca	Radial
8	Larga	2-8	45°	Cerca	Tangencial
9	Corta	3	Horizontal	Cerca	Radial
10	Larga	1-7	45°	Cerca	Tangencial
11	Corta	1-6	45°	Lejos	Tangencial
12	Corta	6-3	45°	Lejos	Tangencial
13	Corta	5-4	45°	Lejos	Tangencial
14	Corta	3-8	45°	Lejos	Tangencial
15	Corta	5-2	45°	Lejos	Tangencial
16	Corta	1-8	45°	Lejos	Tangencial
17	Corta	2-7	45°	Lejos	Tangencial
18	Larga	3-4	Horizontal	Cerca	Tangencial
19	Larga	2-6	Vertical	Lejos	Tangencial
20	Larga	4-8	Vertical	Cerca	Tangencial

Tabla 3.3: Posiciones del patrón para ensayo de precisión volumétrica.

De esta forma, el procedimiento normalizado establece 20 posiciones de la barra en todo el volumen del brazo, dos en posición vertical, diez en horizontal y ocho a 45° . Para cada una de estas posiciones será necesario medir la distancia materializada por el patrón, de forma que se capten cinco puntos por esfera y se evalúe la distancia entre ellas.

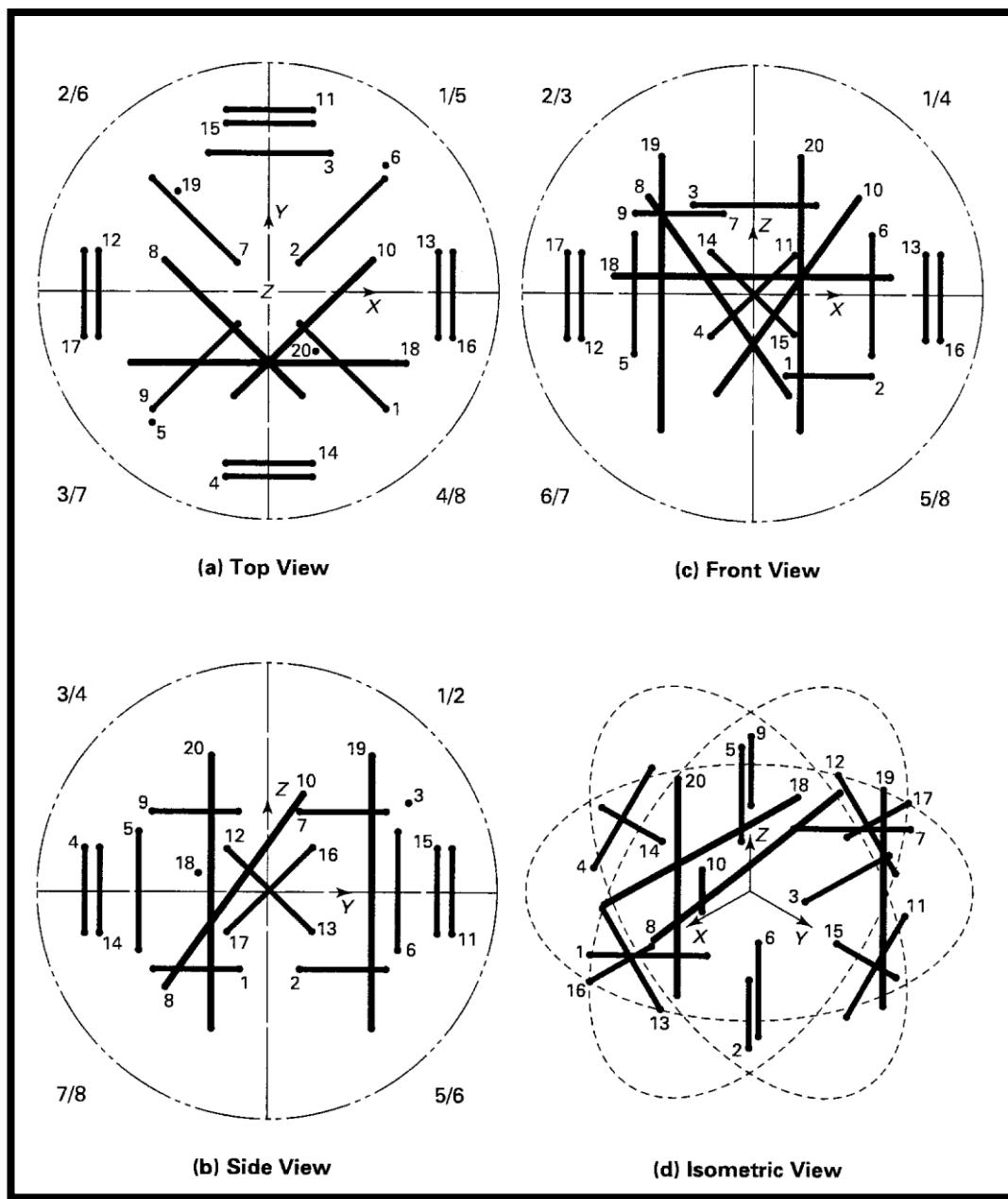


Figura 3.9: Vistas de las posiciones de la barra patrón.

Para cada una de las posiciones medidas se obtendrá el error de medida en distancias, es decir, la diferencia entre la distancia medida y la calibrada.



Como resultado final de esta prueba se obtendrán tres parámetros:

- La máxima desviación obtenida para todas las posiciones.
- El rango de estas desviaciones.
- Un valor que da idea de la desviación media, que vendrá dado por dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas.

$$D_i = L_i - L_{\text{cal}} \quad (3)$$

Figura 3.11: Ecuación (3). Desviación según ensayo de precisión volumétrica.

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}} \quad (4)$$

n = 20 in this case

Figura 3.12: Ecuación (4). Desviación media según ensayo de precisión volumétrica.

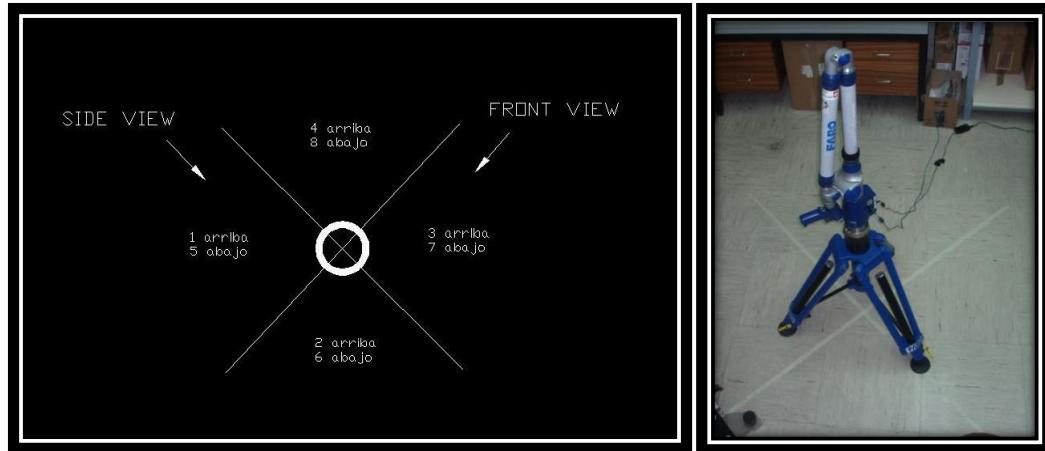


Figura 3.13: Croquis y foto de la división en octantes del volumen de medida.



Los resultados obtenidos en esta prueba se resumen en la siguiente tabla:

Posiciones	L_i	L_{cal}	$D_i (3)$	D_i^2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
Desviación máx.				
Rango ($D_{max} - D_{min}$)				
2RMS (4)				

Tabla 3.4: Resultados para ensayo de precisión volumétrica.

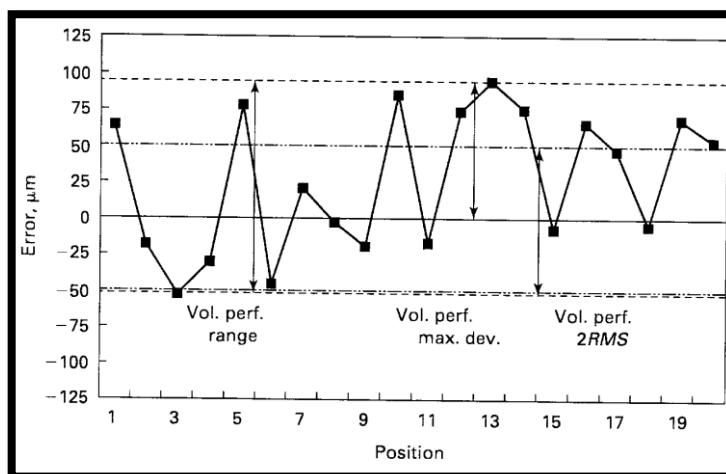


Figura 3.14: Gráfica. Error para cada posición del ensayo de precisión volumétrica.



4.- DIFICULTADES Y DESVIACIONES RESPECTO A LA PLANIFICACIÓN

Los problemas más significativos con los que nos hemos tenido que enfrentar y a los que hemos tenido que buscar una solución, ya que han surgido durante la realización del proyecto, son los explicados a continuación.

4.1.- DIFICULTADES DE TRATAMIENTO DE DATOS

A) Problema de exportación de datos procedentes del software cam2 al entorno de matlab:

A la hora de transportar los datos obtenidos en el software del brazo y poder ser tratados en *MATLAB* surgieron diversos inconvenientes, pero el más importante fue que *MATLAB* requiere de archivos de texto (por ejemplo formato txt) para la importación de datos. Debido a que los resultados logrados con *CAM2* fueron introducidos en hojas de cálculo de *EXCEL* y en dicho programa la puntuación predefinida para números decimales es la coma, pero los archivos necesarios en *MATLAB* deben ser introducidos con el punto como separador de decimales. Esto acarreó que la copia de datos fuese más costosa en cuanto a que se veían repetidas distintas tareas.

B) Errores de medida de esferas:

Después de la exportación de los datos, se llevó a cabo su tratamiento mediante los programas *EXCEL* y *MATLAB*, en los cuales se introdujeron las fórmulas que requería la norma para la obtención de resultados. En dichos resultados se apreciaron ciertas desviaciones que pueden ser debidas a errores en el palpado de las esferas del patrón o incluso (aunque menos apreciables en los resultados) del asiento cinemático. Esto puede ser debido a la inexperiencia de los operarios, sobre todo en los primeros ensayos.



4.2.- DIFICULTADES DE COLOCACIÓN

A) Dificultad de colocación de la barra patrón:

En ciertas posiciones de las pruebas que se realizaron, la barra patrón debía estar en lugares ocupados por otros objetos o máquinas en el laboratorio de metrología. Esto se tuvo que tener en cuenta a la hora del posicionamiento y para la creación de los octantes que dividían el volumen de medición.

B) Dificultad para encontrar un modo de amarre de la barra patrón:

Además en ciertas posiciones la barra debía estar situada verticalmente, con lo que el amarre al que estaba sujeta debía ser quitado y se pensó en anclarla a ese amarre pero en posición vertical.

C) Dificultad de colocación del trípode y del brazo articulado:

Otro problema añadido fue el anclaje del brazo al trípode para que el conjunto de ambos no sufriese el más mínimo movimiento, debido a que eso provocaría un error en los datos que se obtuviesen.

4.3.- DIFICULTADES DE LOGÍSTICA

A) Tiempo de espera debido a la tardanza en recibir el trípode:

La empresa proveedora del brazo recibió la petición por parte de la universidad de un trípode para el anclaje del brazo, pero se demoró bastante y este inconveniente hizo retrasarse el periodo de toma de datos con el brazo articulado pero, por otro lado, nos permitió familiarizarnos en gran medida con las normas a tratar.

B) Búsqueda de empresa que facilite presupuesto para el trabajo realizado:

Se propuso la búsqueda de diferentes empresas que aporten un presupuesto de su laboratorio metrológico que resumiese grosso modo lo que costaría el trabajo realizado en este proyecto, para saber su coste económico real en el mercado.



5.- DEDICACIÓN

La dedicación a este proyecto ha sido de aproximadamente 7 meses a tiempo completo, ya que el comienzo del mismo dio lugar el día veintinueve de Septiembre del dos mil nueve cuando se produjo la primera reunión y comenzaron los trabajos en el laboratorio de prácticas del departamento de Ingeniería de diseño y Fabricación, perteneciente al Área de Procesos de fabricación, y finalizó con la redacción de la memoria el día 11 de Mayo del dos mil diez, con una dedicación de aproximadamente unas 1200 horas de trabajo.

Se ha distribuido la siguiente manera el trabajo realizado:

29 – Septiembre – 2009: 1^a Reunión (explicación general).

30 – Septiembre – 2009 al 13 – Octubre – 2009: Estudio de las principales características de los brazos articulados (Capítulo 3: Brazos articulados de medición por coordenadas).

14 – Octubre – 2009 al 20 – Octubre – 2009: Estudio de la Norma ASME B89.4.22-2004.

21 – Octubre – 2009 al 9 – Noviembre – 2009: Estudio de la Norma VDI/VDE 2617 Parte 9.

10 – Noviembre – 2009 al 18 – Noviembre – 2009: Realización de las tablas y descripción de los ensayos a realizar en ambas normas.

19 – Noviembre – 2009: El trípode que mantendrá al brazo en la misma posición ya está listo para ser utilizado.

26 – Noviembre – 2009: 1^a sesión con el brazo (pruebas de aprendizaje).

30 – Noviembre – 2009: Medida de esferas y realización del primer informe mediante la utilización del programa *MATLAB* para el cálculo de centros, radios, distancias y desviaciones de las esferas (Informe 1).



01 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de articulación de punto sencillo, de repetibilidad de punto o de cono (Single Point Articulation Performance Test), Prueba de esfera punto a punto o prueba de diámetro efectivo (Effective Diameter Performance Test) y Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test) en las posiciones P4 y P14.

02 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test). Posiciones: P8, P10, P11, P12, P13, P15, P16 y P17.

09 – Diciembre – 2009: Ensayos ASME: Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico (Volumetric Performance Test) en las posiciones P1, P2, P3, P5, P6, P7, P9, P18, P19 y P20. Ensayos VDI: Error de Sondeo en la posición P1.

10 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Error de Sondeo. Posiciones: P2 y P3.

11 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial. Posiciones: P1y P2.

12 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial. Posiciones: P2 y P3.

14 – Diciembre – 2009: Ensayos VDI: Volumen Parcial en las posiciones P3 y P4. Volumen Completo en las posiciones P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7.

18 – Diciembre – 2009: Recopilación y copia de datos exportándolos del software del brazo de medida.

19 – Diciembre – 2009 al 21 – Enero – 2010: Tratamiento de los datos obtenidos en el programa de cálculo *MATLAB*.

22 – Enero – 2010 al 05 – Marzo – 2010: Cálculo de errores y creación de gráficos mediante las hojas de *EXCEL* como resultados según la Norma ASME.

05 – Marzo – 2010 al 11 – Mayo – 2010: Redacción de la memoria.



6.- CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES ADQUIRIDAS

Durante la realización del presente proyecto, se han ido adquiriendo diversos conocimientos y habilidades muy interesantes, y sobretodo, útiles para un futuro profesional.

En el campo que más experiencia se ha obtenido, ha sido en la utilización de distintos software, que se explicará más adelante, pero además, se han adquirido conocimientos básicos relacionados con las normativas de aparatos de medición y sobre el mundo de los brazos articulados en general.

Las habilidades adquiridas durante la realización del proyecto han sido muchas a nivel formativo, a continuación se hace una enumeración de las mismas:

- Principalmente conocimientos en el campo de los brazos articulados de medición por coordenadas, posibilidades y limitaciones dentro de él.
- Conocimiento del software *CAM2 Measure* para el tratamiento y almacenamiento de los datos obtenidos en la medición con el brazo articulado.

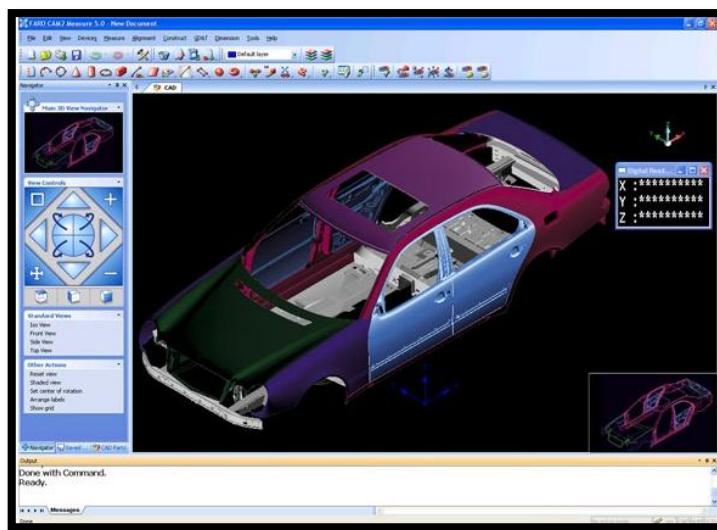


Figura 6.1: Vista de la ventana del programa *CAM2 Measure*.



- Perfeccionamiento en los conocimiento ya adquiridos en la aplicación *EXCEL* de Microsoft Office, como por ejemplo en la creación de funciones y gráficos y su posterior tratamiento.
- Iniciación en la programación en el entorno *MATLAB*: creación de funciones, gráficos y figuras como soluciones a problemas.

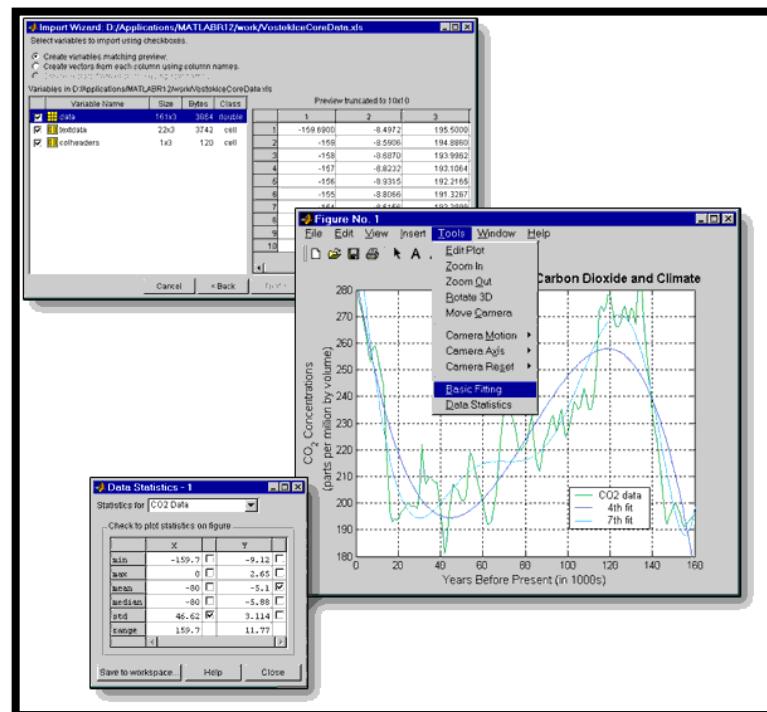


Figura 6.2: Vista de distintas ventanas del programa *MATLAB*.

- Y, por último, capacidad para la toma de decisiones y búsqueda de soluciones a problemas que surgen día a día en el mundo laboral.



7.- ASPECTOS ECONÓMICOS

Para la realización del presente proyecto se han requerido determinados componentes y operarios que hubiesen supuesto un coste en el mercado que se desglosa a continuación en la siguiente tabla a modo de presupuesto de determinada empresa que realice la verificación de brazos articulados de medición por coordenadas:

Descripción de la unidad	Unidades	Precio unidad (€)	Precio total (€)
Brazo FARO Platinum 7 ejes	1	45000	45000
Trípode FARO para Brazo articulado.	1	4000	4000
Barra Patrón de esferas UNIMETRIK.	1	6000	6000
Soporte KUKA para Barra Patrón.	1	8500	8500
Hora de trabajo operario.	40	60	2400
TOTAL			65900

Tabla 7.1: Evaluación económica.

El total de la presente evaluación económica asciende a la cantidad de **SESENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS EUROS.**

Debe tenerse en cuenta que el precio correspondiente al brazo articulado no se incluiría en el servicio porque pertenecería al cliente del laboratorio, del mismo modo que el trípode. Sería conveniente indicar que todos los utillajes del brazo se pedirían para hacer la evaluación, entonces el trípode también sería del cliente (en caso de que disponga de él).

Otra posible opción contemplaría tener un trípode en el laboratorio, en el que poder montar cualquier tipo o marca de brazo, mediante un utillaje universal.

Por otra parte, el alquiler del laboratorio está incluido en los 60 €/h del operario que realiza los ensayos.



8.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras la realización de los ensayos y el cálculo de los resultados se puede llegar a las siguientes conclusiones.

8.1.- CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO

Si nos ceñimos al trabajo que se ha ejecutado, dicho proyecto puede ser de gran utilidad en un futuro profesional, debido a su carácter teórico-práctico y a la utilización y seguimiento de normativas (muy usual en el mundo laboral).

En cuanto al aspecto relacionado con los resultados obtenidos en estas pruebas relativas a las Norma ASME la principal conclusión que se puede obtener es que la influencia del operario en los resultados obtenidos es muy elevada, de hecho se podría considerar el mayor de los factores que intervienen en los resultados a los que se ha llegado después de la realización de este proyecto.

La inexperiencia de las primeras pruebas puede conllevar desviaciones importantes en los resultados e incluso llevar a confusión en determinados errores. Por ello, la destreza que se adquiere con la práctica es de vital importancia en estos aparatos.

Además, este tipo de proyectos prácticos requieren a la persona que los realiza una cierta capacidad de improvisación para adaptarse a los distintos problemas y dificultades que surgen y a los cuales no se está preparado para afrontarlos hasta que se ha vivido en primera persona dicha situación.



8.2.- CONCLUSIONES PERSONALES

En lo que se refiere a las conclusiones personales, lo que parece de vital importancia es el aprendizaje obtenido: normativas, brazos articulados, software. Pero sobre todo la programación en entorno MATLAB, lo cual me parece de gran interés a nivel formativo y profesional.

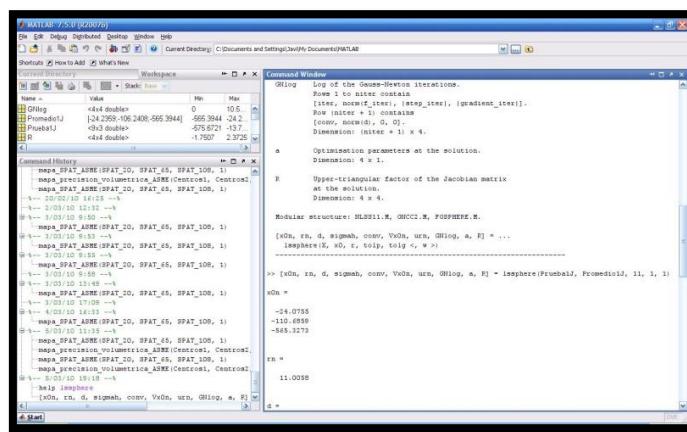


Figura 8.1: Vista del programa MATLAB.

Por otra parte, se ha trabajado en equipo, una de las características más importantes a la hora de desempeñar cualquier tipo de empleo y muy apreciado en la actualidad por la mayoría de empresas.

8.3.- LÍNEAS FUTURAS

Y, por último, en cuanto al desarrollo futuro en este campo, se puede considerar que la aparición de nuevas normativas y sobre todo en el caso de las normas DIN que se transformarán en normas ISO (UNE en España) puede causar que la normativa ASME relativa a los brazos articulados de medición caiga en desuso en Europa y por tanto que se tengan en cuenta otros parámetros y diferentes ensayos. Esto no quiere decir que pierda validez dicha norma, debido a que lo que realmente evalúan unos y otros ensayos son las características metrológicas del aparato de medición, sino que en esta parte del mundo se suelen seguir este tipo de indicaciones y en el continente americano otras.

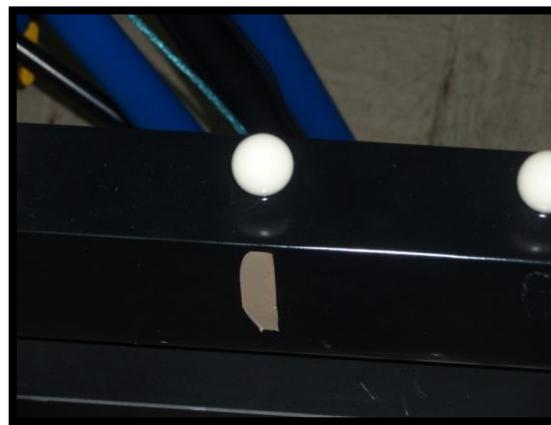
ANEXOS



ANEXO A. EFFECTIVE DIAMETER PERFORMANCE TEST

Introducción:

La prueba de esfera punto a punto o prueba de diámetro efectivo tiene por objetivo determinar la desviación máxima en valor absoluto entre el diámetro de la esfera nominal y el diámetro medido en las tres medidas realizadas.



Para el cálculo de este resultado se deben tomar nueve medidas de una esfera (en nuestro caso es la esfera nº 10 de la barra patrón de esferas, medida con una MMC), este proceso se repite tres veces para la misma esfera.





Posteriormente se introducen los datos en la hoja de *EXCEL* y se calcula la media de las medidas en los tres ejes.

Después se calcula el centro de la esfera en cada una de las tres repeticiones mediante la ejecución de la función *lssphere* en *MATLAB*. Esta función realiza el cálculo de una esfera mediante la introducción de las coordenadas X, Y, Z de cada punto tomado en la prueba y su promedio.

A continuación se muestra un ejemplo de ejecución de tal función:

Primero introducimos en la línea de comandos “*help lssphere*” donde nos muestra los parámetros a introducir y los que obtendremos.

Los datos de entrada son:

- vector (x, y, z) coordenadas de la esfera (9x3).
- coordenadas (x, y, z) del centro de la esfera (3x1).
- radio aproximado ($r = 11$ mm).
- tolerancia ($tolp = 1$).
- tolerancia ($tolg = 1$).

Y los datos de salida que nos interesan en este caso son:

- $x0n$ que representa el centro estimado de la esfera
- rn que es el radio estimado para calcular el diámetro.



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



La función quedaría de la siguiente manera:

$[xOn, rn, d, sigmah, conv, VxOn, urn, GNlog, a, R] = lsphere(prueba, promedio, 11, 1, 1)$

A continuación se muestran varias imágenes del programa MATLAB con la ejecución de la función *lsphere*:

```
>> help lsphere
LSSPHERE M Least-squares sphere using Gauss-Newton.

Version 1.0
Last amended I M Smith 27 May 2002.
Created I M Smith 08 Mar 2002

Input
X      Array [x y z] where x = vector of x-coordinates,
       y = vector of y-coordinates and z = vector of z-coordinates.
       Dimension: m x 3.

x0     Estimate of the sphere centre.
       Dimension: 3 x 1.

r      Estimate of the sphere radius.
       Dimension: 1 x 1.

tolp   Tolerance for test on step length.
       Dimension: 1 x 1.

tolg   Tolerance for test on gradient.
       Dimension: 1 x 1.

<Optional...
w      Weights.
       Dimension: m x 1.
...>

Output
x0n    Estimate of the sphere centre.
       Dimension: 3 x 1.

rn     Estimate of the sphere radius.
```

```
>> [xOn, rn, d, sigmah, conv, VxOn, urn, GNlog, a, R] = lsphere(prueba, promedio, 11, 1, 1)
xOn =
548.2545
-110.5904
-810.9234

rn =
10.9940

d =
-0.0112
-0.0183
0.0086
-0.0083
0.0099
0.0061
0.0086
-0.0009
-0.0009
0.0064

sigmah =
0.0120

conv =
```



Resultados:

a) OPERARIO 1:

MEDIDA 1	Medidas	X	Y	Z
1	-29,4712	-110,6566	-555,7166	
2	-34,3066	-109,7388	-569,316	
3	-22,2657	-107,6227	-575,7228	
4	-13,9497	-110,2452	-561,1037	
5	-21,8714	-103,9022	-556,9449	
6	-30,8648	-102,4932	-562,4606	
7	-26,1834	-100,2789	-568,2424	
8	-18,4557	-101,2621	-564,6138	
9	-24,8897	-99,7593	-564,2057	
Promedio	-24,6954	-105,1066	-564,2585	

MEDIDA 2	Medidas	X	Y	Z
1	-28,9775	-108,3559	-555,7732	
2	-34,4036	-109,5375	-568,9671	
3	-20,5377	-109,8755	-575,7165	
4	-15,9746	-107,4883	-558,6103	
5	-22,8503	-101,5028	-559,3966	
6	-29,8664	-101,4227	-563,9705	
7	-25,1767	-100,3542	-568,9714	
8	-17,8183	-101,633	-565,3696	
9	-25,1613	-99,8148	-563,9849	
Promedio	-24,5296	-104,4427	-564,5289	

MEDIDA 3	Medidas	X	Y	Z
1	-29,1873	-109,4922	-555,6817	
2	-33,8757	-107,8558	-569,4564	
3	-18,6082	-107,4987	-574,3303	
4	-14,5429	-107,6336	-560,7732	
5	-23,9462	-102,2396	-558,2834	
6	-31,9458	-103,0918	-564,0849	
7	-25,9093	-101,1713	-570,5504	
8	-18,3635	-101,2869	-565,7131	
9	-24,7786	-99,7129	-564,7639	
Promedio	-24,5731	-104,4425	-564,8486	



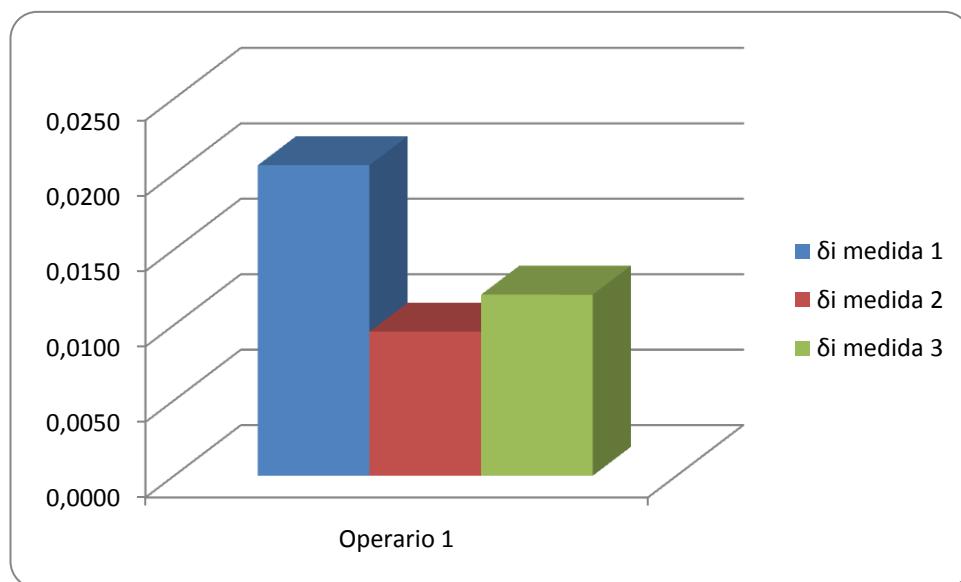
CENTROS DE ESFERA PARA LAS TRES MEDIDAS REALIZADAS POR EL
OPERARIO 1:

centro esfera MEDIDA 1		
X	Y	Z
-24,1007	-110,6772	-565,3177

centro esfera MEDIDA 2		
X	Y	Z
-24,0784	-110,6767	-565,3374

centro esfera MEDIDA 3		
X	Y	Z
-24,0763	-110,6702	-565,3377

DESVIACIONES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 1:



δ_i medida 1 0,0206 **δ_i medida 2** 0,0095 **δ_i medida 3** 0,0120



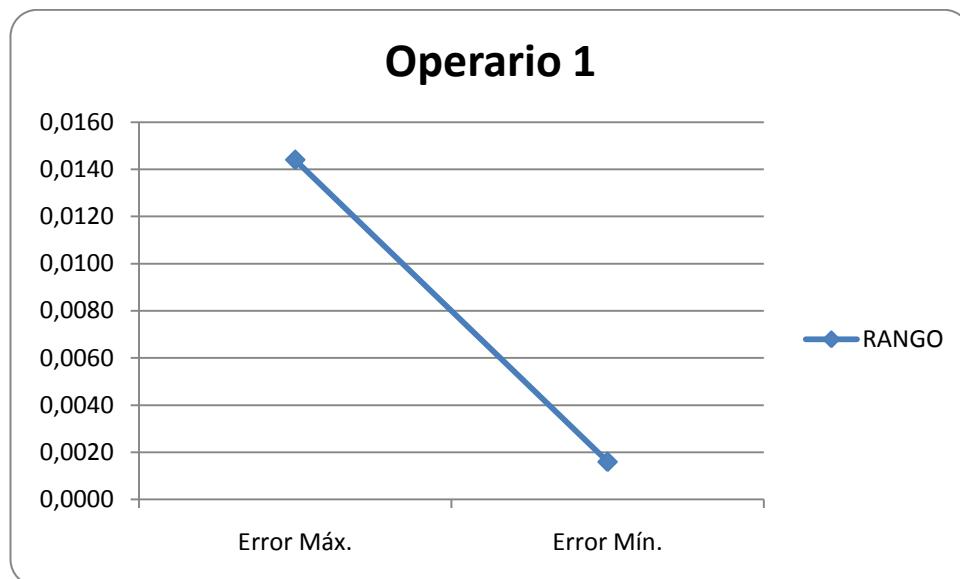
DIÁMETROS Y ERRORES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 1:

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D1)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D1-Dcal|
21,9995	21,9994	22,0010	0,0016

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D2)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D2-Dcal|
21,9983	21,9982	22,0010	0,0028

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D3)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D3-Dcal|
21,9867	21,9866	22,0010	0,0144

RANGO DE LOS ERRORES EN VALOR ABSOLUTO DEL OPERARIO 1:



Error Máx.	Error Mín.
0,0144	0,0016



b) OPERARIO 2:

MEDIDA 1			
Medidas	X	Y	Z
1	-33,4085	-108,5003	-570,7347
2	-13,7282	-110,4206	-561,596
3	-30,2194	-110,1694	-556,2081
4	-20,7657	-108,8852	-575,6721
5	-26,8807	-104,7354	-574,1477
6	-31,6741	-104,0997	-560,8633
7	-21,2074	-106,7089	-555,4715
8	-16,7334	-102,9453	-568,0212
9	-23,5059	-99,7028	-565,8352
Promedio	-24,2359	-106,2408	-565,3944

MEDIDA 2			
Medidas	X	Y	Z
1	-33,702	-110,1244	-570,6329
2	-13,6828	-109,925	-561,8801
3	-29,5981	-110,6146	-555,811
4	-19,4027	-110,2303	-575,2799
5	-27,1426	-105,2017	-574,3626
6	-31,7894	-103,1562	-563,0995
7	-21,0306	-103,1844	-557,8947
8	-17,5449	-103,4712	-570,4517
9	-24,3845	-99,7545	-566,4879
Promedio	-24,2531	-106,1847	-566,2111

MEDIDA 3			
Medidas	X	Y	Z
1	-33,7409	-109,4123	-570,4602
2	-19,8457	-111,4745	-575,4477
3	-29,6833	-110,7117	-555,8412
4	-13,5575	-110,6454	-562,1435
5	-17,1832	-103,321	-569,7169
6	-28,7309	-104,1722	-572,8889
7	-32,5461	-104,3067	-562,4017
8	-21,4197	-103,2035	-557,7299
9	-24,8784	-99,7463	-566,1857
Promedio	-24,6206	-106,3326	-565,8684



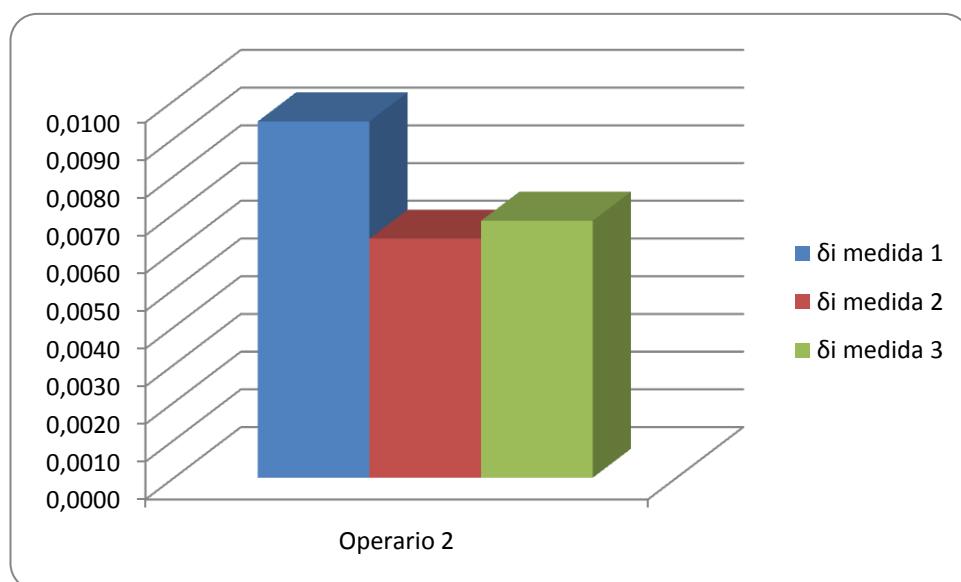
CENTROS DE ESFERA PARA LAS TRES MEDIDAS REALIZADAS POR EL
OPERARIO 2:

centro esfera MEDIDA 1		
X	Y	Z
-24,0755	-110,6859	-565,3273

centro esfera MEDIDA 2		
X	Y	Z
-24,0882	-110,6844	-565,3343

centro esfera MEDIDA 3		
X	Y	Z
-24,0890	-110,6924	-565,3299

DESVIACIONES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 2:



δ_i medida 1 0,0094 **δ_i medida 2** 0,0063 **δ_i medida 3** 0,0068



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



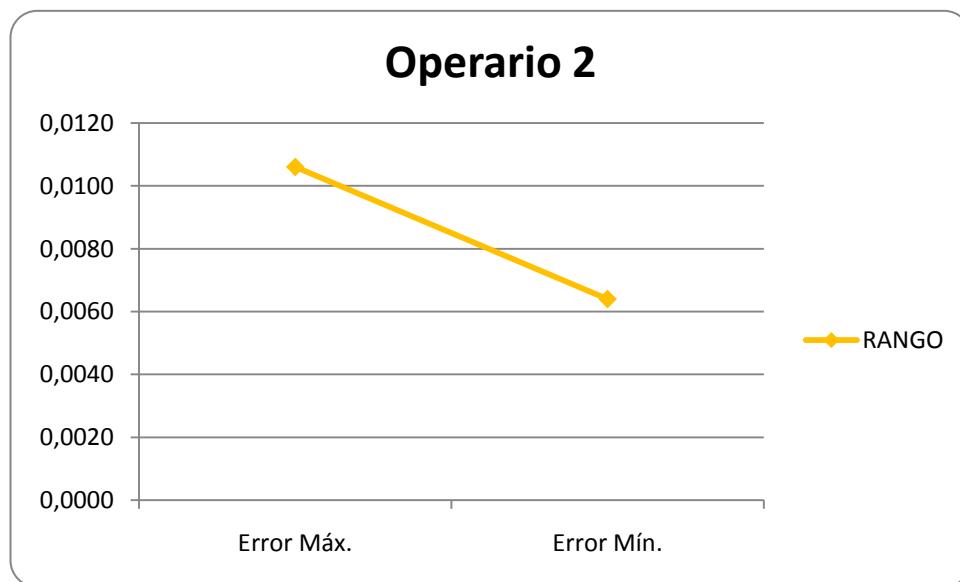
DIÁMETROS Y ERRORES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 2:

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D1)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D1-Dcal|
22,0117	22,0116	22,0010	0,0106

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D2)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D2-Dcal|
21,9945	21,9946	22,0010	0,0064

Diámetro Software	Diámetro Matlab (D3)	Diámetro Calibrado(Dcal)	|D3-Dcal|
22,0101	22,0100	22,0010	0,0090

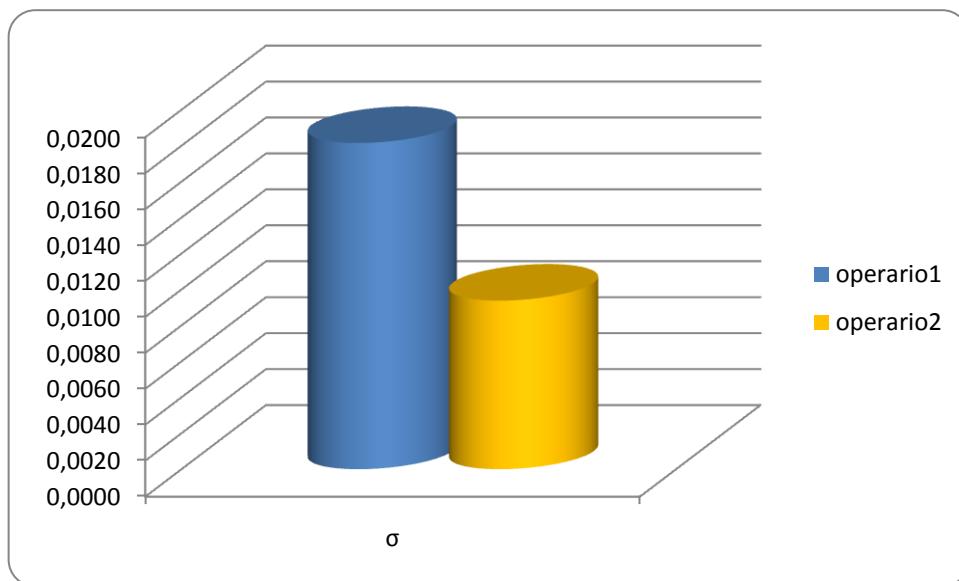
RANGO DE LOS ERRORES EN VALOR ABSOLUTO DEL OPERARIO 2:



Error Máx.	Error Mín.
0,0106	0,0064



COMPARATIVA ENTRE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LOS DOS OPERARIOS:



desviación estándar	
σ operario 1	0,0182

desviación estándar	
σ operario 2	0,0094

RESULTADO FINAL DE LA PRUEBA PARA EL OPERARIO 1:

ERROR MÁXIMO	Max. Deviation	0,0144
--------------	----------------	--------

RESULTADO FINAL DE LA PRUEBA PARA EL OPERARIO 2:

ERROR MÁXIMO	Max. Deviation	0,0106
--------------	----------------	--------

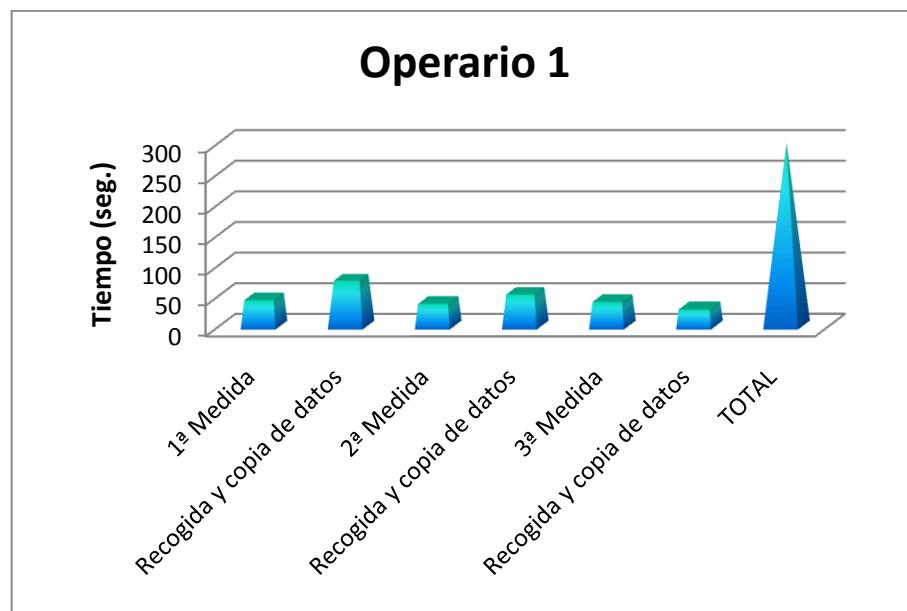


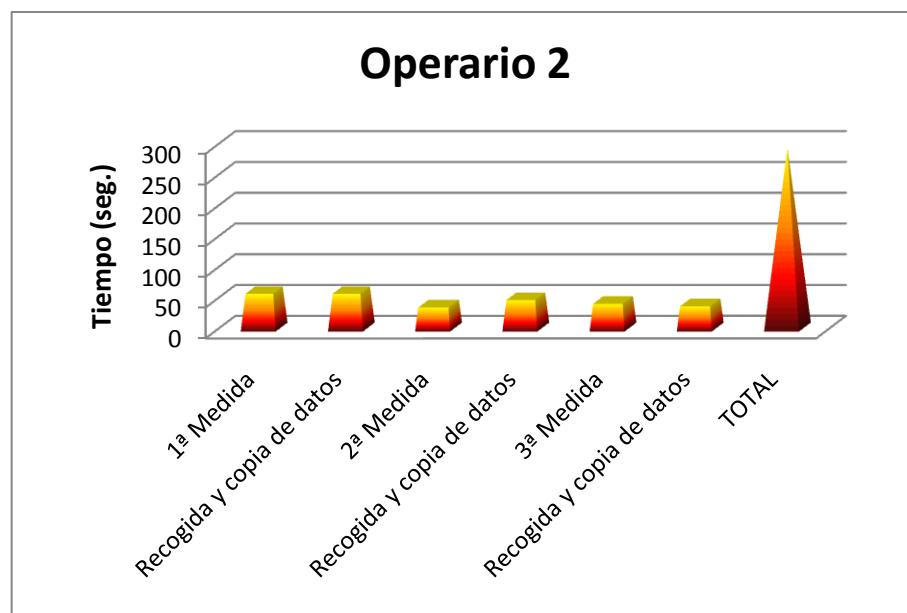
c) TIEMPOS:

Operario 1	Tiempo (seg.)
1^a Medida	47
Recogida y copia de datos	78
2^a Medida	41
Recogida y copia de datos	56
3^a Medida	44
Recogida y copia de datos	32
TOTAL	298

Operario 2	Tiempo (seg.)
1^a Medida	60
Recogida y copia de datos	60
2^a Medida	38
Recogida y copia de datos	50
3^a Medida	44
Recogida y copia de datos	40
TOTAL	292

Estos tiempos corresponden exclusivamente a las medidas y la recogida y copia de datos.





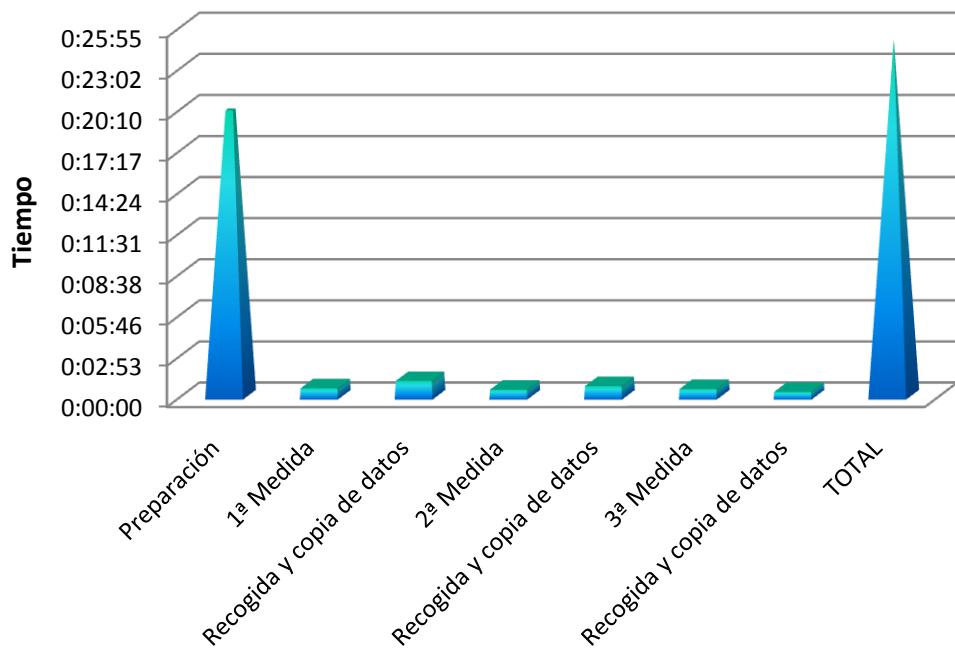
Los siguientes tiempos incluyen el periodo de preparación de la prueba:

Operario 1	Tiempo
Preparación	0:20:00
1ª Medida	0:00:47
Recogida y copia de datos	0:01:18
2ª Medida	0:00:41
Recogida y copia de datos	0:00:56
3ª Medida	0:00:44
Recogida y copia de datos	0:00:32
TOTAL	0:24:58

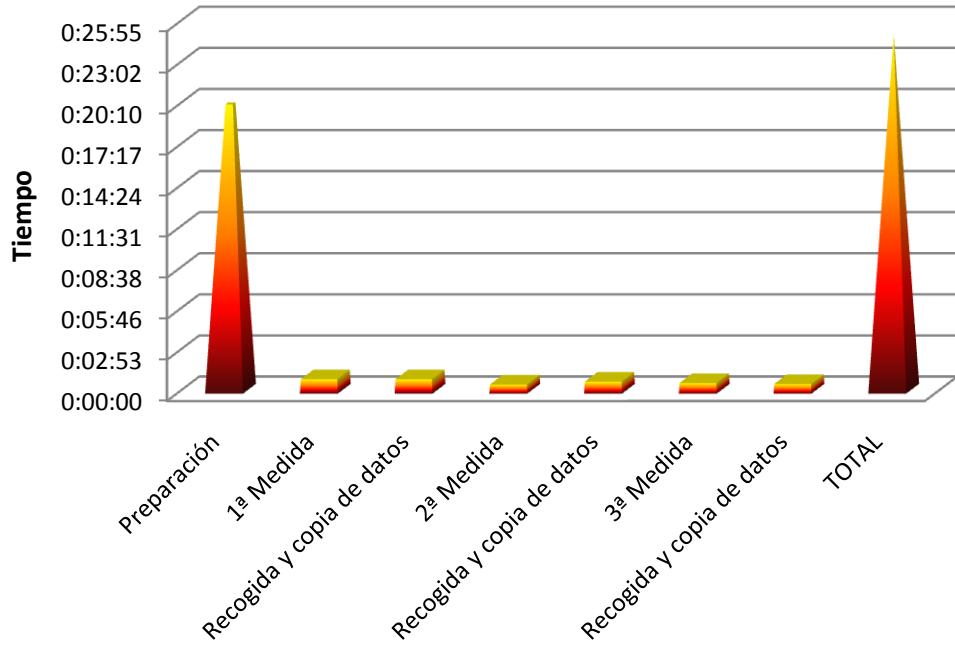
Operario 2	Tiempo
Preparación	0:20:00
1ª Medida	0:01:00
Recogida y copia de datos	0:01:00
2ª Medida	0:00:38
Recogida y copia de datos	0:00:50
3ª Medida	0:00:44
Recogida y copia de datos	0:00:40
TOTAL	0:24:52



Operario 1



Operario 2





Conclusiones:

Después de estudiar con detenimiento los resultados obtenidos en la prueba anterior se puede afirmar que, en cuanto a la comparación entre operarios, el operario 1 tiene un error máximo mayor que el operario 2, pero tiene un error mínimo menor, con lo cual posee un rango de errores mayor. Dicha diferencia de errores puede considerarse como la propia influencia del operario, ya que para unas mismas mediciones una persona las realiza de una manera distinta a como lo haría otra en esa misma situación, digamos que es un error que se añade al del propio brazo en cuestión.

También se aprecia una desviación estándar más elevada que el segundo. Esto puede significar que los puntos medidos por el primer operario formarían una esfera imaginaria que difiere de la esfera real más de los que formarían la esfera imaginaria del segundo operario.

En cuanto a las desviaciones en las tres medidas, en ambos casos son mucho mayores en la primera medida y parecidas en la segunda y tercera.

En lo que se refiere a los tiempos, se vislumbra una gran homogeneidad en ambos operarios y se podría afirmar que la primera posición es la más costosa debido a que se toma con menos experiencia que las siguientes, y esto hace que se creen unas pautas que reducen dicho tiempo.

Además, podemos observar que si se incluyen los tiempos debidos a la preparación, el tiempo aumenta de manera ostensible, ya que, el mayor tiempo es el correspondiente a la preparación.

La conclusión final nos lleva a que a mayores errores o desviaciones, menor repetibilidad posee ese aparato, con lo cual existe una repetibilidad media. Y, también a que la reproducibilidad, con respecto a este ensayo, puede ser aceptable.

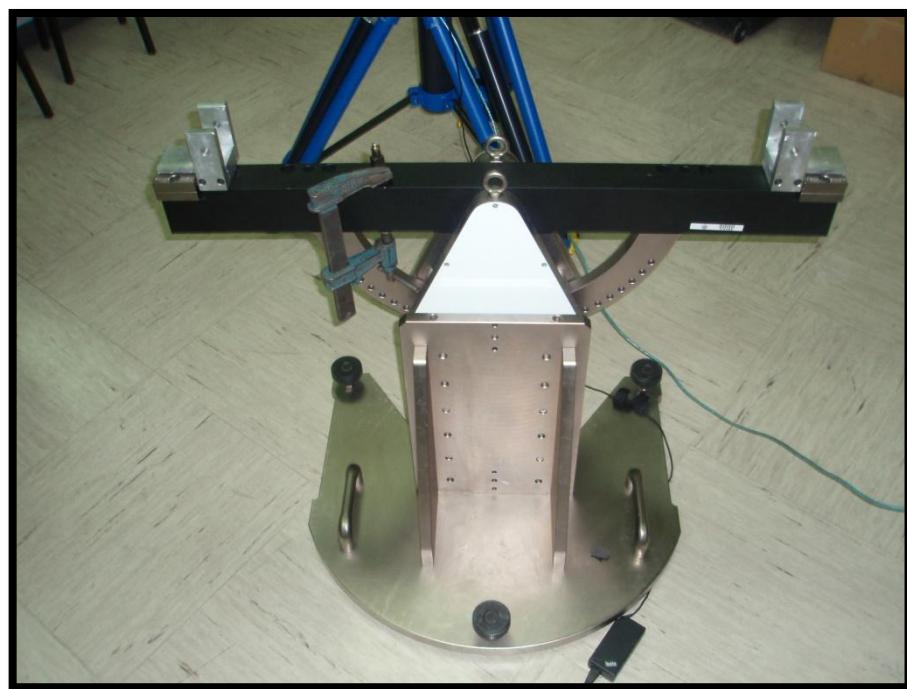


ANEXO B. SINGLE-POINT ARTICULATION PERFORMANCE TEST

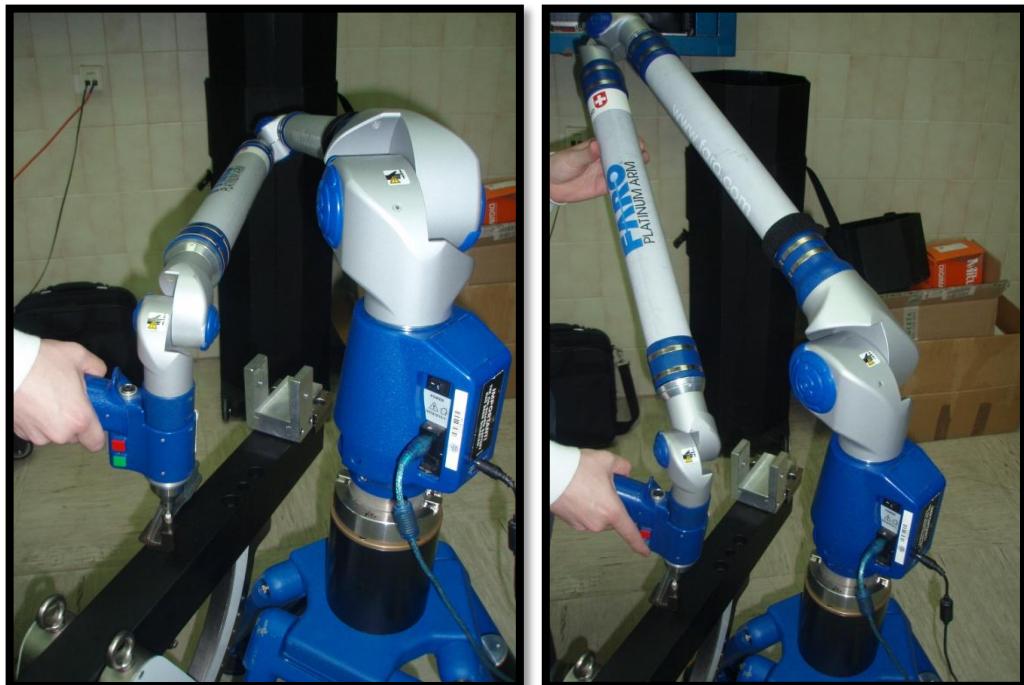
Introducción:

El objetivo de este test es determinar la capacidad del brazo de repetir la medida de un mismo punto desde orientaciones diferentes mediante la medición de un asiento cinemático, que se muestra en primer plano en la siguiente imagen fijado al soporte y acompañado del palpador del brazo.





Esto se realiza en tres situaciones dentro del volumen de medida: 20% de su longitud (tomado a 20 mm), entre el 20 y el 80% (tomado a 65 mm) y entre el 80% y el 100% (tomado a 108 mm); en diez posiciones del brazo en cada uno de los tres puntos.





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





Más tarde, debe calcularse la desviación de los puntos medidos con respecto a la media de cada uno de los diez puntos capturados para cada posición del asiento. Esta desviación se obtendrá calculando la distancia euclídea de cada punto a la media en la posición correspondiente.

Además, se obtendrá la desviación estándar de la distribución de distancias para cada uno de los tres puntos considerados.

Con esto, el ensayo concluirá con la obtención del valor máximo de distancia ($\delta_{\text{máx.}}$) y de desviación (σ).

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2}$$

Como resultado final de la prueba es habitual considerar el valor de distancia máximo y el valor 2σ de la distribución de distancias correspondiente a la posición del asiento que ha producido ese valor de distancia.

$$2\sigma_{\text{SPAT}} = 2\sqrt{(\sum \delta_i^2 / (n-1))}$$



Resultados:

a) OPERARIO 1:

TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 1 (0 - 20 %):

SPAT 0-20 %	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
Medidas					
1	145,2867	-182,6572	172,1712	0,0184	0,0003
2	145,2635	-182,6324	172,1728	0,0165	0,0003
3	145,2794	-182,6299	172,1670	0,0126	0,0002
4	145,2720	-182,6432	172,1585	0,0123	0,0002
5	145,2494	-182,6812	172,1644	0,0481	0,0023
6	145,2742	-182,6216	172,1716	0,0205	0,0004
7	145,3186	-182,6374	172,1503	0,0465	0,0022
8	145,2488	-182,6561	172,1960	0,0408	0,0017
9	145,3122	-182,6071	172,1643	0,0501	0,0025
10	145,2615	-182,6528	172,1820	0,0223	0,0005
Promedio	145,2766	-182,6419	172,1698	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0501	...
2σ _{SPAT}	...	...	...	0,0683	...

ERRORES DEL OPERARIO 1 ENTRE EL 0 Y 20 % DEL VOLUMEN TOTAL:

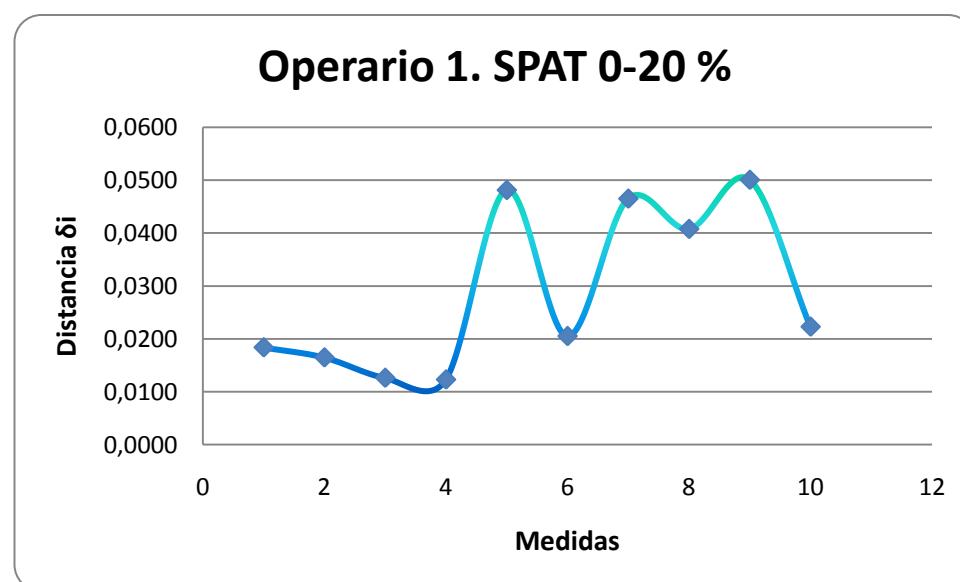




TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 1 (20 - 80 %):

SPAT 20-80 %	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
Medidas	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
1	-608,1265	-182,3187	202,0441	0,0166	0,0003
2	-608,1239	-182,3231	202,0397	0,0143	0,0002
3	-608,1396	-182,3261	202,0330	0,0112	0,0001
4	-608,1413	-182,3293	202,0131	0,0205	0,0004
5	-608,1391	-182,3289	202,0178	0,0159	0,0003
6	-608,1243	-182,3047	202,0415	0,0212	0,0004
7	-608,1510	-182,3046	202,0390	0,0265	0,0007
8	-608,1197	-182,2980	202,0402	0,0274	0,0007
9	-608,1308	-182,3421	201,9979	0,0380	0,0014
10	-608,1226	-182,3194	202,0176	0,0142	0,0002
Promedio	-608,1319	-182,3195	202,0284	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0380	...
2σ _{SPAT}	...	...	...	0,0463	...

ERRORES DEL OPERARIO 1 ENTRE EL 20 Y 80 % DEL VOLUMEN TOTAL:

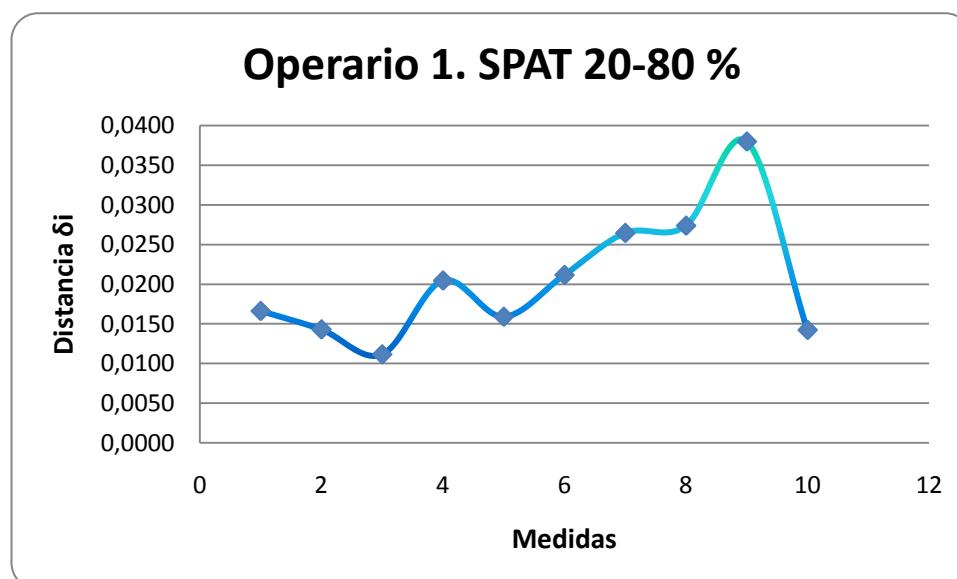
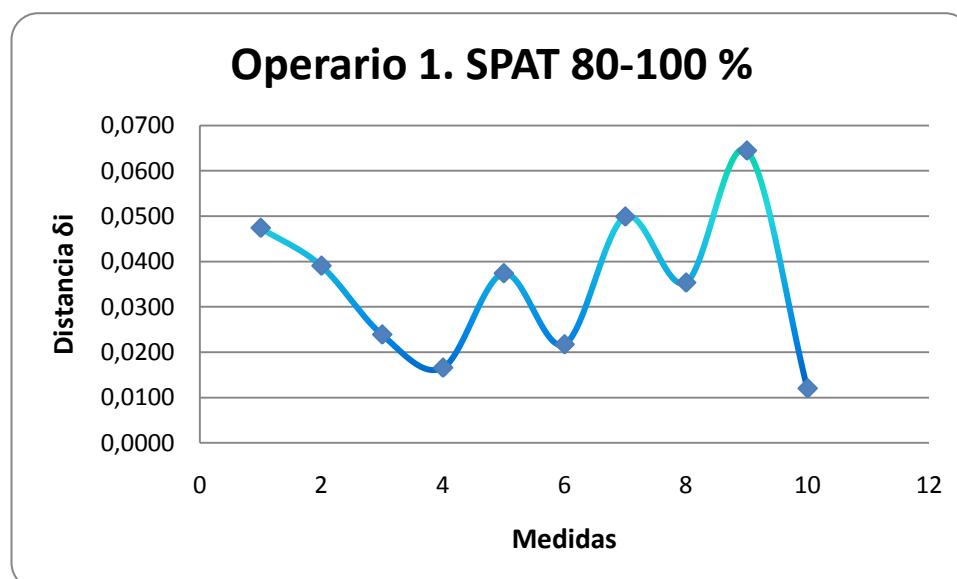




TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 1 (80 - 100 %):

SPAT 80-100 %					
Medidas	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
1	-122,2312	-184,3401	-1073,4275	0,0474	0,0022
2	-122,2187	-184,3418	-1073,4271	0,0390	0,0015
3	-122,1876	-184,3368	-1073,4329	0,0239	0,0006
4	-122,1843	-184,3015	-1073,4397	0,0166	0,0003
5	-122,1877	-184,2795	-1073,4464	0,0374	0,0014
6	-122,1952	-184,3346	-1073,4276	0,0217	0,0005
7	-122,1986	-184,3487	-1073,3967	0,0499	0,0025
8	-122,1797	-184,2806	-1073,4350	0,0353	0,0012
9	-122,1577	-184,2609	-1073,4455	0,0644	0,0042
10	-122,1815	-184,3098	-1073,4354	0,0120	0,0001
Promedio	-122,1922	-184,3134	-1073,4314	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0644	...
2σ _{SPAT}	...	...	...	0,0803	...

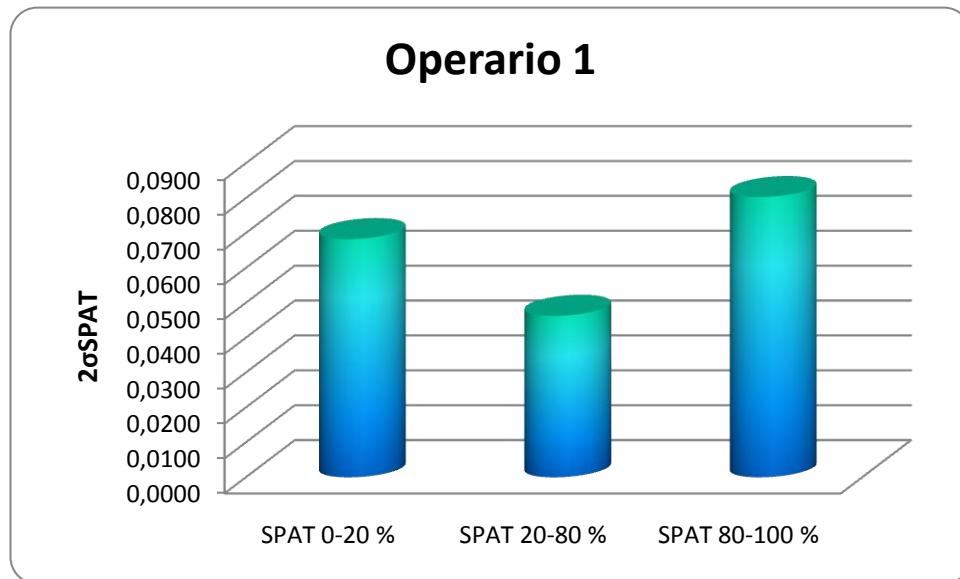
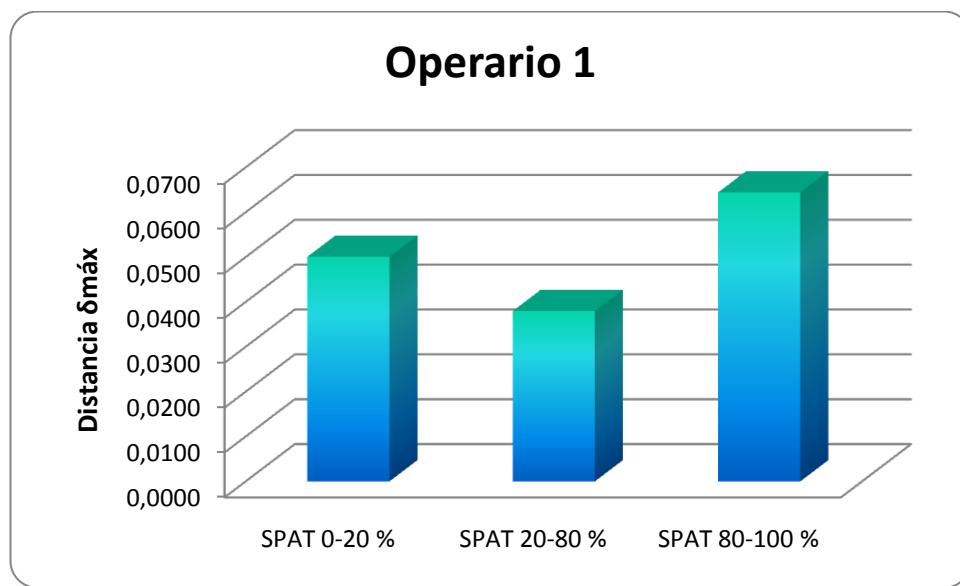
ERRORES DEL OPERARIO 1 ENTRE EL 80 Y 100 % DEL VOLUMEN TOTAL:





ERRORES Y DESVIACIONES DEL OPERARIO 1 EN TODAS LAS POSICIONES:

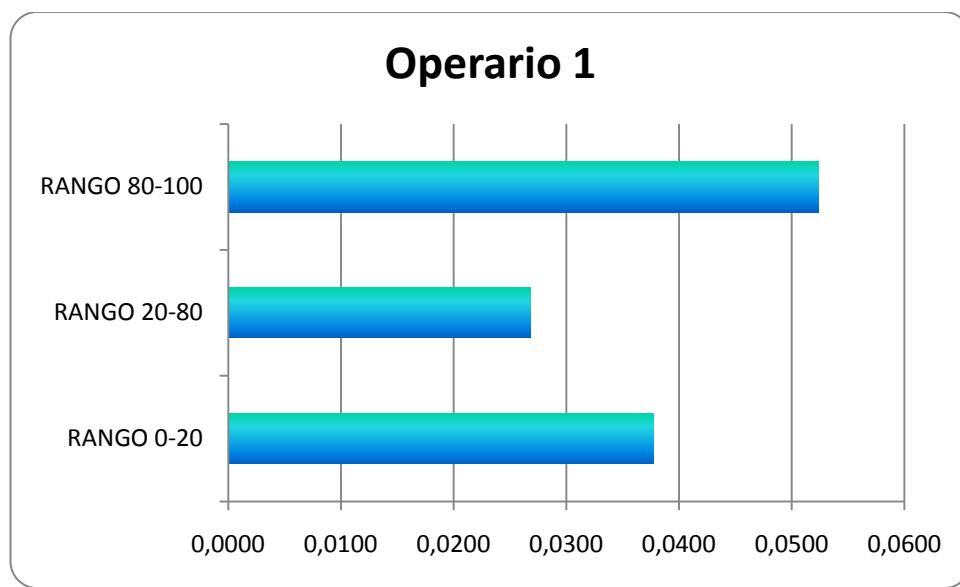
	SPAT 0-20 %	SPAT 20-80 %	SPAT 80-100 %
δ_{\max}	0,0501	0,0380	0,0644
$2\sigma_{\text{SPAT}}$	0,0683	0,0463	0,0803





RANGO DE ERRORES PARA EL OPERARIO 1:

RANGO 0-20	0,0378
RANGO 20-80	0,0268
RANGO 80-100	0,0524



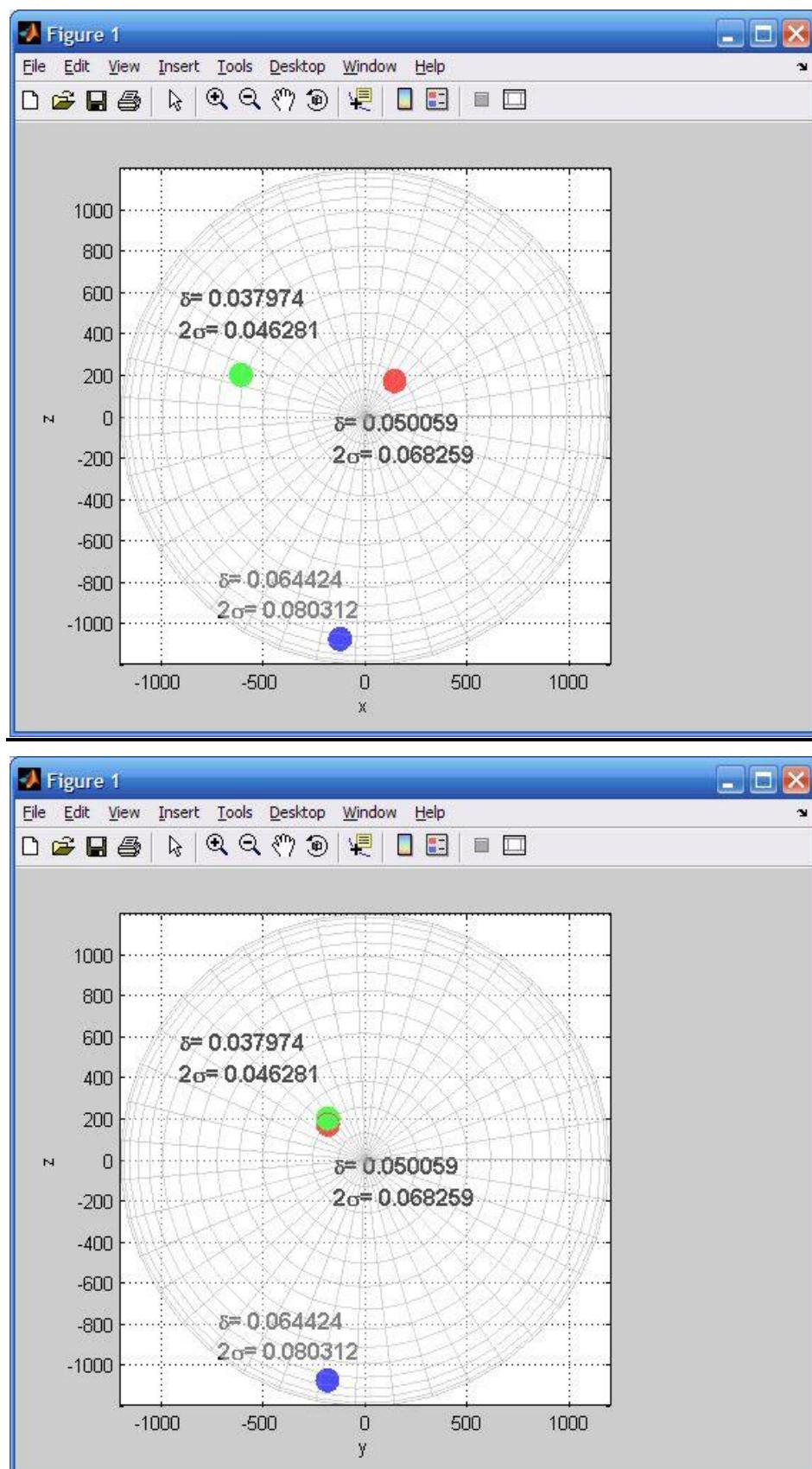
RESULTADO FINAL DE LA PRUEBA PARA EL OPERARIO 1:

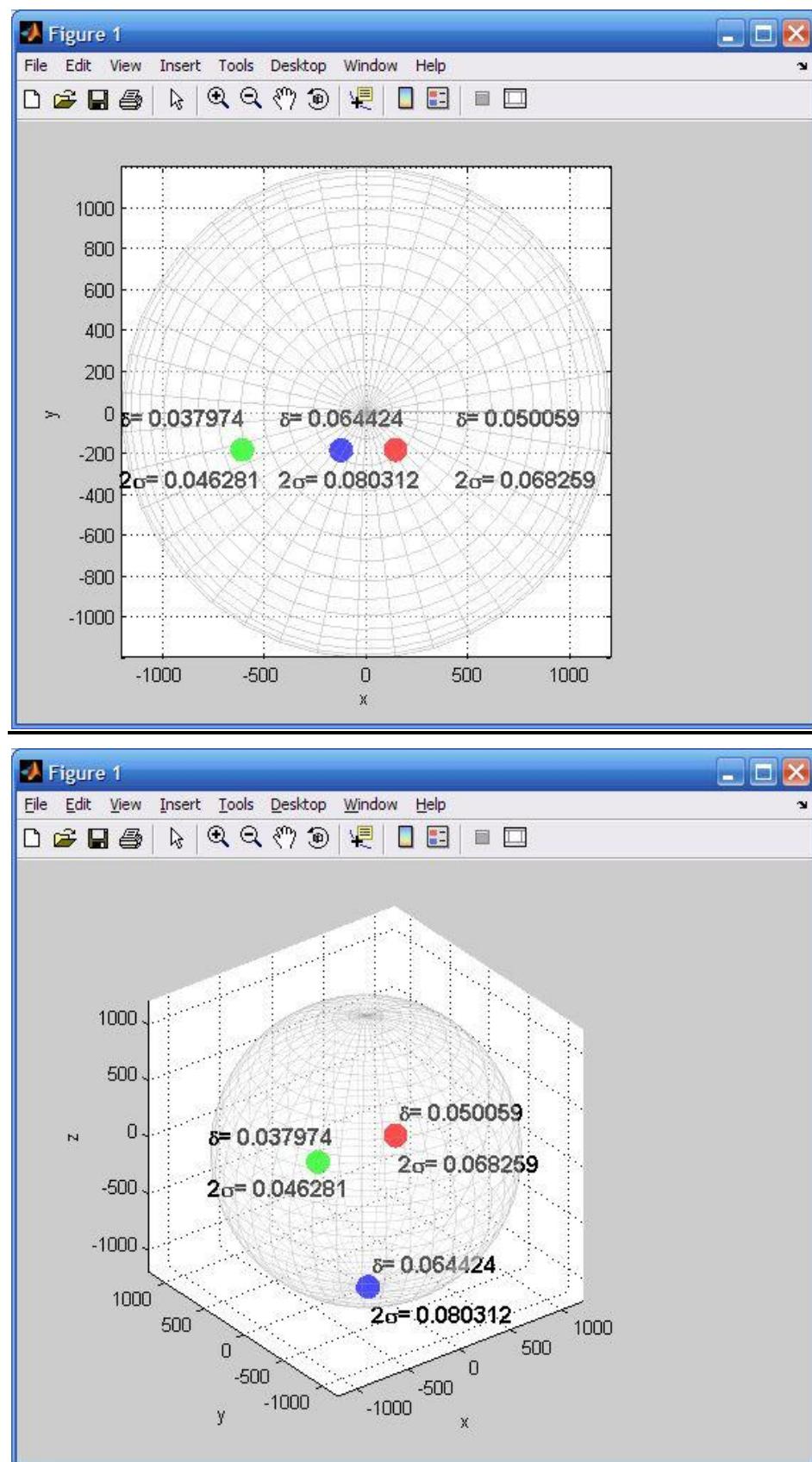
SPAT 80-100 %	
δ_{\max}	0,0644
$2\sigma_{\text{SPAT}}$	0,0803

A continuación se muestran las imágenes que representan las 3 posiciones de la esfera medida en el volumen de trabajo con sus respectivos resultados de error y desviación para el operario 1, mediante las vistas en 3 dimensiones y en 2D en los ejes XY, XZ, YZ.



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004







b) OPERARIO 2:

TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 2 (0 - 20 %):

SPAT 0-20 %	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
1	144,5620	-182,6511	172,3914	0,0266	0,0007
2	144,5448	-182,6279	172,4170	0,0152	0,0002
3	144,5648	-182,6122	172,4140	0,0237	0,0006
4	144,5585	-182,6363	172,3856	0,0263	0,0007
5	144,5409	-182,6628	172,3978	0,0356	0,0013
6	144,5613	-182,6299	172,3972	0,0158	0,0003
7	144,5875	-182,5983	172,3915	0,0513	0,0026
8	144,5529	-182,6382	172,4338	0,0227	0,0005
9	144,5599	-182,6502	172,4464	0,0380	0,0014
10	144,5416	-182,6390	172,4434	0,0356	0,0013
Promedio	144,5574	-182,6346	172,4118	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0513	...
2σ _{SPAT}	...	...	...	0,0652	...

ERRORES DEL OPERARIO 2 ENTRE EL 0 Y 20 % DEL VOLUMEN TOTAL:

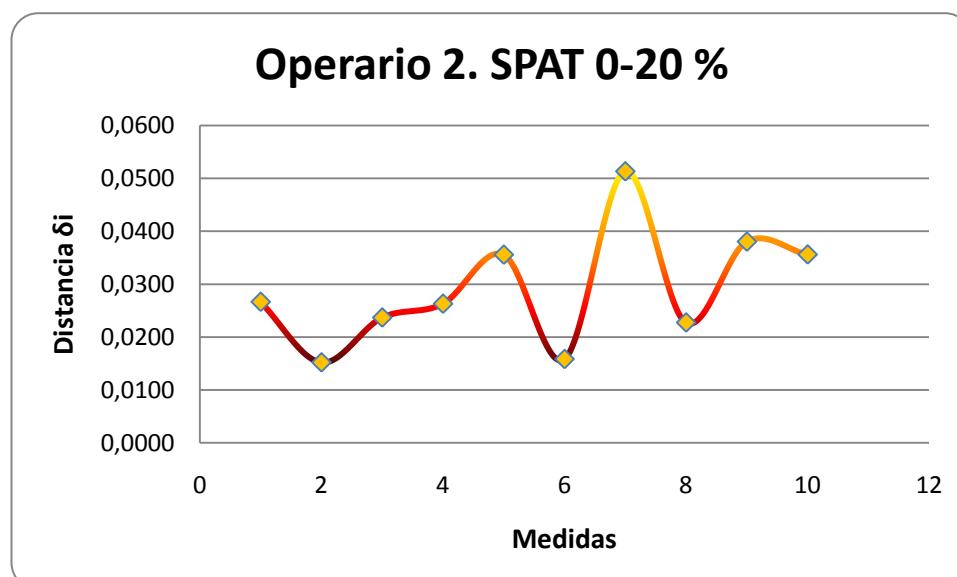




TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 2 (20 - 80 %):

SPAT 20-80 %					
Medidas	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
1	-608,1287	-182,3128	202,0421	0,0258	0,0007
2	-608,1220	-182,3289	202,0301	0,0234	0,0005
3	-608,1407	-182,3274	202,0187	0,0072	0,0001
4	-608,1438	-182,3306	202,0114	0,0144	0,0002
5	-608,1447	-182,3231	202,0165	0,0070	0,0000
6	-608,1330	-182,3231	202,0318	0,0135	0,0002
7	-608,1453	-182,2991	202,0522	0,0373	0,0014
8	-608,1478	-182,3370	202,0171	0,0162	0,0003
9	-608,1564	-182,3122	202,0088	0,0221	0,0005
10	-608,1723	-182,3324	202,0049	0,0356	0,0013
Promedio	-608,1435	-182,3227	202,0234	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0373	...
2σ _{SPAT}	...	...	...	0,0477	...

ERRORES DEL OPERARIO 2 ENTRE EL 20 Y 80 % DEL VOLUMEN TOTAL:

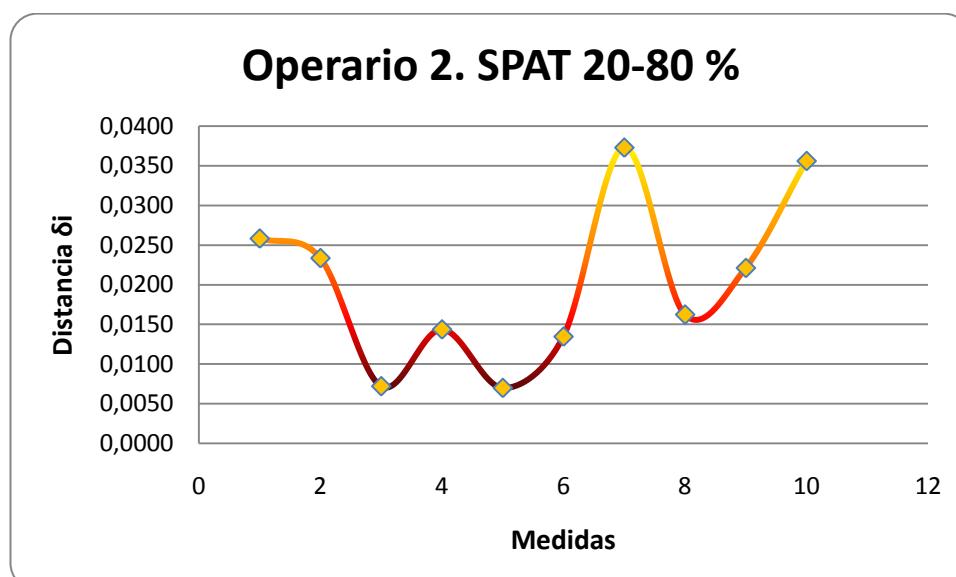
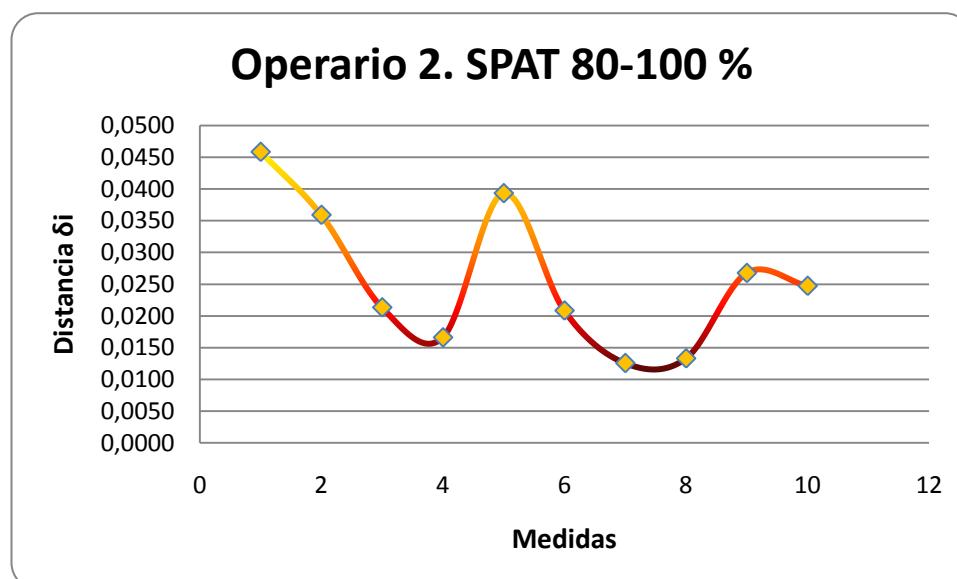




TABLA DE ERRORES Y DESVIACIONES PARA EL OPERARIO 2 (80 - 100 %):

SPAT 80-100 %					
Medidas	X _i	Y _i	Z _i	δ _i	δ _i ²
1	-122,2190	-184,3287	-1073,3954	0,0458	0,0021
2	-122,2066	-184,3278	-1073,3966	0,0359	0,0013
3	-122,1863	-184,3248	-1073,4033	0,0213	0,0005
4	-122,1697	-184,2970	-1073,4125	0,0166	0,0003
5	-122,1668	-184,2707	-1073,4140	0,0393	0,0015
6	-122,1904	-184,3176	-1073,4297	0,0208	0,0004
7	-122,1832	-184,3037	-1073,4259	0,0126	0,0002
8	-122,1735	-184,3152	-1073,4149	0,0133	0,0002
9	-122,1717	-184,2898	-1073,4311	0,0268	0,0007
10	-122,1664	-184,2884	-1073,4129	0,0247	0,0006
Promedio	-122,1834	-184,3064	-1073,4136	...	...
δ _{max}	...	...	...	0,0458	...
2σ SPAT	...	...	...	0,0587	...

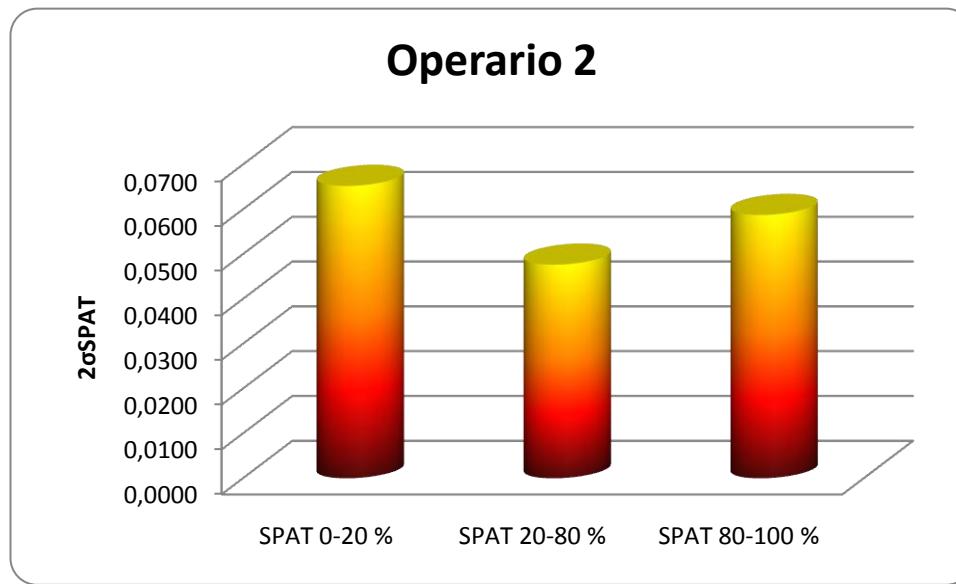
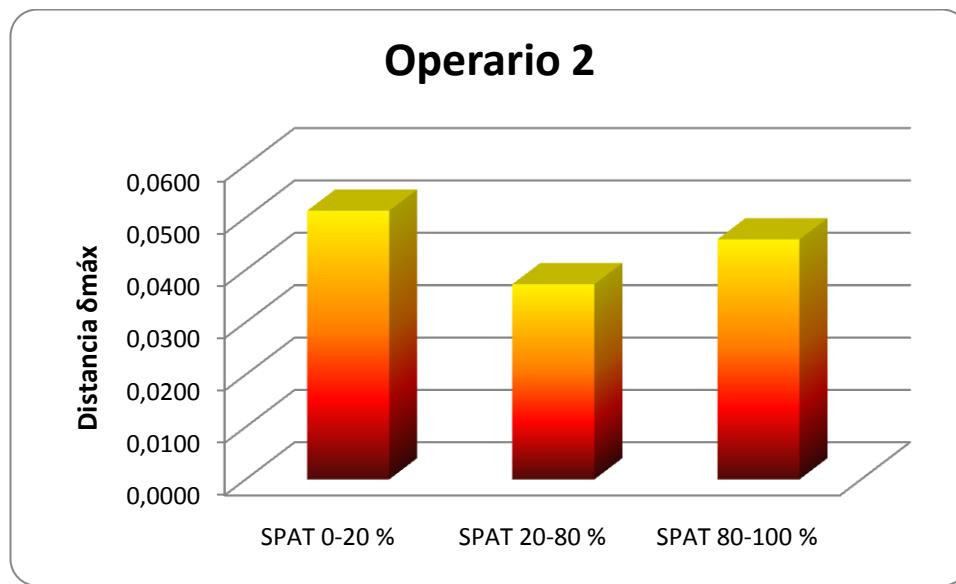
ERRORES DEL OPERARIO 2 ENTRE EL 80 Y 100 % DEL VOLUMEN TOTAL:





ERRORES Y DESVIACIONES DEL OPERARIO 2 EN TODAS LAS POSICIONES:

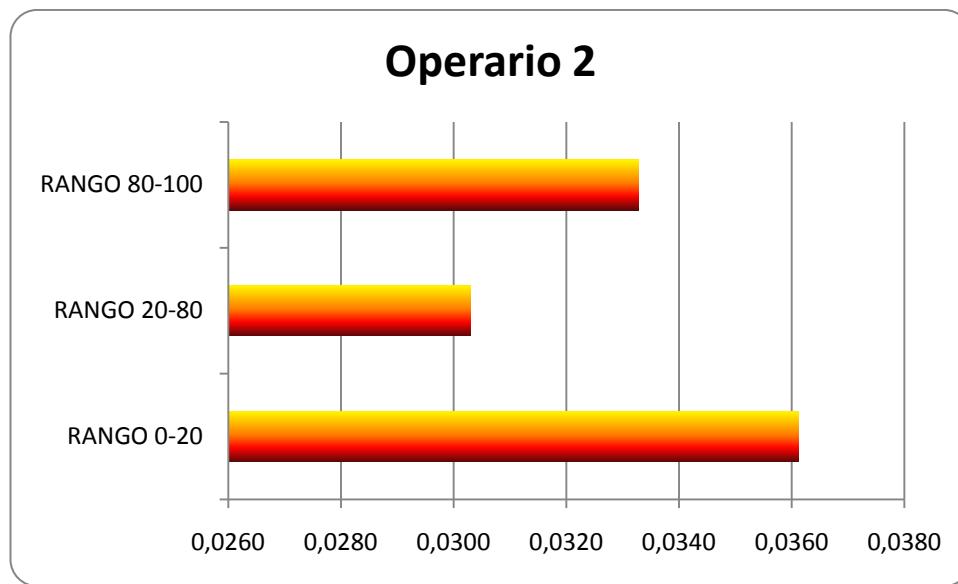
	SPAT 0-20 %	SPAT 20-80 %	SPAT 80-100 %
δ_{\max}	0,0513	0,0373	0,0458
$2\sigma_{\text{SPAT}}$	0,0652	0,0477	0,0587





RANGO DE ERRORES PARA EL OPERARIO 2:

RANGO 0-20	0,0361
RANGO 20-80	0,0303
RANGO 80-100	0,0333



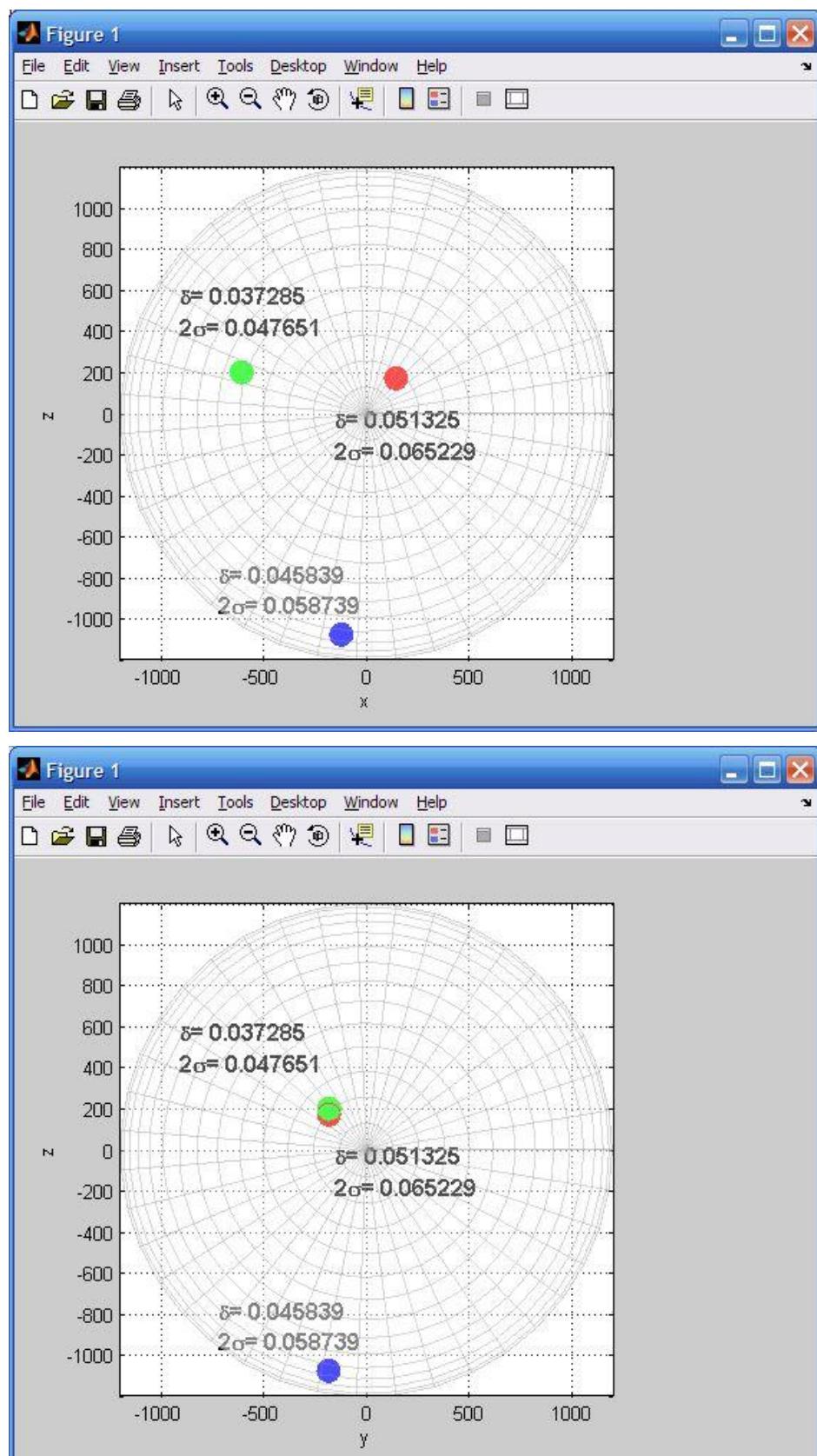
RESULTADO FINAL DE LA PRUEBA PARA EL OPERARIO 2:

SPAT 0-20 %	
δ_{\max}	0,0513
$2\sigma_{\text{SPAT}}$	0,0652

A continuación se muestran las imágenes que representan las 3 posiciones de la esfera medida en el volumen de trabajo con sus respectivos resultados de error y desviación para el operario 2, mediante las vistas en 3 dimensiones y en 2D en los ejes XY, XZ, YZ.

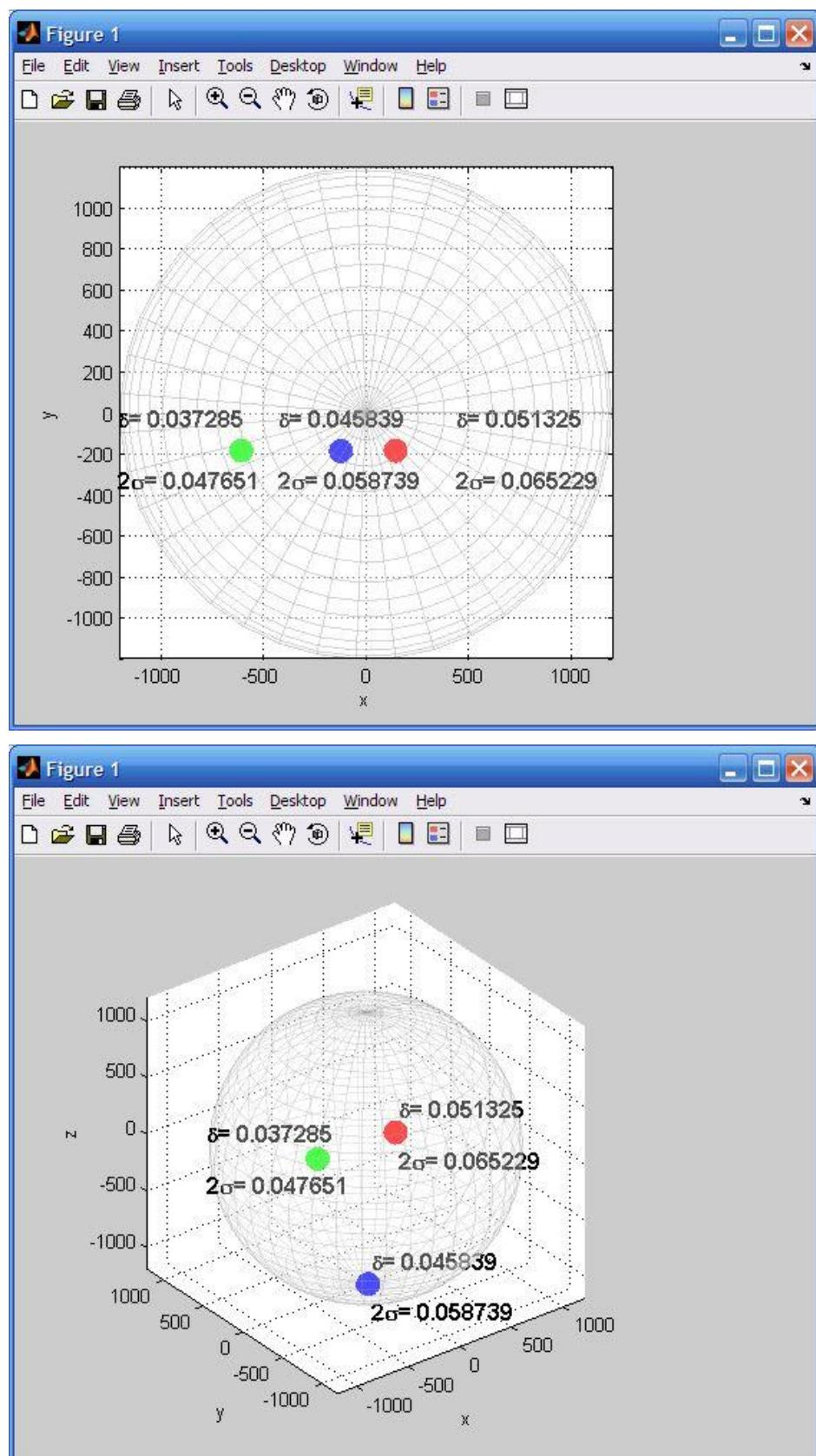


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004

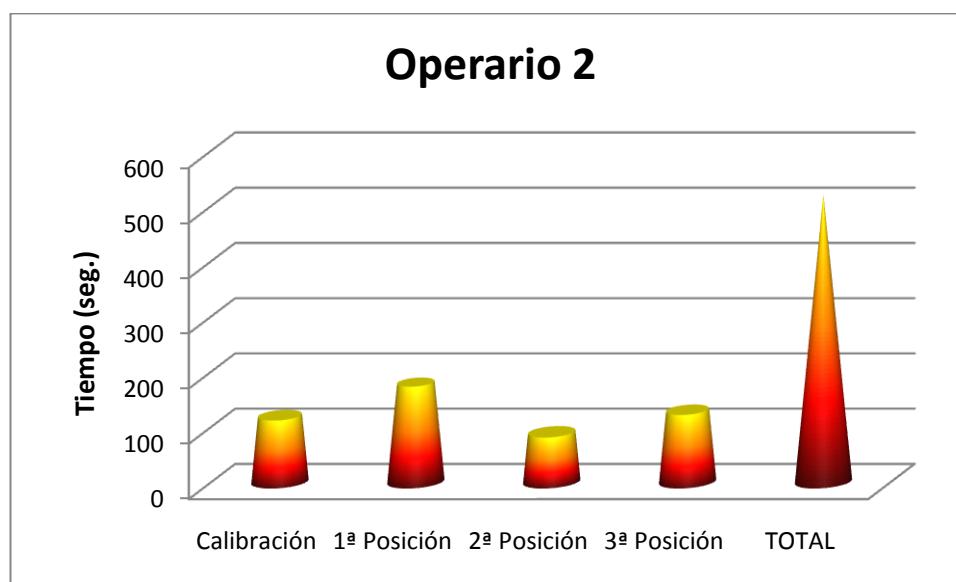




c) TIEMPOS:

Operario 1	Tiempo (seg.)
Calibración	120
1 ^a Posición	180
2 ^a Posición	100
3 ^a Posición	130
TOTAL	530

Operario 2	Tiempo (seg.)
Calibración	120
1 ^a Posición	180
2 ^a Posición	90
3 ^a Posición	130
TOTAL	520

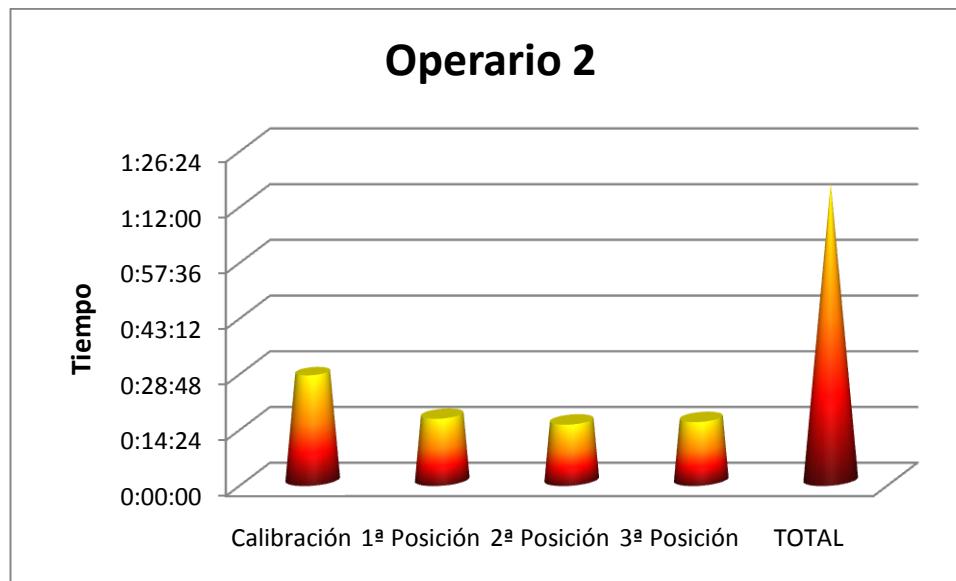
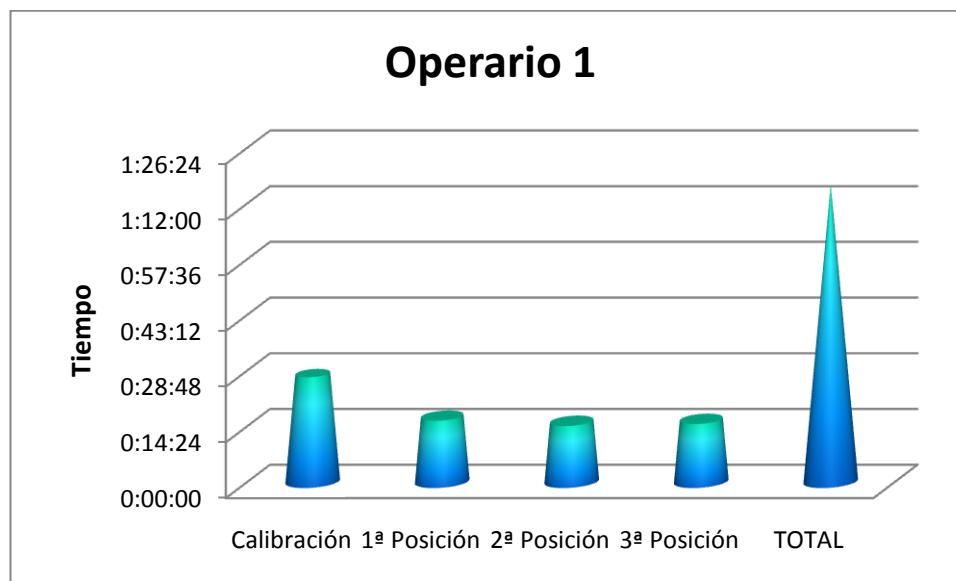


Estos tiempos corresponden exclusivamente a las medidas y la calibración.



Los siguientes tiempos incluyen el periodo de preparación de la prueba, añadiendo el tiempo correspondiente a cada una de sus fases:

Operario 1	Tiempo	Operario 2	Tiempo
Calibración	0:28:00	Calibración	0:28:00
1 ^a Posición	0:17:00	1 ^a Posición	0:17:00
2 ^a Posición	0:15:40	2 ^a Posición	0:15:30
3 ^a Posición	0:16:10	3 ^a Posición	0:16:10
TOTAL	1:16:50	TOTAL	1:16:40





Conclusiones:

Al finalizar el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo que precede estas líneas, se aprecia en la comparación de ambos operarios que para el operario 2 existen mayores errores y desviaciones en la posición 0-20 %, en cambio para el operario 1 se produce en la posición 80-100 %.

Se observa que para el posicionamiento que produce un error más elevado se produce la mayor de las desviaciones.

Es cierto que para ambos se producen los errores mayores en las posiciones extremas (0-20 y 80-100), con lo cual para el posicionamiento central (20-80) se dan las menores desviaciones.

En cuanto a resultados finales, los correspondientes al primer operario son más elevados (error máximo, desviación y rango de errores) que los del segundo.

Los rangos del operario 2 son mucho más homogéneos, lo que lo hace más repetible.

Por último, y refiriéndonos a los tiempos, existe una gran similitud, tanto en los totales como en los parciales, para ambos operarios, de hecho son prácticamente iguales.

En cuanto a los tiempos en cada posición, la primera es la de mayor duración ya que se toman los datos por primera vez y, además, los puntos están más cercanos al brazo y al trípode con lo que el brazo se debe colocar de manera más dificultosa para la toma de medidas por parte del operario.

En cambio, si tenemos en cuenta el periodo de preparación de la calibración y de todas las posiciones, se aprecia como los tiempos aumentan considerablemente, produciéndose un incremento mayor en el tiempo correspondiente a la calibración.

La conclusión final sería que la repetibilidad que posee este aparato no es la mejor, pero su reproducibilidad, con respecto a este ensayo, puede ser algo más buena.



ANEXO C. VOLUMETRIC PERFORMANCE TEST

Introducción:

El ensayo consiste en la medición de distancias materializadas por un artefacto patrón calibrado, dispuesto en distintas orientaciones del volumen de trabajo.



El objetivo de esta prueba es comprobar el funcionamiento del brazo en todo su volumen, por lo que se divide el espacio de trabajo del brazo, que será una esfera de diámetro dos veces la longitud del brazo a partir del eje de su primera articulación, en dos hemisferios separados por el plano medio a la altura de la base del brazo.



Cada uno de estos hemisferios se divide en cuatro cuadrantes (ver imagen a continuación), de modo que el espacio total de trabajo del brazo queda dividido en ocho octantes. Según la referencia indicada por el fabricante para establecer la parte frontal del brazo, se establece la numeración de estos octantes.



Las barras de bolas deben ser posicionadas en horizontal, vertical y a 45° con respecto al brazo. La forma de determinar una posición para el ensayo vendrá dada por la especificación del tipo de patrón, largo o corto, los octantes a los que afecta, la inclinación, la distancia a la base del brazo y la dirección. La distancia a la base del brazo se especifica como cerca o lejos, entendiendo por cerca, las posiciones en las que la barra se encuentra a una distancia de la base menor que la mitad de la longitud total del brazo, y lejos, las posiciones más allá de la mitad de la longitud del brazo.

Con respecto a la dirección, las posiciones horizontales y a 45° quedarán completamente determinadas indicando si deben ser posicionadas radial o tangencialmente al brazo.



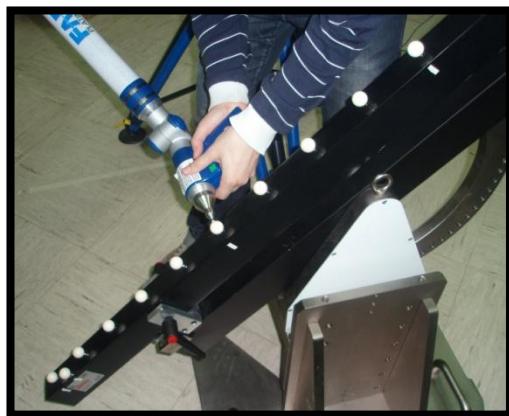
De esta forma, el procedimiento normalizado establece 20 posiciones de la barra en todo el volumen del brazo, dos en posición vertical, diez en horizontal y ocho a 45º. Como se muestra a continuación.

POSICIONES VERTICALES:





POSICIONES GIRADAS 45 GRADOS:



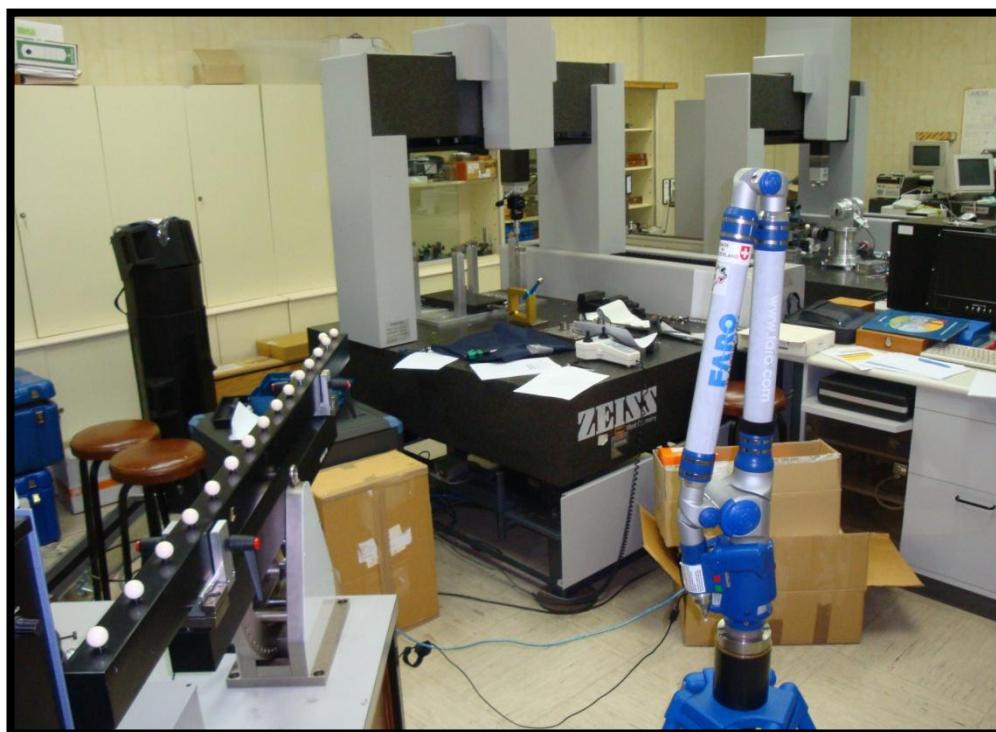


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



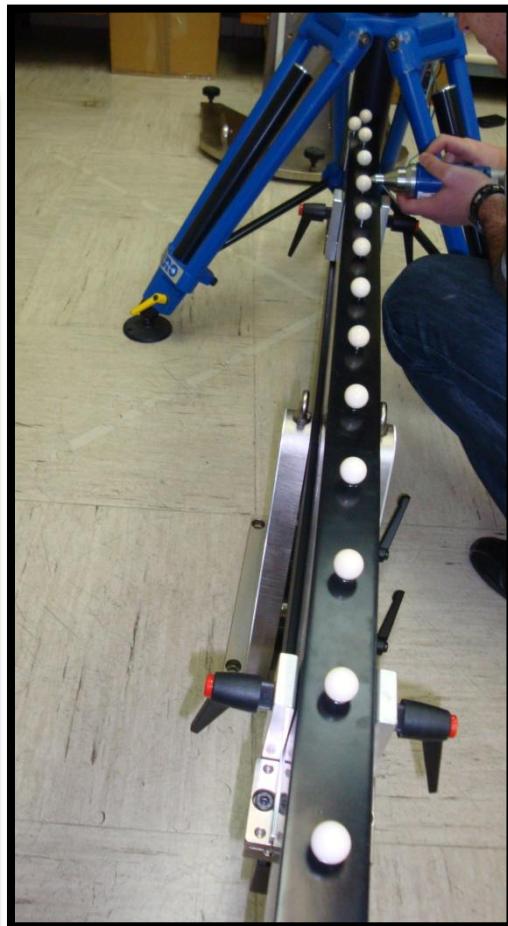


POSICIONES HORIZONTALES:



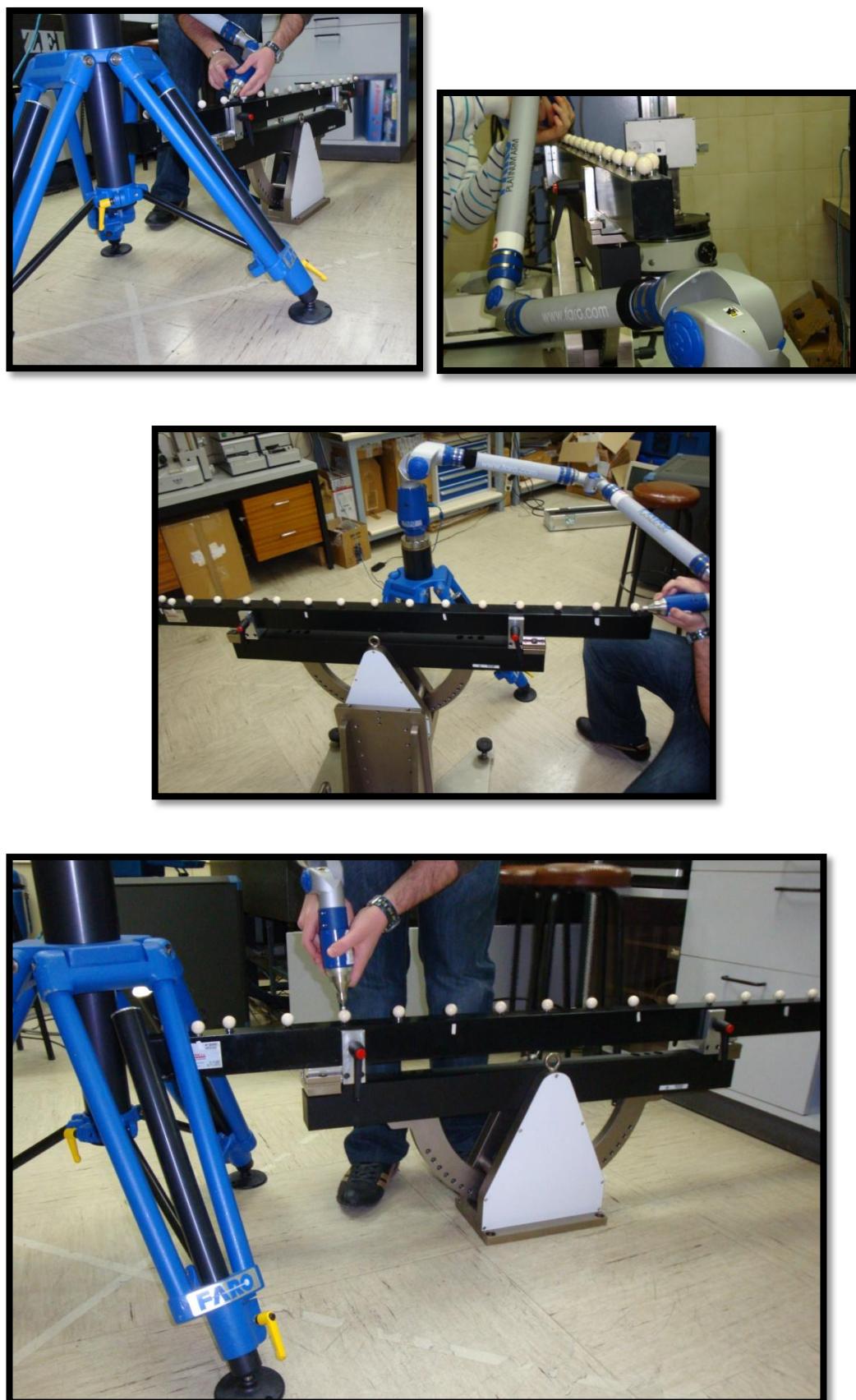


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



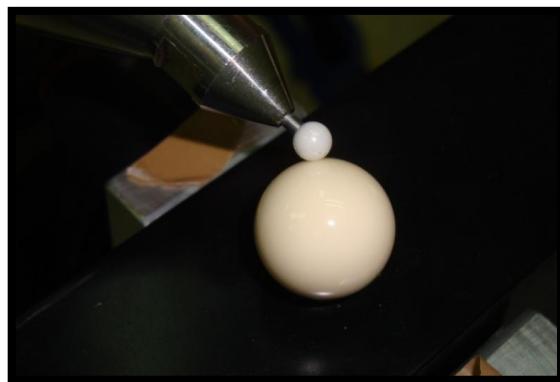


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





Para cada una de estas posiciones será necesario medir la distancia materializada por el patrón, de forma que se capten cinco puntos por esfera y se evalúe la distancia entre ellas.



Para el cálculo de distancia (longitudes) entre dos puntos (esferas) se emplea la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2}$$

Para cada una de las posiciones medidas se obtendrá el error de medida en distancias, es decir, la diferencia entre la distancia medida y la calibrada.

Como resultado final de esta prueba se obtendrán tres parámetros:

- La máxima desviación obtenida para todas las posiciones.
- El rango de estas desviaciones.
- Un valor que da idea de la desviación media, que vendrá dado por dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas.

Esta desviación media se calcula de la siguiente manera:

$$2RMS = 2\sqrt{(\sum D_i^2 / n)}$$

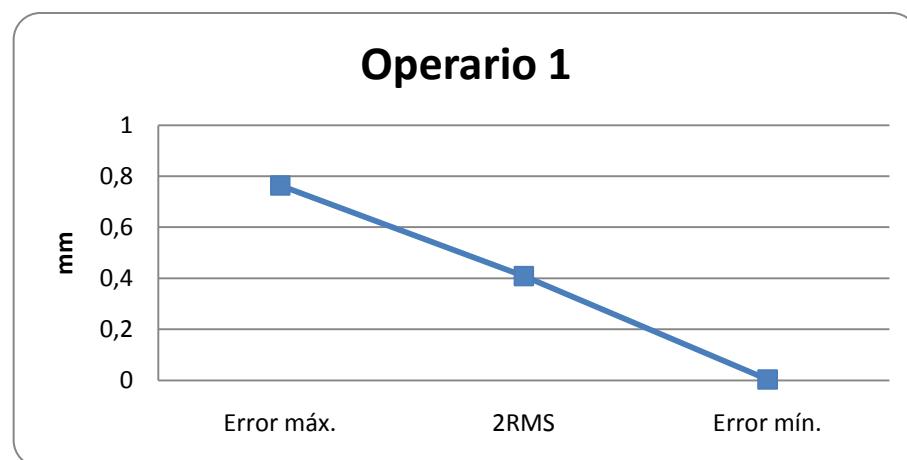


Resultados:

a) OPERARIO 1:

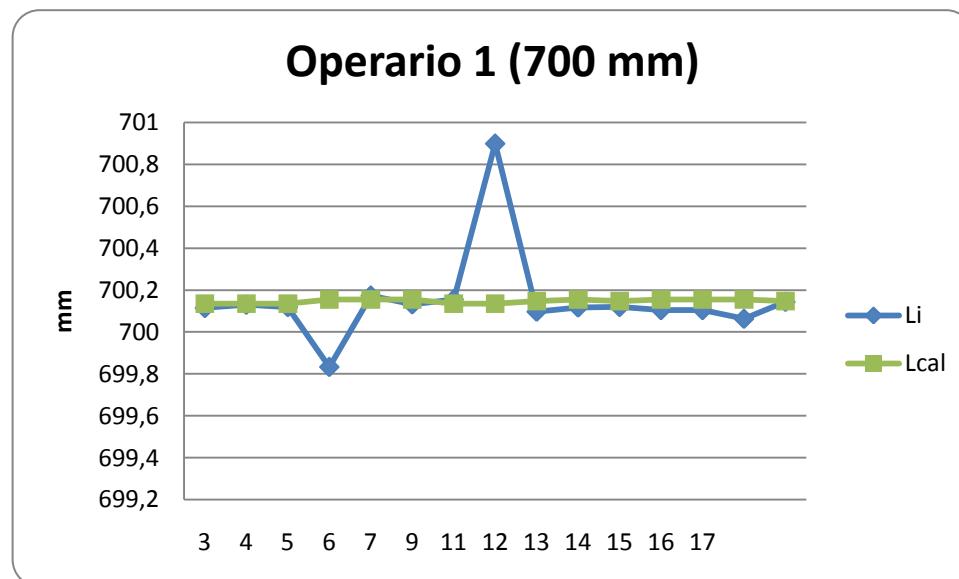
Posiciones	L_i	L_{cal}	D_i	D_i^2
1	700,1145	700,1350	0,0205	0,0004
2	700,1301	700,1350	0,0049	0,0000
3	700,1190	700,1350	0,0160	0,0003
4	699,8334	700,1549	0,3215	0,1034
5	700,1738	700,1549	0,0189	0,0004
6	700,1320	700,1549	0,0229	0,0005
7	700,1556	700,1350	0,0206	0,0004
8	1399,9916	1400,2890	0,2974	0,0885
9	700,8990	700,1350	0,7640	0,5837
10	1400,1709	1400,2890	0,1181	0,0140
11	700,0970	700,1474	0,0504	0,0025
12	700,1169	700,1549	0,0380	0,0014
13	700,1191	700,1474	0,0283	0,0008
14	700,1045	700,1549	0,0504	0,0025
15	700,1043	700,1549	0,0506	0,0026
16	700,0630	700,1549	0,0919	0,0084
17	700,1439	700,1474	0,0035	0,0000
18	1400,1769	1400,2890	0,1121	0,0126
19	1400,2096	1400,2890	0,0794	0,0063
20	1400,2199	1400,2890	0,0691	0,0048
Error máx.		0,7640	...	
Rango ($D_{\max} - D_{\min}$)		0,7605	...	
2RMS		...	0,4083	

RANGO DE ERRORES EN VALOR ABSOLUTO DEL OPERARIO 1:

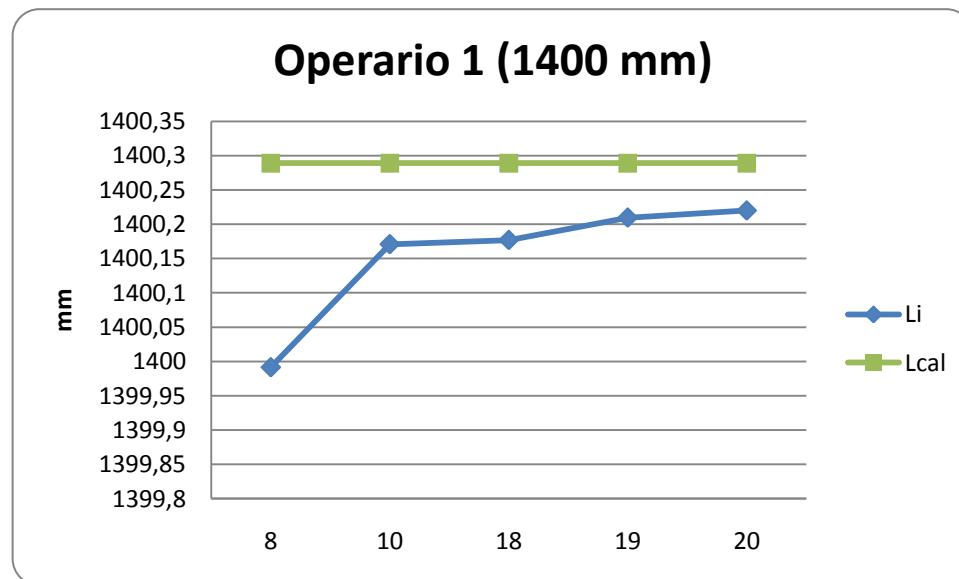




LONGITUD MEDIDA Y LONGITUD CALIBRADA DE LAS POSICIONES CON DISTANCIA 700 MILIMETROS DEL OPERARIO 1:



LONGITUD MEDIDA Y LONGITUD CALIBRADA DE LAS POSICIONES CON DISTANCIA 1400 MILIMETROS DEL OPERARIO 1:

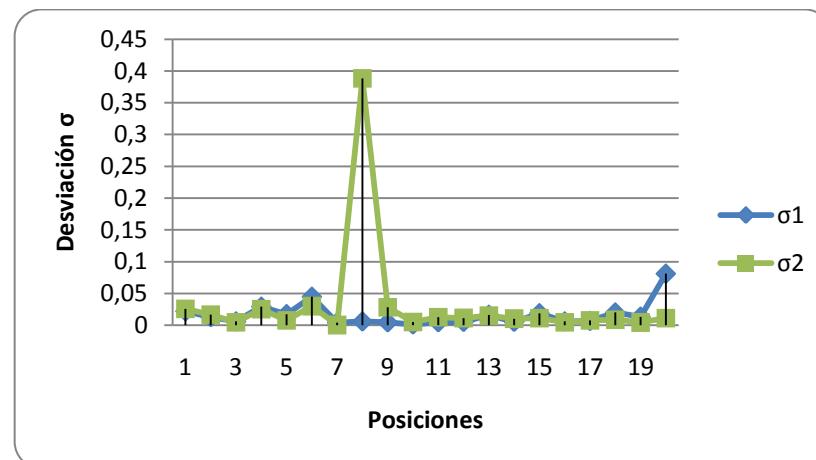




CENTROS DE LAS ESFERAS QUE MATERIALIZAN LAS DISTANCIAS Y SUS
DESVIACIONES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 1:

Centro esfera 1 Matlab			σ	Centro esfera 2 Matlab			σ
X	Y	Z		X	Y	Z	
811,3855	-420,7859	762,8432	0,0221	296,9224	-422,6516	287,9910	0,0259
552,8134	-423,9234	-956,5563	0,0128	193,2746	-420,9120	-355,8027	0,0167
-469,3860	335,3594	-803,0915	0,0060	213,7166	336,0730	-956,5092	0,0047
366,1498	196,7762	891,4956	0,0292	-119,1822	-297,0520	993,2467	0,0253
-418,6223	409,5434	778,2527	0,0174	-414,0692	-290,6123	776,0907	0,0078
465,7934	407,3669	-791,5120	0,0448	457,6360	-292,7094	-788,1207	0,0302
-1063,2000	337,1000	-393,9000	0,0044	-426,3437	338,8864	-102,9898	0,0004
283,0454	-657,7440	778,4374	0,0060	-440,0903	336,3592	108,5046	0,3884
-716,5675	336,4696	872,4958	0,0045	-251,9166	336,8753	347,7494	0,0285
651,5947	338,2665	-191,8558	0,0013	46,9139	-647,8632	597,0598	0,0051
-424,1454	-302,6997	-834,7643	0,0047	63,6936	192,2456	-919,4880	0,0129
-851,7628	199,0545	380,7596	0,0053	-944,2305	-295,2204	-106,3808	0,0115
820,3782	-304,2285	-376,7096	0,0164	894,2900	193,7190	109,8622	0,0152
584,0825	-516,5635	846,1751	0,0054	101,1697	-20,0490	948,2283	0,0105
-411,6106	197,9662	-835,6004	0,0189	75,6068	-297,5446	-920,6551	0,0112
820,6426	196,3643	-367,3626	0,0060	895,4002	-295,9552	124,6954	0,0046
-848,7724	-301,6238	396,5776	0,0068	-940,0644	194,4354	-89,0071	0,0076
758,1483	-116,1968	386,1863	0,0201	-623,1997	-107,8409	614,8855	0,0089
-760,5230	610,3168	-441,1622	0,0135	-759,5044	-789,8304	-427,9811	0,0045
400,4053	609,1944	261,5510	0,0810	404,7963	-790,9344	246,1908	0,0112

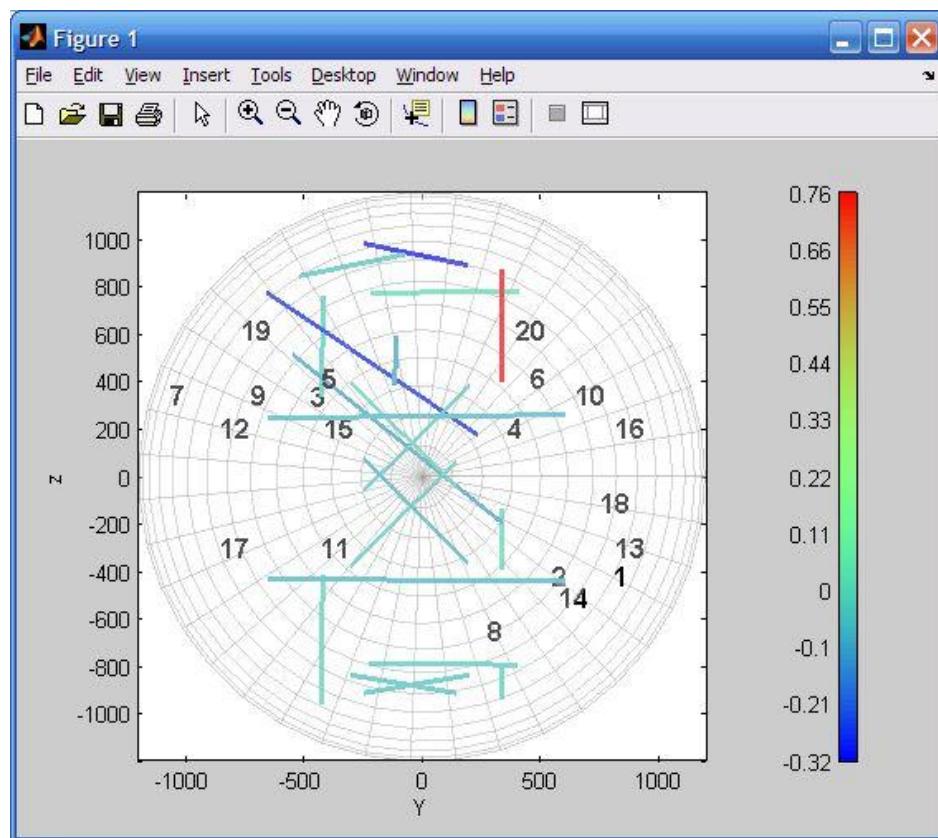
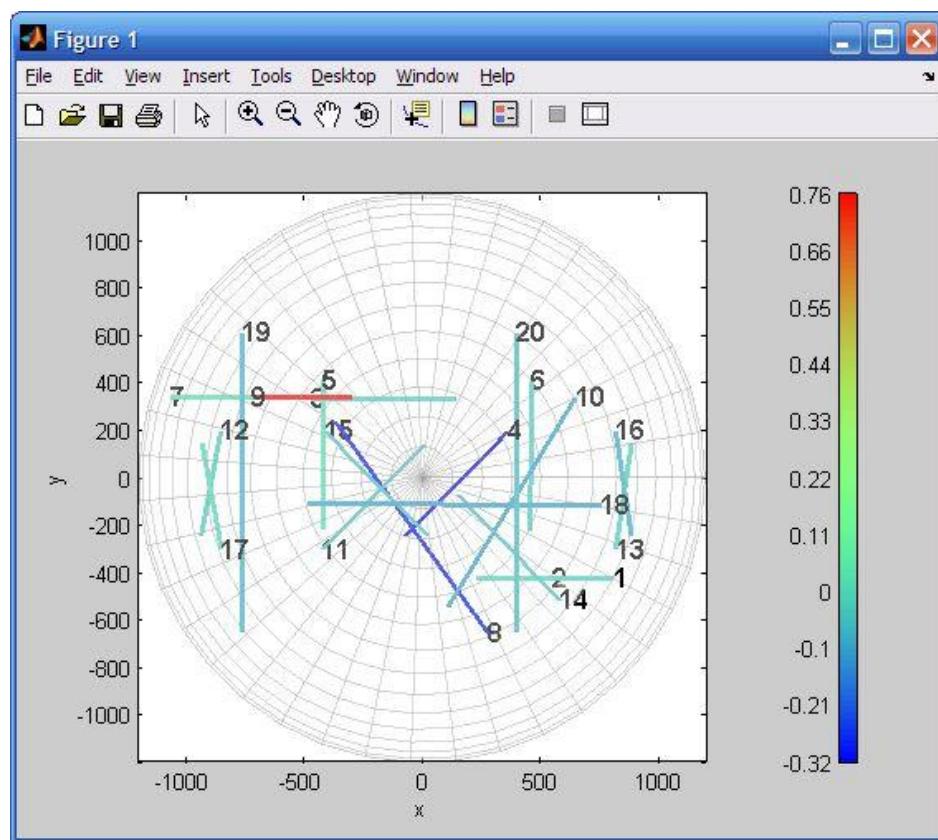
TABLA COMPARACIÓN DE DESVIACIONES DE ESFERAS. OPERARIO 1:



A continuación se muestran las 20 posiciones de la barra de esferas en el volumen de trabajo, representadas con diferentes colores según el error para el operario 1, mediante las vistas en 3 dimensiones y en 2D en los ejes XY, XZ, YZ.

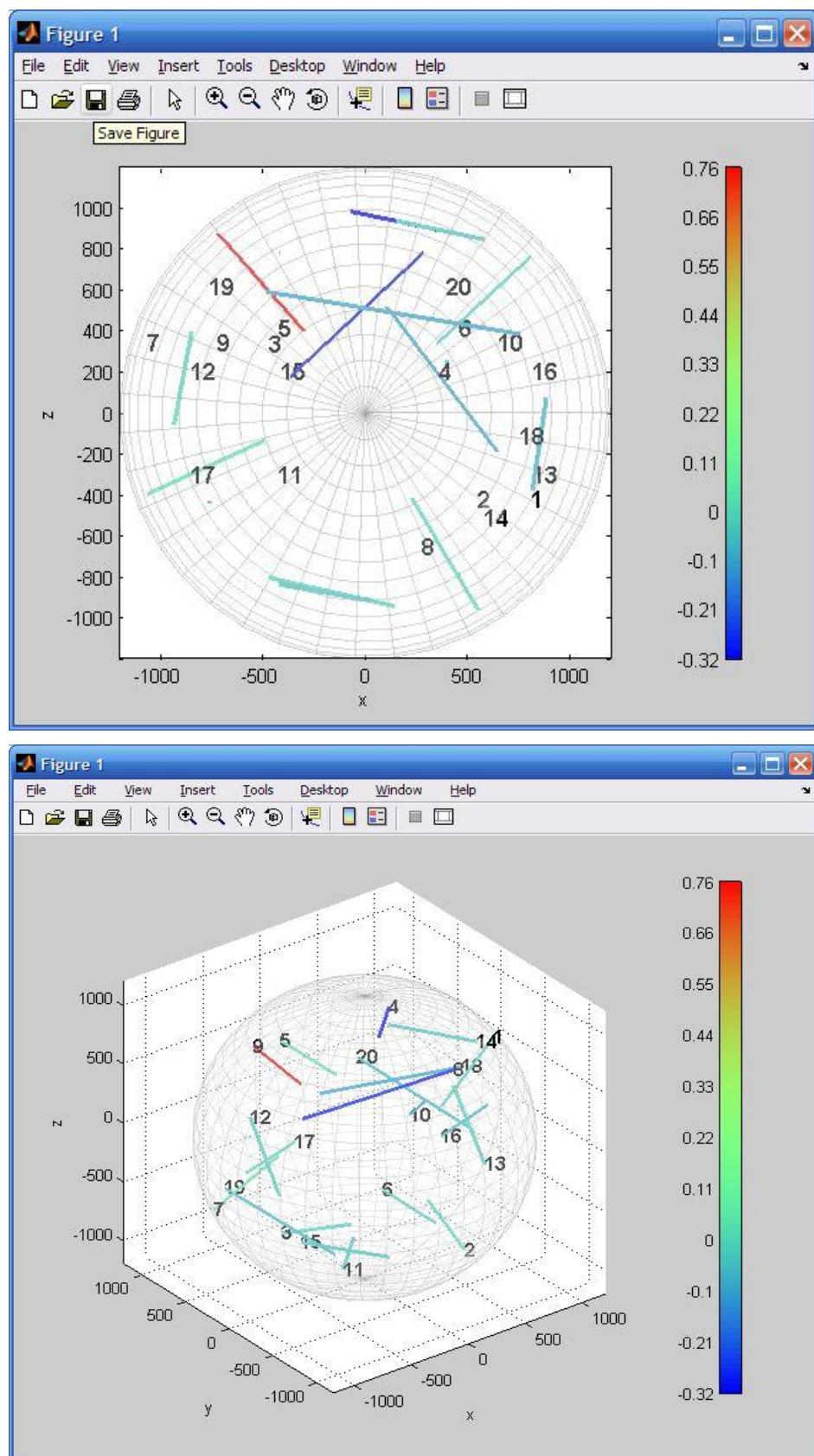


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004

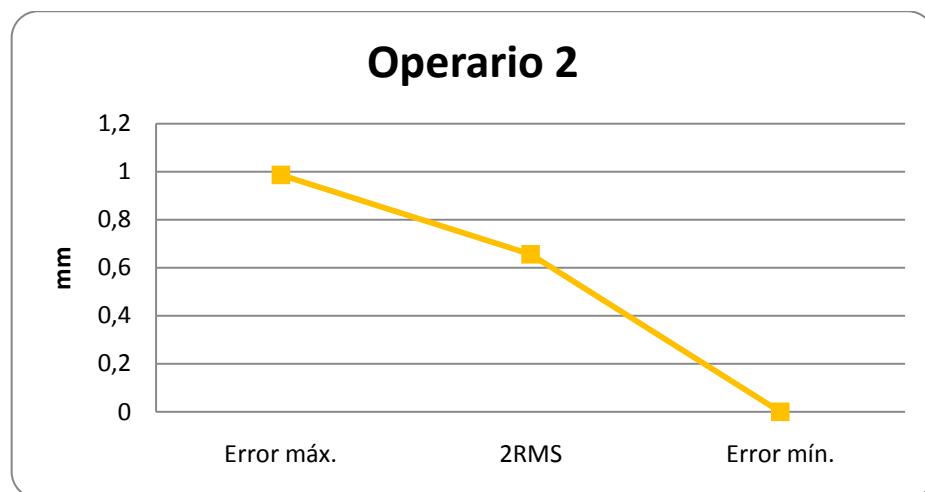




b) OPERARIO 2:

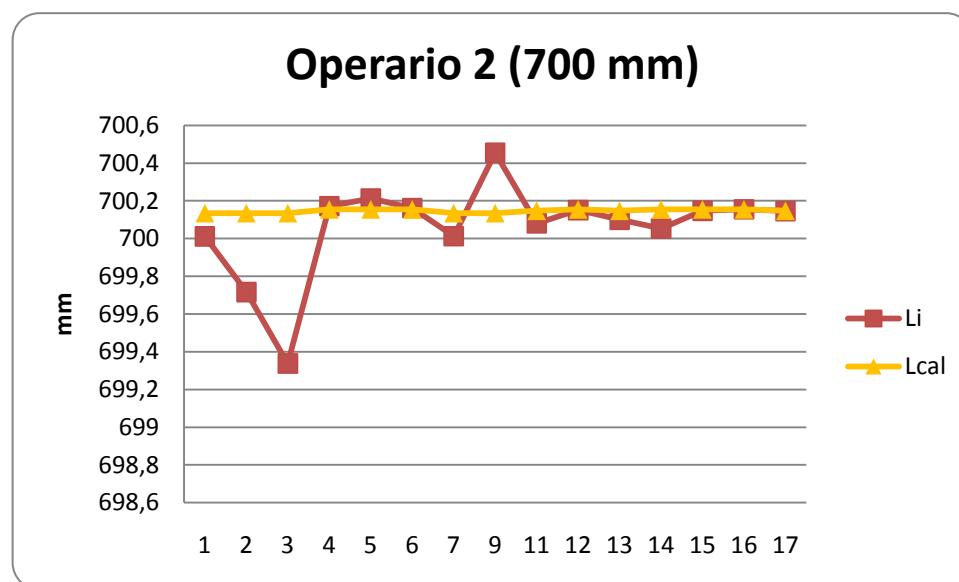
Posiciones	L_i	L_{cal}	D_i	D_i^2
1	700,0116	700,1350	0,1234	0,0152
2	699,7165	700,1350	0,4185	0,1752
3	699,3378	700,1350	0,7972	0,6355
4	700,1721	700,1549	0,0172	0,0003
5	700,2124	700,1549	0,0575	0,0033
6	700,1612	700,1549	0,0063	0,0000
7	700,0125	700,1350	0,1225	0,0150
8	1399,3031	1400,2890	0,9859	0,9721
9	700,4557	700,1350	0,3207	0,1028
10	1400,2687	1400,2890	0,0203	0,0004
11	700,0810	700,1474	0,0664	0,0044
12	700,1509	700,1549	0,0040	0,0000
13	700,0999	700,1474	0,0475	0,0023
14	700,0526	700,1549	0,1023	0,0105
15	700,1475	700,1549	0,0074	0,0001
16	700,1549	700,1549	0,0000	0,0000
17	700,1456	700,1474	0,0018	0,0000
18	1400,7365	1400,2890	0,4475	0,2003
19	1400,3559	1400,2890	0,0669	0,0045
20	1400,2059	1400,2890	0,0831	0,0069
Error máx.		0,9859	...	
Rango ($D_{\max} - D_{\min}$)		0,9859	...	
2RMS		...		0,6555

RANGO DE ERRORES EN VALOR ABSOLUTO DEL OPERARIO 2:

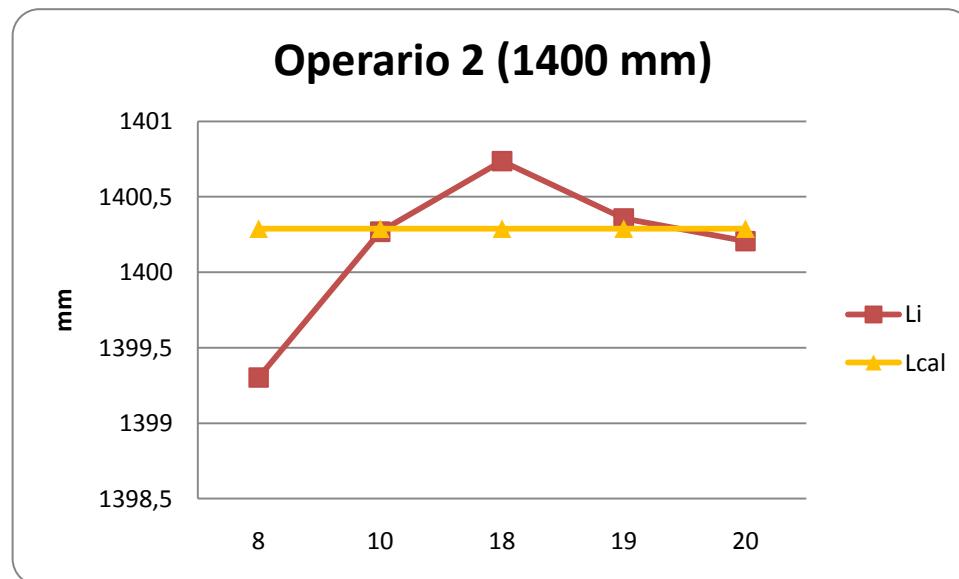




LONGITUD MEDIDA Y LONGITUD CALIBRADA DE LAS POSICIONES CON DISTANCIA 700 MILIMETROS DEL OPERARIO 2:



LONGITUD MEDIDA Y LONGITUD CALIBRADA DE LAS POSICIONES CON DISTANCIA 1400 MILIMETROS DEL OPERARIO 2:

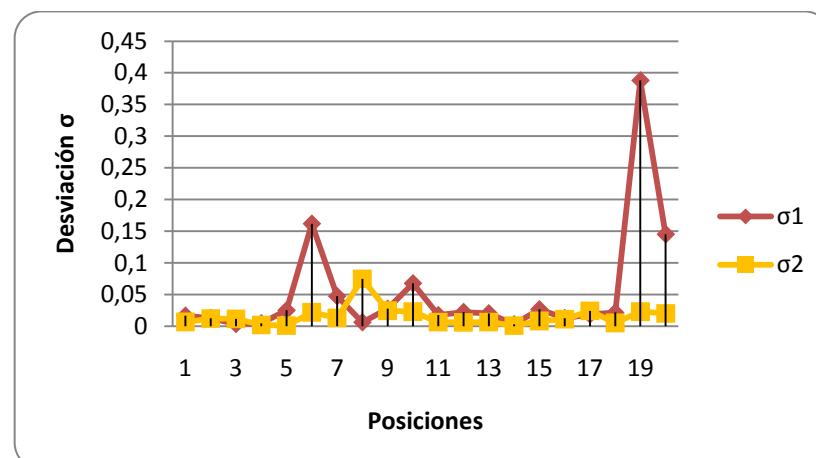




CENTROS DE LAS ESFERAS QUE MATERIALIZAN LAS DISTANCIAS Y SUS
DESVIACIONES CORRESPONDIENTES AL OPERARIO 2:

Centro esfera 1 Matlab			σ	Centro esfera 2 Matlab			σ
X	Y	Z		X	Y	Z	
811,4830	-420,8710	762,8100	0,0166	297,0401	-422,6738	288,0874	0,0068
552,3073	-423,9808	-956,1615	0,0129	193,0479	-420,9060	-355,7230	0,0122
-468,5347	335,3574	-803,4897	0,0036	213,8395	336,1501	-956,5851	0,0115
366,1620	196,8089	891,5014	0,0047	-119,5501	-297,1289	993,2373	0,0020
-419,7215	409,5964	777,9451	0,0251	-414,1094	-290,5911	776,1004	0,0011
463,9531	407,5219	-791,0500	0,1618	457,6224	-292,6044	-788,0851	0,0220
-1063,6000	336,9000	-393,5000	0,0474	-426,6631	338,8389	-103,1121	0,0130
283,7215	-657,6927	778,5234	0,0062	-439,4796	336,2338	109,8386	0,0748
-716,5921	336,4573	873,3909	0,0276	-253,0804	336,9212	348,2292	0,0246
651,5606	338,3961	-191,8968	0,0677	46,8993	-647,8725	597,0337	0,0230
-424,1557	-302,6795	-834,7453	0,0175	63,6251	192,3013	-919,4644	0,0067
-851,7673	199,0686	380,7479	0,0224	-944,2336	-295,2277	-106,4198	0,0061
820,3695	-304,2130	-376,7289	0,0204	894,2709	193,7764	109,7739	0,0067
584,0675	-516,5653	846,1968	0,0031	101,2488	-20,0240	948,2091	0,0011
-411,6211	198,0156	-835,6004	0,0267	75,6633	-297,4910	-920,6509	0,0083
820,6740	196,4364	-367,3371	0,0128	895,4184	-295,9669	124,7697	0,0112
-848,7700	-301,6557	396,5389	0,0187	-940,0368	194,4733	-88,9817	0,0243
758,5832	-116,2924	385,7666	0,0216	-623,2760	-107,8045	614,7992	0,0053
-760,2077	610,4735	-441,5676	0,3879	-759,4371	-789,8176	-428,1165	0,0231
400,5723	609,1269	261,7212	0,1452	404,7936	-790,9857	246,1152	0,0201

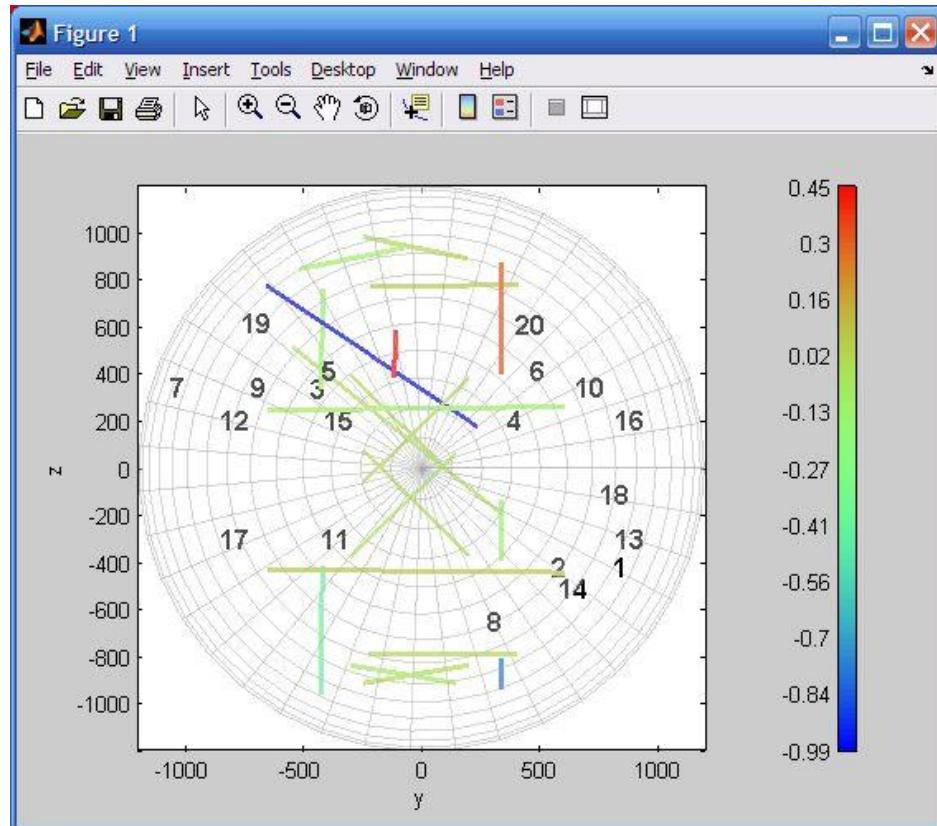
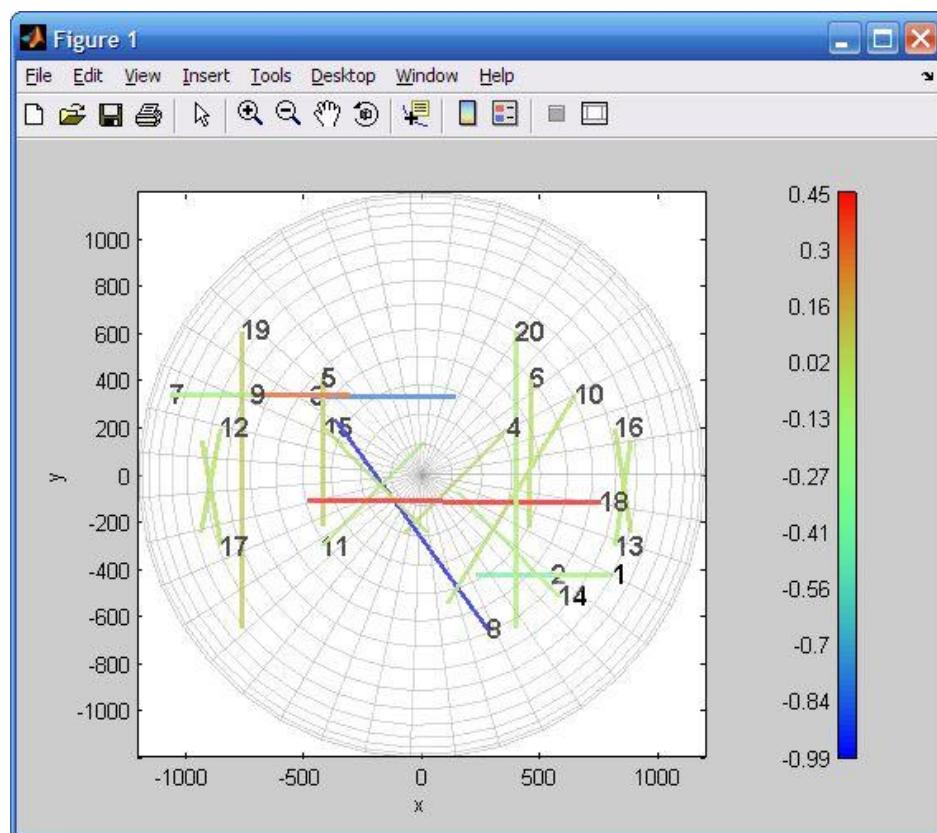
TABLA COMPARACIÓN DE DESVIACIONES DE ESFERAS. OPERARIO 2:



A continuación se muestran las 20 posiciones de la barra de esferas en el volumen de trabajo, representadas con diferentes colores según el error para el operario 2, mediante las vistas en 3 dimensiones y en 2D en los ejes XY, XZ, YZ.

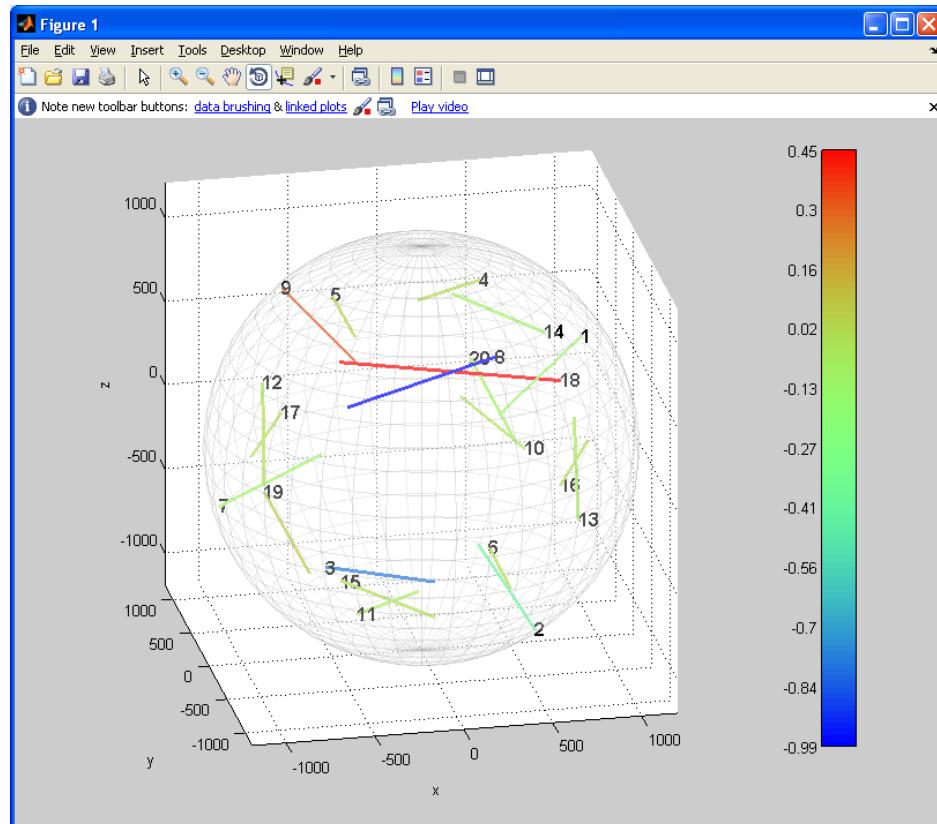
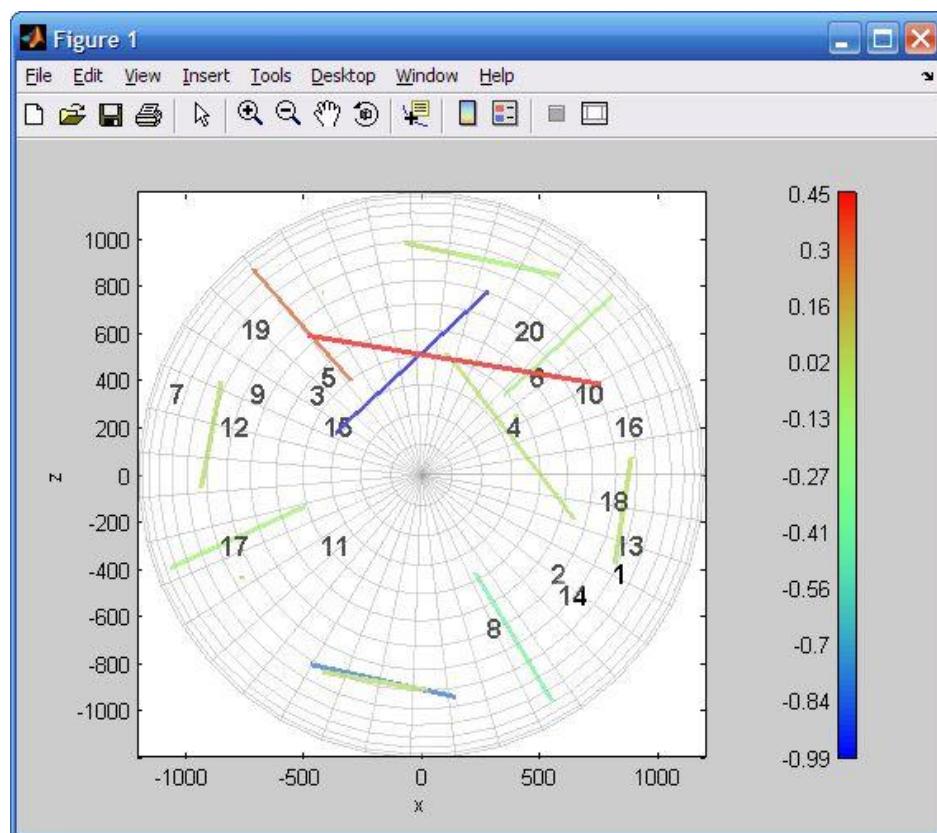


ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





RESULTADO FINAL DE LA PRUEBA:

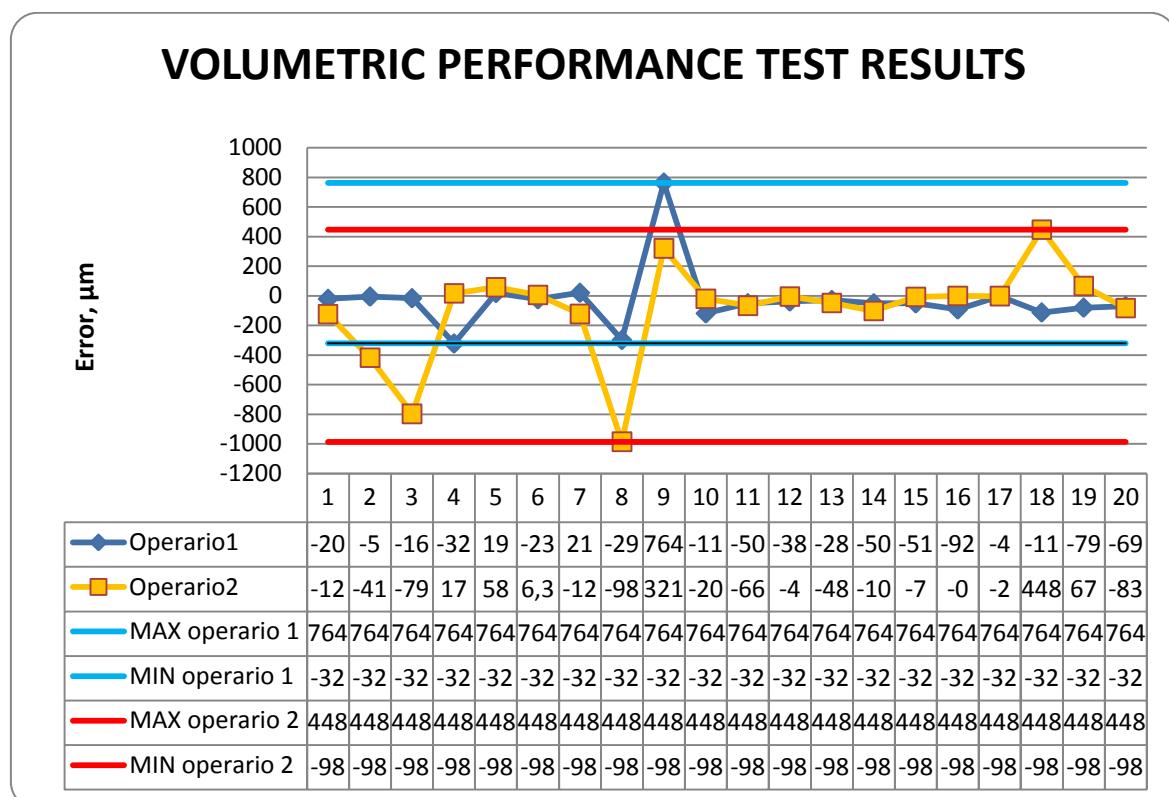
OPERARIO 1

Error máx.	0,7640
2RMS	0,4083
Error mín.	0,0035

OPERARIO 2

Error máx.	0,9859
2RMS	0,6555
Error mín.	0,0000

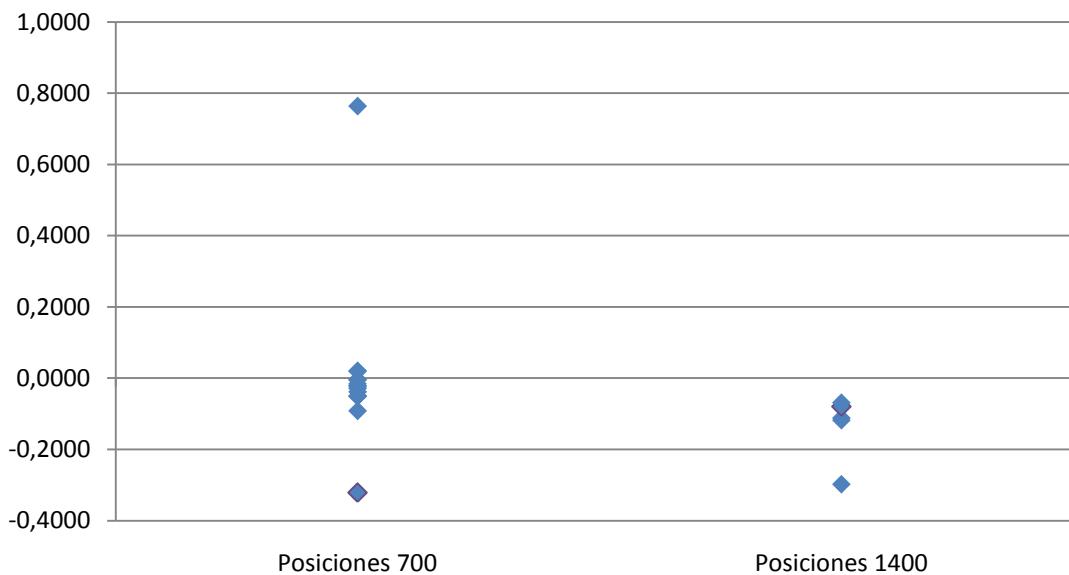
TABLA PROPUESTA POR LA NORMA. COMPARACIÓN DE ERRORES SEGÚN POSICIÓN PARA AMBOS OPERARIOS:



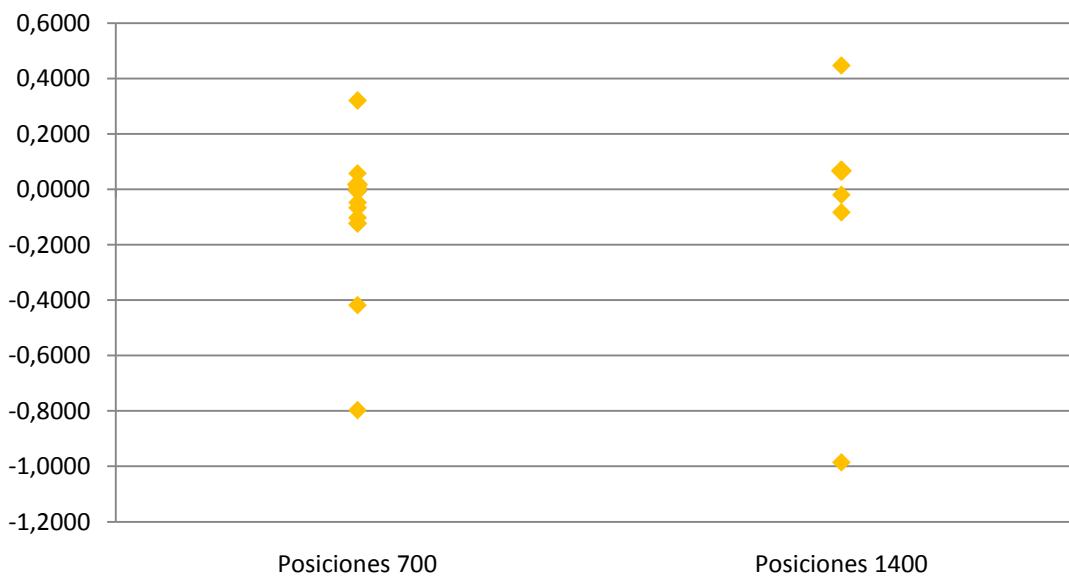


TABLAS DE COMPARACIÓN DE ERRORES PARA DISTANCIAS ENTRE
ESFERAS DE 700 Y 1400 MILIMETROS PARA AMBOS OPERARIOS:

Errores para posiciones a 700 y 1400 mm.
Operario 1



Errores para posiciones a 700 y 1400 mm.
Operario 2

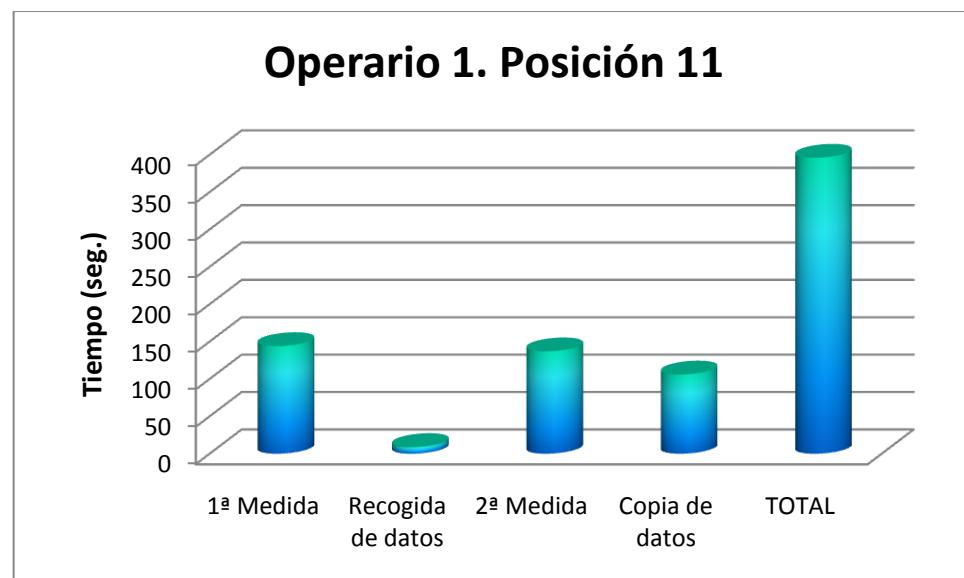




c) TIEMPOS:

POSICIÓN CON MAYOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 1:

POSICIÓN 11	Tiempo (seg.)
1 ^a Medida	144
Recogida de datos	9
2 ^a Medida	137
Copia de datos	106
TOTAL	396

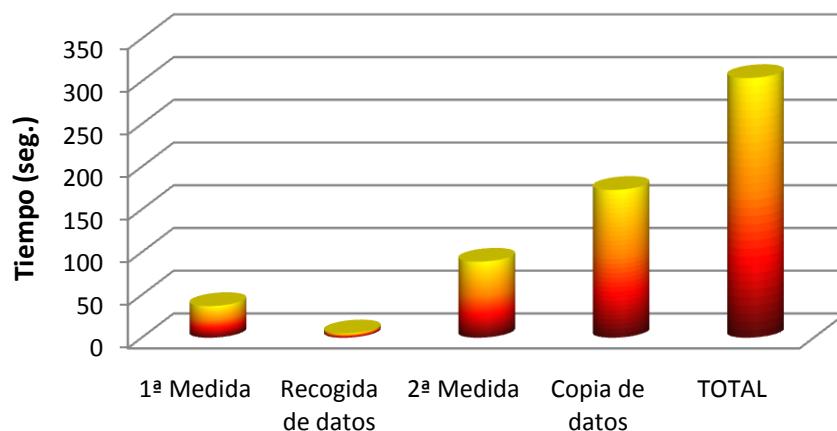


POSICIÓN CON MAYOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 2:

POSICIÓN 20	Tiempo (seg.)
1 ^a Medida	37
Recogida de datos	5
2 ^a Medida	89
Copia de datos	173
TOTAL	304



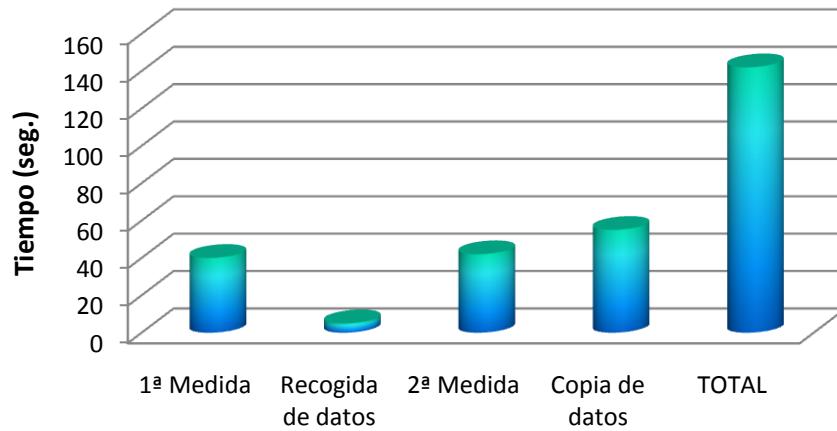
Operario 2. Posición 20



POSICIÓN CON MENOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 1:

POSICIÓN 14	Tiempo (seg.)
1ª Medida	40
Recogida de datos	5
2ª Medida	42
Copia de datos	55
TOTAL	142

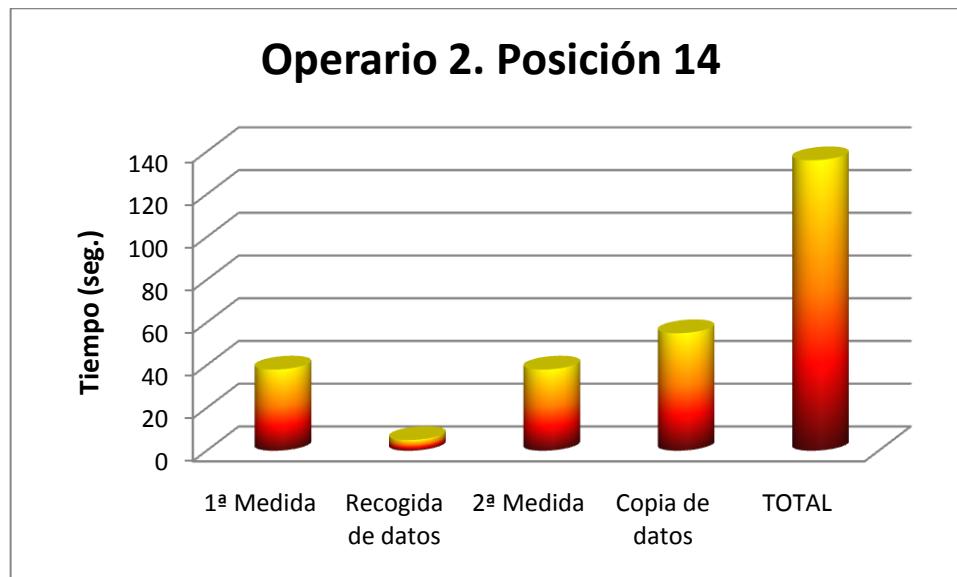
Operario 1. Posición 14





POSICIÓN CON MENOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 2:

POSICIÓN 14	Tiempo (seg.)
1 ^a Medida	38
Recogida de datos	5
2 ^a Medida	38
Copia de datos	55
TOTAL	136



TIEMPOS TOTALES PARA LA PRUEBA DE PRECISIÓN VOLUMÉTRICA
PARA AMBOS OPERARIOS SIN LA PREPARACIÓN:

TOTAL Operario 1	4786 segundos	1 hora y 19 minutos y 46 segundos
-------------------------	----------------------	--

TOTAL Operario 2	4425 segundos	1 hora y 13 minutos y 45 segundos
-------------------------	----------------------	--

Estos tiempos corresponden exclusivamente a las medidas y la recogida y copia de datos.



A continuación se muestran los tiempos incluyendo el periodo de preparación de la prueba:

POSICIÓN CON MAYOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 1:

POSICIÓN 4	Tiempo
Preparación	0:40:00
1 ^a Medida	0:00:42
Recogida de datos	0:00:05
2 ^a Medida	0:00:42
Copia de datos	0:00:55
TOTAL	0:42:24

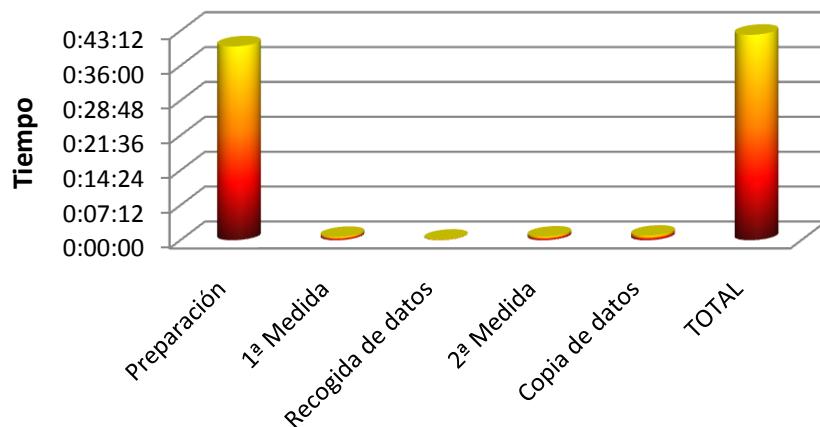


POSICIÓN CON MAYOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 2:

POSICIÓN 4	Tiempo
Preparación	0:40:00
1 ^a Medida	0:00:40
Recogida de datos	0:00:05
2 ^a Medida	0:00:44
Copia de datos	0:00:55
TOTAL	0:42:24



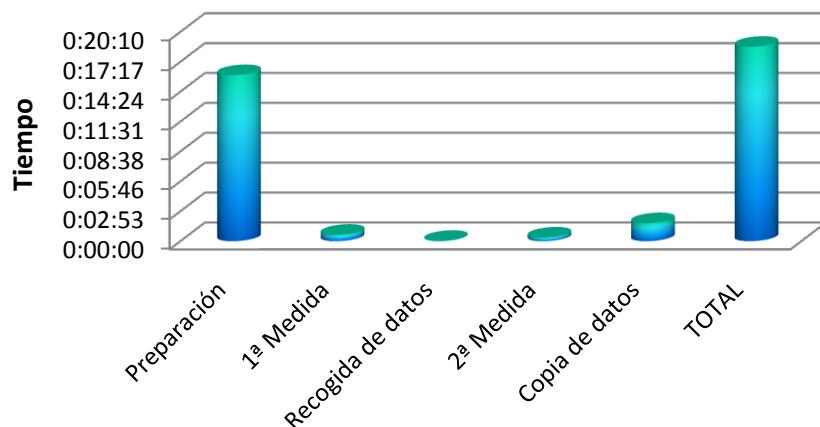
Operario 2. Posición 4



POSICIÓN CON MENOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 1:

POSICIÓN 3	Tiempo
Preparación	0:16:00
1ª Medida	0:00:37
Recogida de datos	0:00:02
2ª Medida	0:00:21
Copia de datos	0:01:44
TOTAL	0:18:44

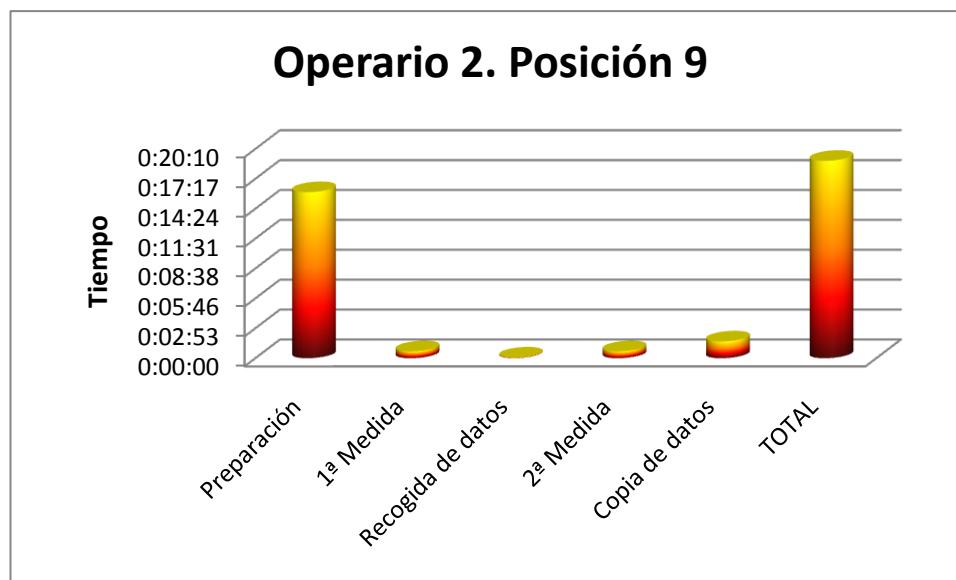
Operario 1. Posición 3





POSICIÓN CON MENOR TIEMPO PARA EL OPERARIO 2:

POSICIÓN 9	Tiempo
Preparación	0:16:00
1 ^a Medida	0:00:40
Recogida de datos	0:00:04
2 ^a Medida	0:00:40
Copia de datos	0:01:37
TOTAL	0:19:01



TIEMPOS TOTALES PARA LA PRUEBA DE PRECISIÓN VOLUMÉTRICA
PARA AMBOS OPERARIOS INCLUYENDO LA PREPARACIÓN:

TOTAL VOLUMÉTRICO Operario 1 **7:59:26**

TOTAL VOLUMÉTRICO Operario 2 **7:53:45**



Conclusiones:

Los resultados obtenidos en esta prueba deberían ser analizados de manera detallada para cada posición del patrón de esferas, pero debido a que no se poseen resultados parciales para todos los parámetros se realizará un estudio global de todas las situaciones para ambos operarios.

Se observa que, si comparamos los dos operarios, los errores máximos y mínimos corresponden al operario 2 y las desviaciones son similares en ambos operarios.

También se puede apreciar que para el operario 1 existe una posición en la que se produjo algún tipo de problema de medición (la posición 9) y en el operario 2 (las posiciones 3 y 8).

Las posiciones con mayores errores corresponden a la 2, 3 ,4, 8, 9 y 18 (posiciones horizontales o a 45º, tanto radiales como tangenciales y lejanas o cercanas). Esto nos da idea de las que podrían requerir de una mayor dificultad a la hora de tomar mediciones. Si bien, podría afirmarse que para cada operario esa dificultad es relativa, ya que lo que para uno es sencillo, para el otro puede ser complicado y viceversa.

En cambio, para las desviaciones, las posiciones menos favorables son la 6, 8, 19 y 20. Estas desviaciones son altas en ambos operarios, lo que también nos da una idea de que fueron complicadas a la hora del posicionamiento y de la medida en sí. En este caso se aprecia que las posiciones verticales (tres de las cuatro posibles) son las que tienen una mayor desviación y además se incluye también una a 45º, esto nos da idea de la dificultad de estas posiciones y de que los datos pueden no ser tan fiables como los que se toman en posiciones horizontales o incluso a 45º.

En cuanto a resultados finales, el rango del operario 2 es mayor que el del otro operario, lo que puede significar que tome las mediciones de manera más irregular, y tanto toma medidas perfectas como lo hace con errores mayúsculos.



Por último, y refiriéndonos a los tiempos en cada posición, existen grandes similitudes, tanto en los totales como en los parciales, para ambos operarios. Están comprendidos entre 130 y 400 segundos (entre 2 y 7 minutos), lo que son tiempos aceptables para la realización de estas pruebas.

En el caso del operario 2 también se observa que es el que materializa el mayor y el menor tiempo, lo que reafirma la idea de su irregularidad a la hora de tomar medidas.

La posición 14 es la que requiere menor tiempo en ambos operarios (posición a 45º) y las posiciones 11 y 20 las que mayor duración tuvieron (posiciones a 45º y vertical respectivamente), lo que nos puede ofrecer datos sobre cual podría ser las posiciones más complicadas o más costosas, en cuanto a su duración.

En la misma línea que para las pruebas anteriores, si incluimos los tiempos correspondientes a la preparación, la duración es mucho más elevada. Esto conlleva también que las posiciones de mayor y menor tiempo para ambos operarios difieran con respecto a las que no incluían estos tiempos, debido a que la preparación para cada posición requiere de un periodo de tiempo distinto.

Estos tiempos están en el rango entre 18 y 43 minutos.

Otro dato a tener en cuenta es que el operario 2 es el que posee un tiempo total menor en ambos casos.

En este último caso, la posición 4 es la que necesita un mayor periodo para su realización (posición a 45º) y las posiciones 3 y 9 las que menor duración poseen (posiciones horizontales ambas). Esto reafirma la idea de cuales son las posiciones más sencillas de llevar a cabo.

La repetibilidad que posee este aparato no es mala, pero con respecto a este ensayo, su reproducibilidad deja bastantes dudas.

La conclusión final es que este ensayo reproduce los mayores errores y desviaciones de todos los que consta la normativa ASME para brazos articulados.



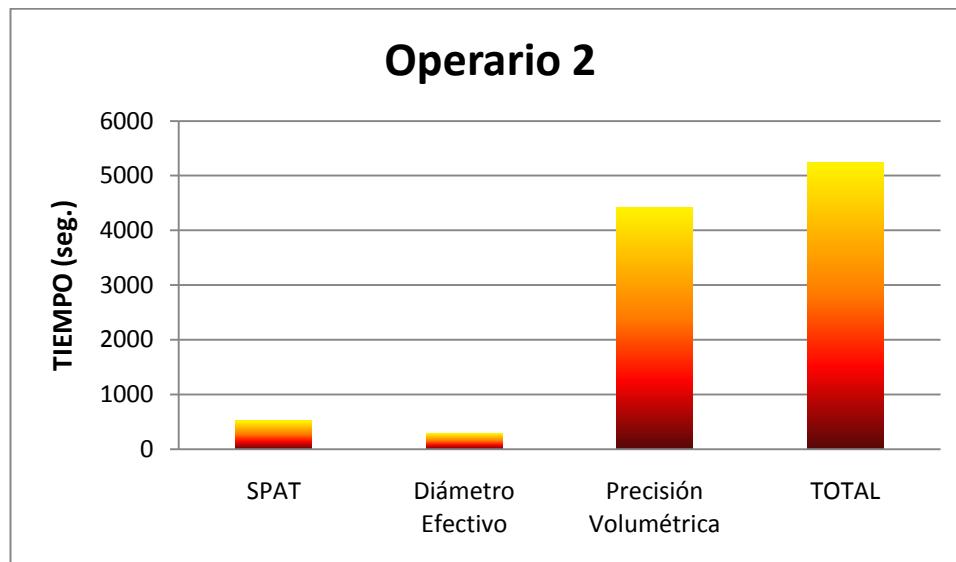
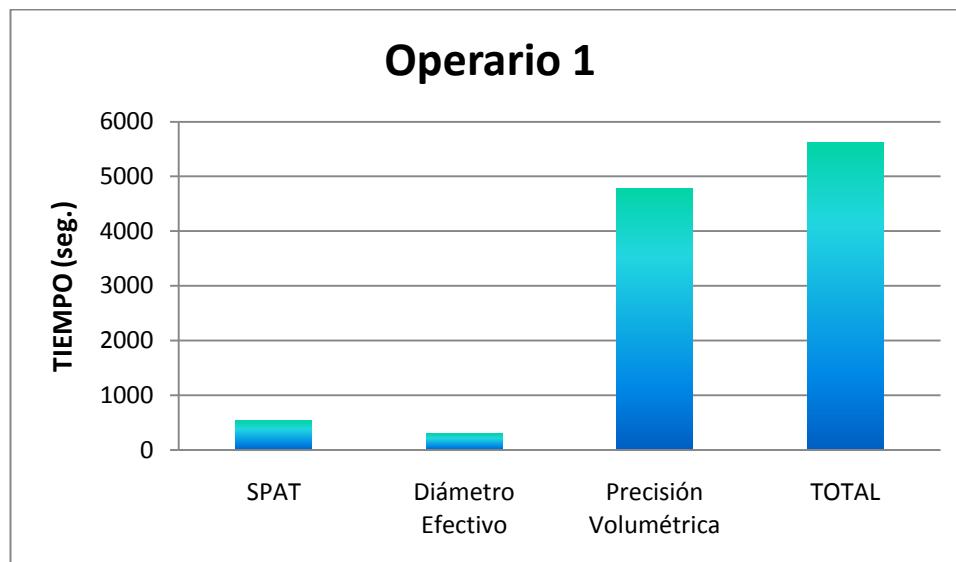
TIEMPOS TOTALES DE TODAS LAS PRUEBAS SIN INCLUIR LA PREPARACIÓN:

Operario 1	TIEMPO
SPAT	530
Diámetro Efectivo	298
Precisión Volumétrica	4786
TOTAL	5614

93 minutos 34 segundos

Operario 2	TIEMPO
SPAT	520
Diámetro Efectivo	292
Precisión Volumétrica	4425
TOTAL	5237

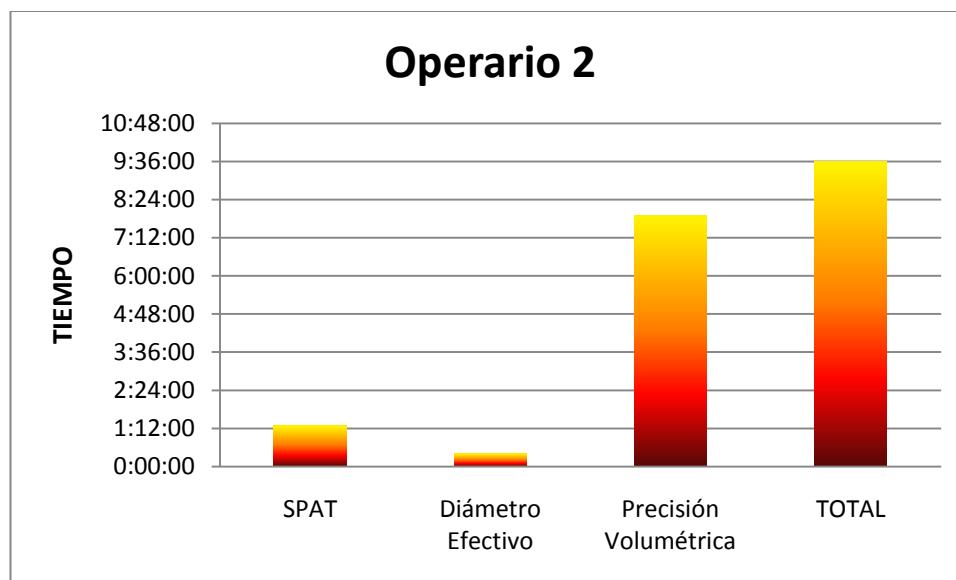
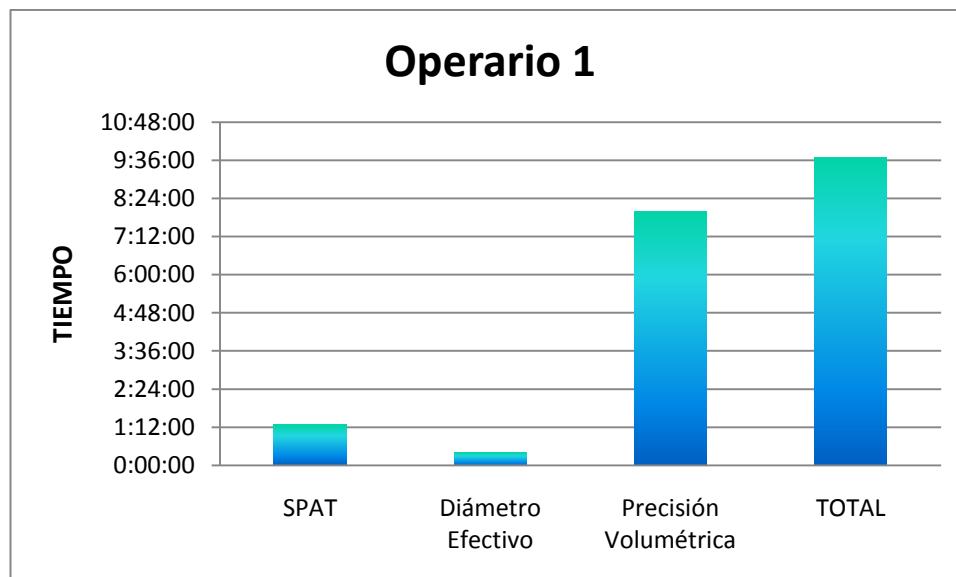
87 minutos 17 segundos





**TIEMPOS TOTALES DE TODAS LAS PRUEBAS INCLUYENDO LA
PREPARACIÓN:**

Operario 1	TIEMPO	Operario 2	TIEMPO
SPAT	1:16:50	SPAT	1:16:40
Diámetro Efectivo	0:24:58	Diámetro Efectivo	0:24:52
Precisión Volumétrica	7:59:26	Precisión Volumétrica	7:53:45
TOTAL	9:41:14	TOTAL	9:35:17



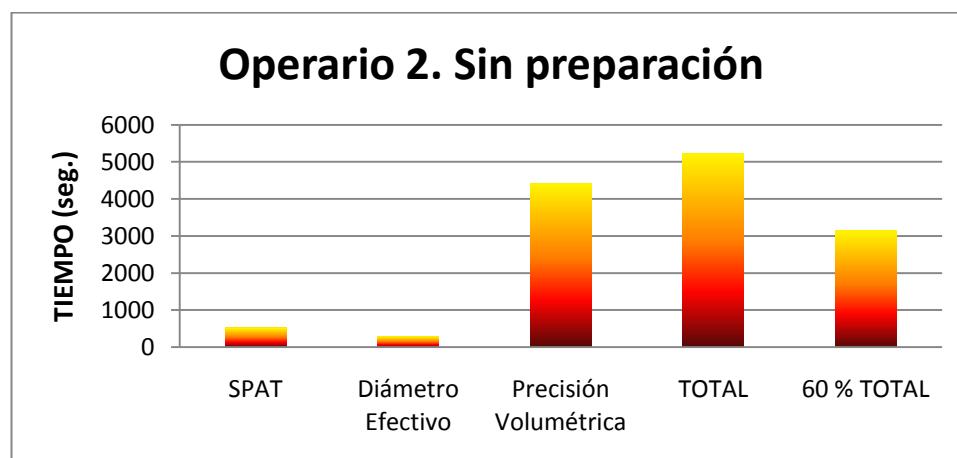
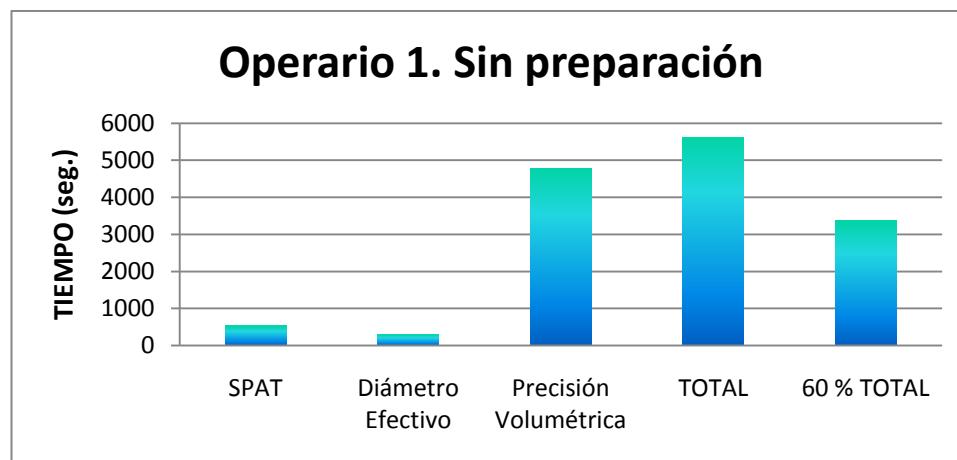


CONCLUSIONES DE LOS TIEMPOS TOTALES:

Se debe tener en cuenta que la influencia del operario en cada prueba es bastante grande, aunque no se aprecie en los tiempos totales de realización de los ensayos.

Después del estudio de los tiempos se puede llegar a la conclusión de que debería tenerse en cuenta solo el 60 % del tiempo total porque con la práctica en los ensayos se gana mucha agilidad y se mejoran éstos:

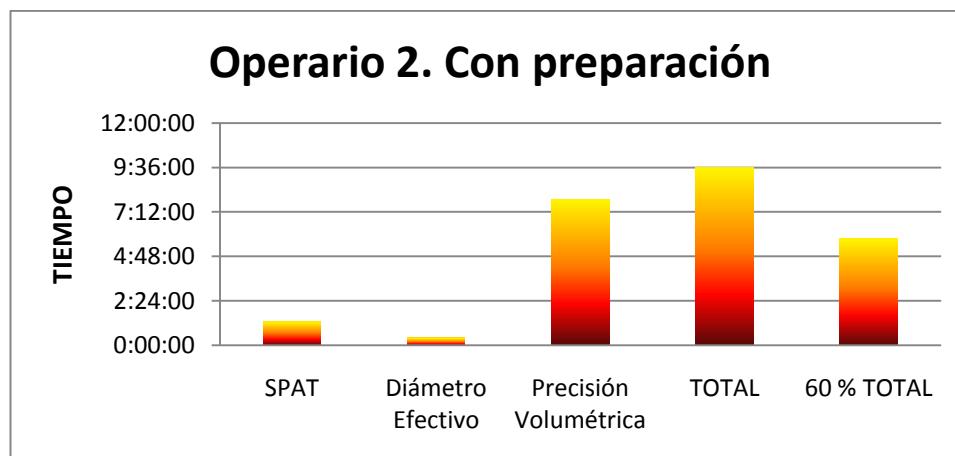
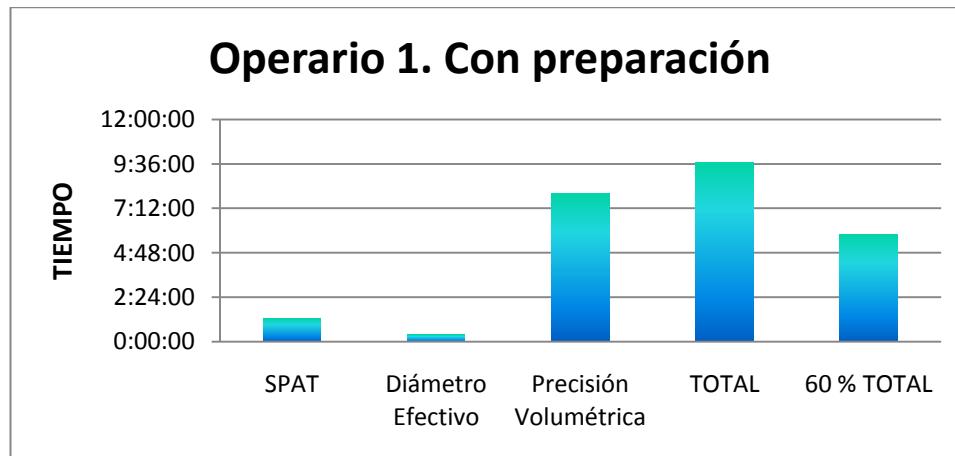
Operario 1 →	60 % TOTAL =	3368,4 segundos =	56 minutos	8 segundos
Operario 2 →	60 % TOTAL =	3142,2 segundos =	52 minutos	22 segundos





Si tenemos en cuenta la preparación:

Operario 1 →	60 % TOTAL =	5:48:44
Operario 2 →	60 % TOTAL =	5:45:10



En cuanto a lo que se refiere a los tiempos de cada ensayo de esta prueba, el que más tiempo requiere es el de Precisión volumétrica, seguido por el SPAT y, por último, el de Diámetro efectivo. Esto se debe, en gran parte, a que el ensayo volumétrico requiere de un mayor número de posiciones que los otros dos y en el caso del SPAT se debe medir un asiento cinemático, lo cual es más complicado que la medición de una esfera.



ANEXO D. COMPARACIÓN CON VDI

Cuando hablamos de VDI (Verein Deutscher Ingenieure), en inglés Asociación de Ingenieros Alemanes, nos referimos a una organización de ingenieros y científicos equiparable a la ASME en Estados Unidos. Estas recomendaciones alemanas tienen un gran prestigio, principalmente en Europa, ya que la mayoría de ellas llegan a convertirse en Normas DIN, una norma muy valorada en la mayoría de los sectores, y a continuación en una Norma ISO (Organización Internacional de la Estandarización). En España sería adaptada como UNE (Unificación de Normativas Españolas), con gran probabilidad, elaborada por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).

La Directriz VDI/VDE 2617, en su parte 9, se centra en el campo de los brazos articulados de medición. Por ello y debido a su importancia en Europa y en el resto del mundo es razonable comparar los resultados obtenidos en los ensayos de ambas normas para un mismo operario.

Como consecuencia de que existen pruebas con ciertas similitudes en ambas normas se comparan dos a dos dichas pruebas, en cuanto a resultados finales de precisión, es el caso de la prueba de Diámetro efectivo (ASME) y la de Error de sondeo (error de tamaño, correspondiente a la VDI); así como las de Articulación de punto único (SPAT, correspondiente a la ASME) y la de Error de sondeo (error de posición de la esfera, de la VDI); y por último las pruebas de Precisión volumétrica (ASME) y las de Prueba de error de indicación de Volumen parcial y Volumen completo (VDI).

Los resultados expuestos hacen referencia a los errores máximos y medios en cada ensayo y su correspondiente desviación estándar.

A continuación se comparan exclusivamente los resultados correspondientes al **operario 2** en ambas normas (ASME y VDI) para que de esta manera sean significativos, no tendría ningún interés la comparación entre distintos operarios debido a su gran influencia en las mediciones.



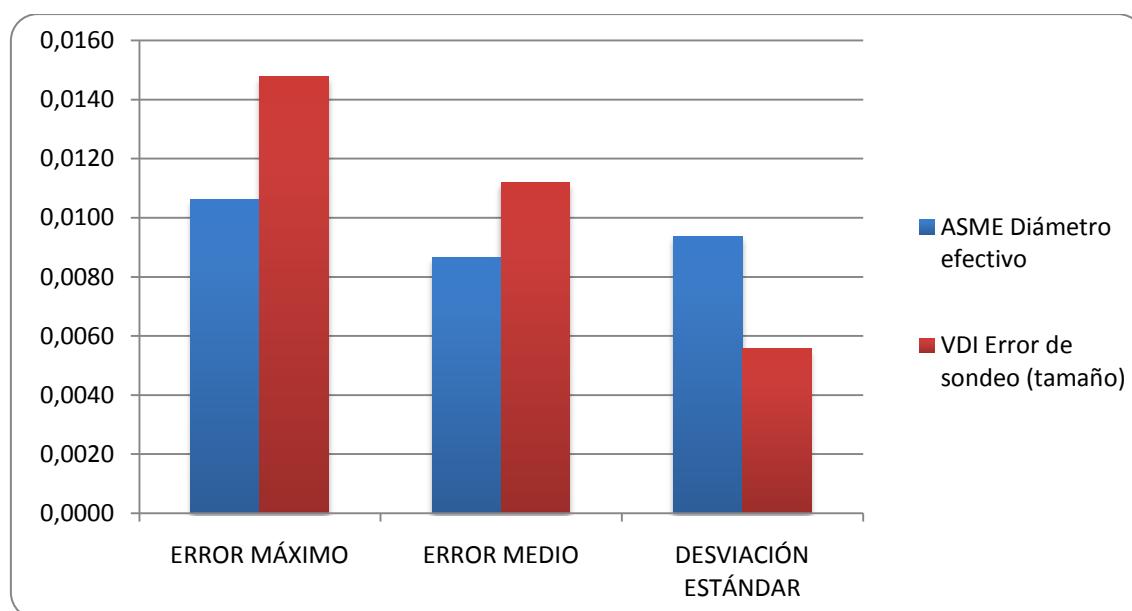
RESULTADOS COMPARATIVA DE AMBAS NORMAS:

	ASME	VDI
	Diámetro efectivo	Error de sondeo (tamaño)
ERROR MÁXIMO	0,0106	0,0148
ERROR MEDIO	0,0087	0,0112
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,0094	0,0056

	ASME	VDI
	Articulación punto único	Error de sondeo (esfera)
ERROR MÁXIMO	0,0513	0,1965
ERROR MEDIO	0,0448	0,1314
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,0326	0,0811

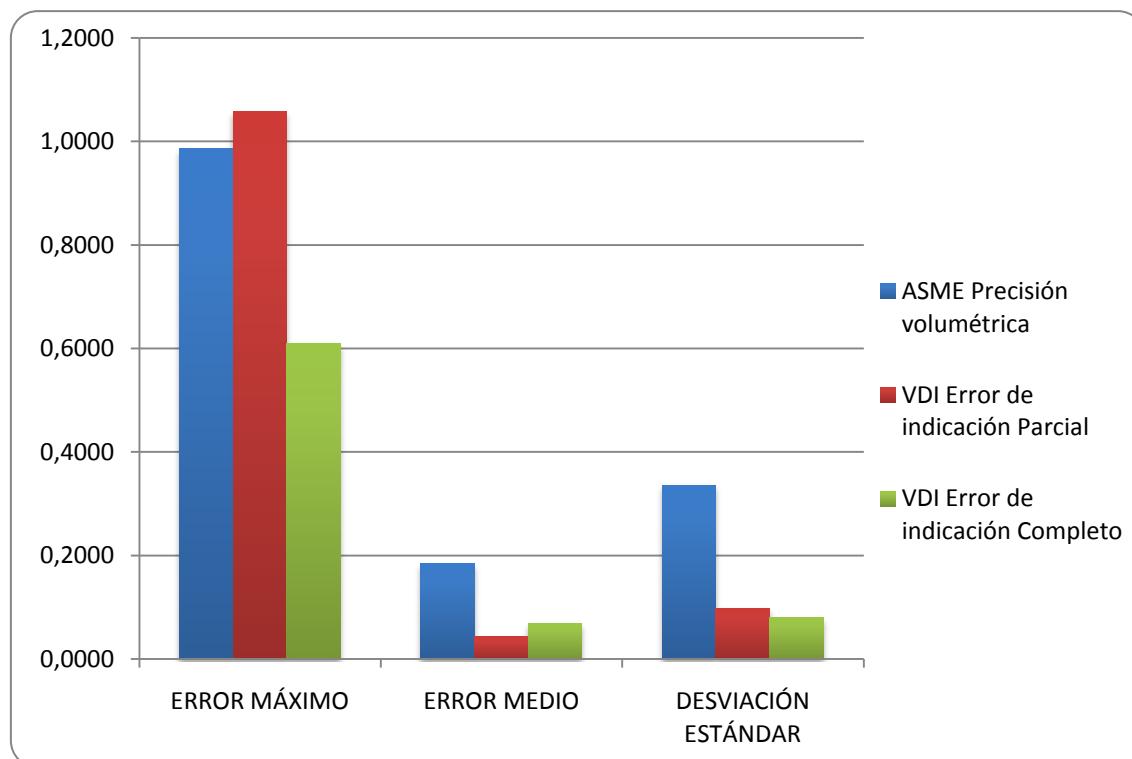
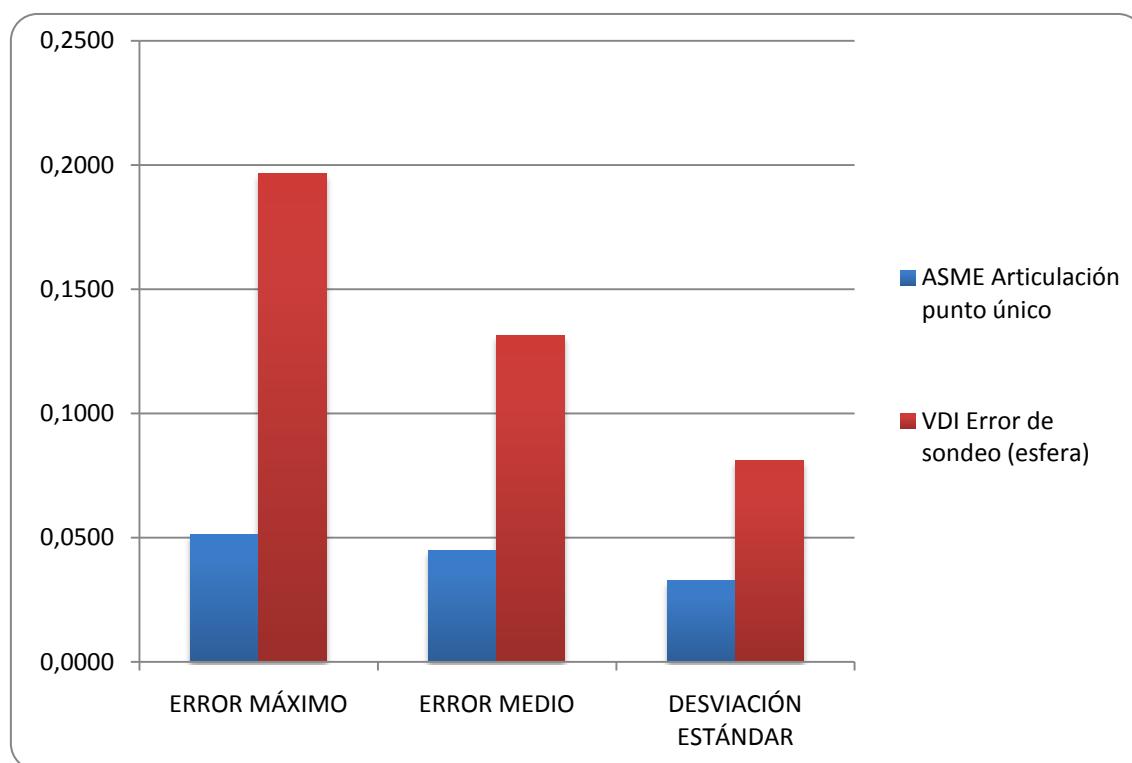
	ASME	VDI
	Precisión volumétrica	Error de indicación
		Parcial
ERROR MÁXIMO	0,9859	1,0588
ERROR MEDIO	0,1848	0,0431
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,3363	0,0986
		Completo

GRÁFICAS DE COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE AMBAS NORMAS:





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004





CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA COMPARATIVA DE AMBAS NORMAS:

Tras observar los resultados obtenidos en cada una de las normas (directriz en el caso de la VDI) se extraen los siguientes resultados parciales por comparativa de pruebas similares:

- La prueba de Diámetro efectivo (ASME) y la de Error de sondeo (error de tamaño, VDI): errores mayores en la VDI y desviaciones mayores en la ASME, lo que posiblemente es debido a una medida o varias de un rango mayor, lo cual desvía la media.
- La prueba de Articulación de punto único (SPAT, ASME) y la de Error de sondeo (error de posición de la esfera, VDI): en este caso todos los valores son mayores en la VDI, esto nos indica que esta prueba es más prohibitiva o quizás que la comparación entre medición de puntos en un asiento cinemático (ASME) y en una esfera (VDI) es comparable pero quizás con ciertas restricciones.
- La prueba de Precisión volumétrica (ASME) y las de prueba de Error de indicación de Volumen parcial y Volumen completo (VDI): en cuanto a errores máximos, son bastante similares en el ASME y en parcial (VDI), pruebas bastante similares en cuanto a su concepto y a su ejecución. Con respecto a los errores medios, se observa un cambio de tendencia únicamente en el caso de la prueba parcial, posiblemente algún error excesivo. Y, por último, si nos referimos a las desviaciones estándar, muy parecidas en las pruebas de la VDI y quizás excesiva en la ASME.

Si nos fijamos en las tres gráficas de comparación de resultados de ambas normas, se puede observar que los mayores rangos de errores y desviaciones se dan en las pruebas volumétricas, seguidas por las de SPAT y Error de sondeo (esfera), y por último, los valores más pequeños son los de Diámetro efectivo y Error de sondeo (tamaño). Esto es debido, sobre todo al número mayor de medidas que se toma en las pruebas de volumen y sus posiciones.



Y como reflexión general de todas las pruebas comparadas podríamos concluir que los errores máximos son mayores en la VDI que en la ASME, los errores medios en su mayoría también (exceptuando en el caso de las pruebas de volúmenes debido a que existe algún error que modificaría la media y la aumentaría en gran medida), y en el caso de las desviaciones estándar, son mayores en ASME que en VDI, excepto en la prueba SPAT. En este último caso, estas desviaciones mayores podrían ser debidas a ciertas medidas con excesivo error en el caso de la normativa americana, quizás la directriz alemana para esto es más minuciosa, ya que requiere de más repeticiones y de mayor número de posiciones.

Esto nos llevaría a pensar que la norma más restrictiva es la VDI, ya que obtiene resultados de errores mayores para pruebas similares a las de la norma ASME.

Otra conclusión que se ha obtenido de la comparación de las normas es que cuanto mayores son las distancias a medir, mayores son los errores. Esto se debe a que el brazo requiere un movimiento más complejo y con más posiciones de las articulaciones.

Finalmente, se debe considerar que la comparativa llevada a cabo en el presente proyecto no está regulada mediante ninguna normativa, y a la cual hay que dar la validez que se le debe dar a cualquier comparación de tal calibre. Es posible que no tenga la fiabilidad que nos proporcionaría un ensayo R&R para medir la repetibilidad y reproducibilidad, pero nos da una idea de cómo se podría llevar a cabo tal normalización y de los resultados que se obtendrían.



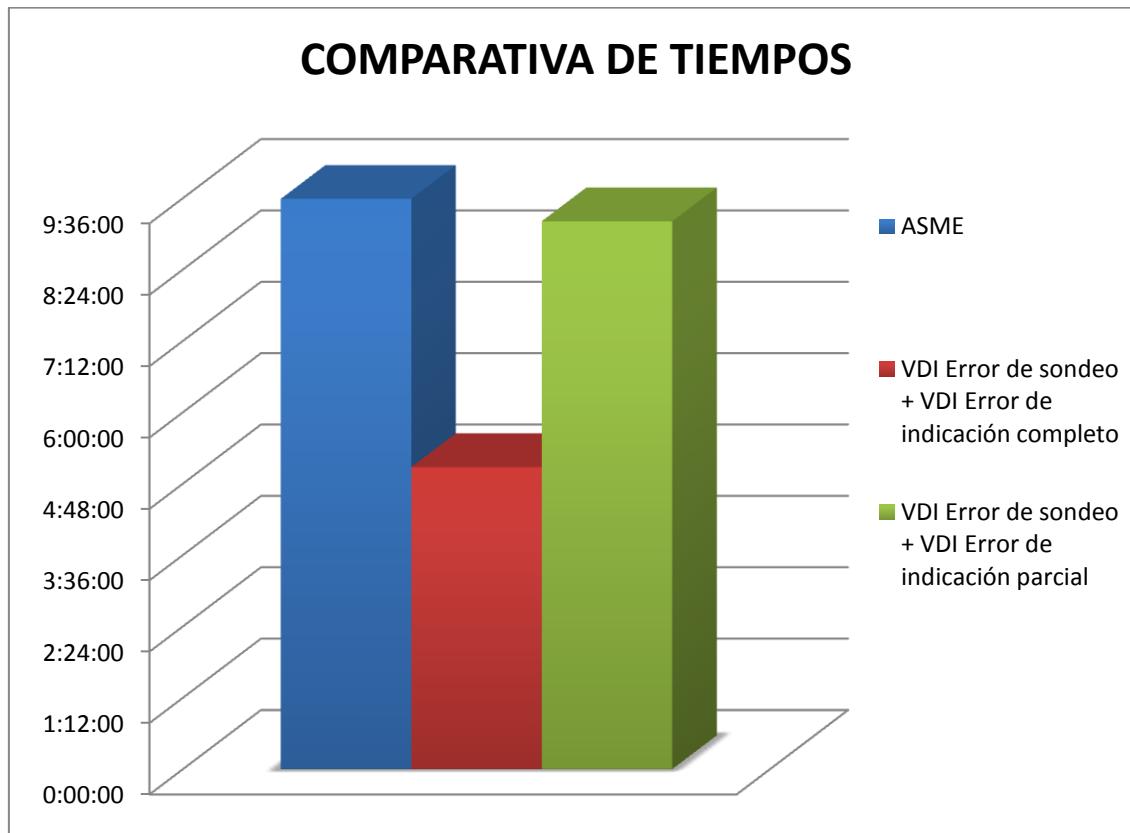
TIEMPOS TOTALES DE LAS DOS NORMAS, TENIENDO EN CUENTA LA PREPARACIÓN:

NORMA	TIEMPO TOTAL
ASME	9 horas 35 minutos 17 segundos
VDI	12 horas 10 minutos 0 segundos

PRUEBA ASME	TIEMPO
SPAT	1:16:40
Diámetro Efectivo	0:24:52
Precisión Volumétrica	7:53:45
TOTAL	9:35:17

PRUEBA VDI	TIEMPO
Error de sondeo	2:07:20
Error de indicación completa	2:57:20
Error de indicación parcial	7:05:20
TOTAL	12:10:00

ASME	9 horas 35 minutos 17 segundos
VDI Error de sondeo + VDI Error de indicación completa	5 horas 4 minutos 40 segundos
VDI Error de sondeo + VDI Error de indicación parcial	9 horas 12 minutos





CONCLUSIONES DE LA COMPARATIVA DE LOS TIEMPOS TOTALES DE AMBAS NORMAS:

En la comparación de tiempos se han equiparado los tiempos totales de todas las pruebas de la normativa ASME con dos casos de la VDI: por una parte la prueba de Error de sondeo sumando los tiempos de la prueba de Error de indicación de Volumen parcial; y por otro lado sumándole a la de Error de sondeo la del Volumen completo. Esto se ha relacionado así debido a que las pruebas de volúmenes son similares (parcial y completa) a la volumétrica de la ASME y también son parecidas entre sí, digamos que se basan en las mismas características, tan solo difiriendo en que una de ellas se divide en pequeños volúmenes y la otra cuenta con el volumen total.

Se puede observar, que los tiempos de ASME y de VDI (con volumen completo) son muy similares (en el rango de las 9-10 horas) y, en cambio, la VDI (con volumen parcial) requiere la mitad del tiempo (unas 5 horas), esto se debe a que para el volumen parcial se deben medir más posiciones que para el volumen completo, y esto requiere de mayor tiempo. Por esto en cuanto a duración se refiere, ambas pruebas son similares teniendo en cuenta estos parámetros.

Si nos detenemos en el análisis de los tiempos totales de ambas pruebas, se debe tener en cuenta que los tiempos que se incluyen son los referidos a la calibración de los instrumentos, la toma de medidas, la copia de datos y el posicionamiento de los aparatos. Con lo cual, la duración de las acciones realizadas tales como la exportación y el tratamiento de datos, o el cálculo de los errores y desviaciones como resultado de las pruebas, no se tienen en cuenta en estos tiempos totales debido a que se pueden considerar externos al tiempo de realización de las pruebas expuestas por las normas.



ANEXO E. CERTIFICADO BARRA PATRÓN DE ESFERAS

 ENAC CALIBRACIÓN Nº 115/LC289	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN <i>Certificate of Calibration</i> Número U20279 <i>Number</i> Página <u>1</u> de <u>3</u> páginas <i>Page</i> <u>1</u> of <u>3</u> 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 <i>Item</i>	BARRA DE ESFERAS	
MARCA <i>Mark</i>	UNIMETRIK	
MODELO <i>Model</i>	-	
IDENTIFICACION <i>Identification</i>	UMTK1605	
SOLICITANTE <i>Applicant</i>	UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA Dpto.Ingeniería, Diseño y Fabricación.C/ María de Luna 3 50018 ZARAGOZA (Zaragoza)	
FECHA/S DE CALIBRACIÓN <u>1 de julio de 2004</u> <i>Date/s of calibration</i>		
Signatario/s autorizado/s <i>Authorized signatory/ies</i>	Técnico de laboratorio	Fecha de emisión <i>Date of issue</i>
		<u>1 de julio de 2004</u>
Jesús Albéniz Puelles Dror. 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.		
<i>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.</i>		



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



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.



ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE
BARRA DE ESFERAS

Número: U20279

Hoja: 3 de 3

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:

$$U = (1.00 \pm 0.001 L) \mu\text{m} \quad (L \text{ en mm})$$

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:





ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN DE
BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
NORMA ASME B89.4.22-2004



ANEXO DE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
BARRA DE ESFERAS

Número: U20279

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: