

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO DE UN BRAZO ARTICULADO POR COORDENADAS

The seal of the University of Sonora is a circular emblem. It features a central shield with a lamp of knowledge on the left and an open book on the right. Below these is a banner with the motto "TODO · LO · ILUMINAN". The shield is flanked by two figures, and the entire emblem is surrounded by a wreath. The words "UNIVERSIDAD DE SONORA" are inscribed around the perimeter of the seal, and the year "1942" is at the bottom.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

RICARDO OLIVARRÍA ROGEL

Repositorio Institucional UNISON



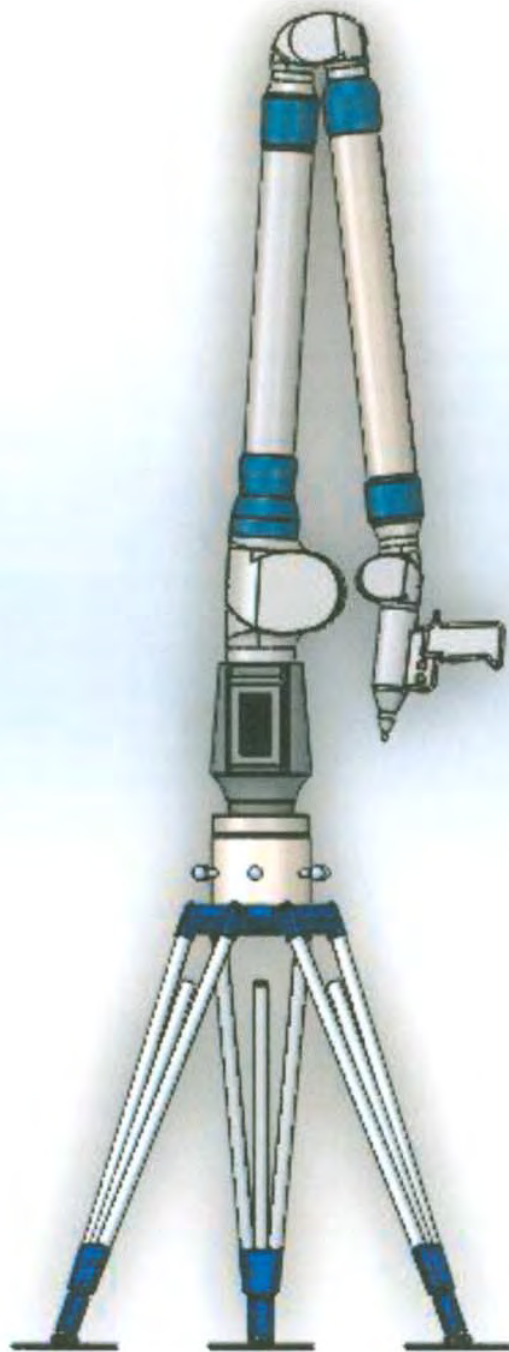
**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

INDICE

RESUMEN	5
Capítulo 1 - Introducción	6
1.1 - Alcance de tesis	6
1.2 - Objetivo de la tesis	6
Capítulo 2 – Estado del arte	7
2.1 - Introducción	7
2.2 – Equipos portátiles de medición por coordenadas usados en la industria	10
2.3 – Procedimientos de verificación norma ASME B89.4.22 & VDI	15
2.3.1 – Prueba de diámetro efectivo	17
2.3.2 – Prueba de punto único	17
2.3.3 – Prueba de rendimiento volumétrico	19
2.3.4 – Recomendación VDI-VDE	21
Capítulo 3 – Modelado cinemático de Denavit & Hartenberg	23
3.1 - Introducción	23
3.2 – Procedimiento de calibración y verificación de brazos articulados de medir por coordenadas.....	28
3.3 – Procedimiento de captura de datos para verificación del brazo.....	33
3.4 – Análisis de resultados.....	41
Capítulo 4 – Conclusiones y trabajo futuro	56
4.1 - Conclusiones	56
4.2 – Trabajos futuros	57
Bibliografía	58
Anexos	59



RESUMEN

El presente proyecto surge a partir de la necesidad de ampliar el campo de investigación del Centro de Asistencia Metrológica (CAM) de la Universidad de Sonora. En la actualidad el CAM cuenta con dos brazos articulados de medir por coordenadas (CAM), pero no se cuenta con la información o el suficiente personal capacitado para hacer uso del servicio que podría ofrecer un brazo articulado, conocer los procedimientos para hacer una verificación del brazo con un certificado de calibración y logrando así poder corregir aquellos errores encontrados en brazos que se estudien en un futuro, llevando a extender el campo de conocimiento en relación a los nuevos instrumentos para medir por coordenadas que hoy en día son los brazos para medir por coordenadas.

En este trabajo de tesis de licenciatura se tomó como referencia la prueba de rendimiento volumétrico de un BAMC sugerido por la norma ASME B89.4.22 de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers) por sus siglas en inglés (Figura 0.0.0.). Se decidió utilizar esta norma por ser la que mejor evalúa el error de medición de un brazo en situaciones de uso de operación normal. Esta norma recopila toda la experiencia acumulada en la realización de procedimientos de evaluación propia de cada fabricante logrando juntarse los procedimientos que han de seguirse para la realización de dicha prueba. La ASME B.89.4.22 fue creada en el año 2004 con el propósito de servir como guía para determinar si un brazo articulado de medida cumple con los requerimientos metrológicos de un usuario y decidir su adquisición o su utilización dentro de los procesos de fabricación. La norma ASME B89.4.22 es considerada internacionalmente una norma aceptada para las distintas pruebas de evaluación de los brazos de medida. En la Figura 0.0.0 se muestra la estructura de trabajo para el procedimiento de rendimiento volumétrico.



Figura 0.0.0 Prueba de rendimiento volumétrico.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1 ALCANCE DE TESIS

La verificación volumétrica del brazo nos permitirá conocer su precisión y error volumétrico en todo su volumen de trabajo y compararlo con el error máximo permitido (MPE, por sus siglas en inglés) provisto por fabricante para determinar la confiabilidad al realizar mediciones con el BAMC. Además, este trabajo servirá como precedente para posibles colaboraciones con empresas que utilizan éste tipo de brazos, en la verificación de sus equipos o en el estudio de modelos de optimización de parámetros geométricos.

Finalmente, la verificación del brazo permitirá al CAM expandir los servicios de medición que actualmente puede ofrecer, demostrando los diversos equipos y diversos métodos de medición con los que se cuentan para proporcionar los servicios que pudieran ser requeridos.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

Este proyecto tiene como objetivo principal la verificación de un brazo de medición por coordenadas mediante la norma ASME B89.4.22, tomando como referencia la prueba de rendimiento volumétrico, obteniendo como fin:

- Evaluar el error total de trabajo de un BAMC en todo su volumen de trabajo.
- Conocer el procedimiento de la prueba de rendimiento volumétrico para un brazo.
- Demostrar el procedimiento de medición de trabajo del el brazo.
- Lograr una comparación entre los resultados obtenidos contra los dichos por el fabricante.

Además este proyecto permitirá explorar nuevas líneas de investigación en el Departamento de Ingeniería Industrial dentro del área de sistemas de medición por coordenadas portátiles. Finalmente, la cuantificación del error volumétrico del BAMC permitirá al CAM ampliar su oferta de servicios de medición a las industrias de la región, tales como la aeroespacial, automotriz, energías renovables, entre otras.

CAPÍTULO 2.- ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el uso de brazos de medición por coordenadas se ha incrementado de una manera espontánea, debido a su gran característica de ser más portable y tener una gran flexibilidad para tomar datos de coordenadas a diferencia de una máquina de medición por coordenadas (CMM), siendo el brazo más eficaz para la toma de mediciones en zonas de mayor complejidad. En la actualidad debido a sus bajos costos y las características mencionadas anteriormente los brazos de medición por coordenadas se han convertido en una alternativa como sistema medición dentro de la industria.[1]

El gran campo de trabajo de los BAMC ha ido aumentando con el paso del tiempo debido a las mejoras de sus prestaciones, como por ejemplo en la industria aeroespacial y aeronáutica, donde se le da un uso para mediciones de piezas o componentes con ciertas características de gran tamaño, además el uso dentro de líneas de producción para la verificación de tolerancias para la garantía de un trabajo bien realizado. En la industria suelen usarse de manera constante donde las condiciones ambientales no son las deseadas, por esta razón se recomienda realizar verificaciones y calibraciones del brazo de manera periódica.

Siendo la Universidad de Sonora un campus con un centro de asistencia metrológica acreditado para dar servicios de medición a las empresas, el presente trabajo permitirá ofrecer el servicio de verificación y calibración de brazos de medición por coordenadas y expandir las líneas de investigación dentro del área de la metrología.

En este capítulo se presentarán algunos de los equipos de medición usados actualmente en la industria así como también sus aplicaciones. A sí mismo los procedimientos de verificación del brazo con la norma ASME B89.4.22 y la VDI 2617_parte 9, logrando entender similitudes y diferencias entre ambos procedimientos.

El proyecto de tesis que se describe a continuación ha sido realizado por Ricardo Olivarría Rogel en colaboración con el departamento de metrología y el centro de atención metrológica (CAM), ubicado en la Universidad de Sonora. Este proyecto ha sido dirigido por el Dr. Agustín Brau Ávila.

El brazo utilizado para esta tesis de licenciatura es un brazo de la marca Faro (Figura 2.1.1) con las siguientes características metrológicas:

- Modelo: Brazo Faro Fusión de 7 articulaciones.
- Volumen de trabajo esférico de 1.8m a 3.7m (6 pies a 12 pies)
- Repetibilidad de punto único de 0.036 mm (0.0014 pulgadas) a 0.104 mm (0.0041 pulgadas)
- Certificado con la prueba de rendimiento punto único en relación a la norma ASME B89.4.22



Figura 2.1.1 Brazo de medición por coordenadas modelo Faro Fusión.

Para el desarrollo del ensayo de verificación de rendimiento volumétrico además de utilizar el brazo anteriormente mencionado fue indispensable el uso de una barra patrón de esferas (Figura 2.1.2), con las siguientes características:

- Marca: ISM 01-14-08-2014 WYZD
- Modelo: Escalón 1950 mm, 74 mm ancho, 15 esferas
- Fecha de calibración: 13/08/2014

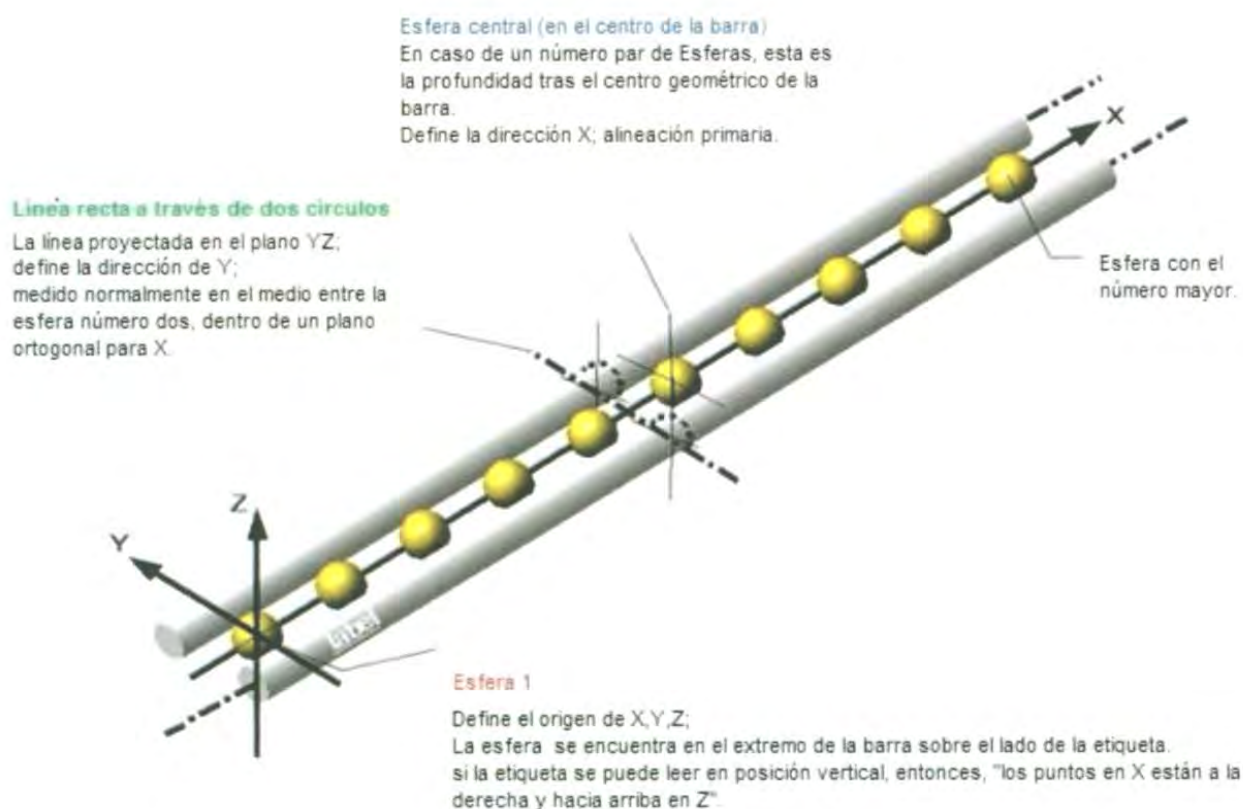


Figura 2.1.2 Barra de patrón de esferas.

2.2 EQUIPOS PORTÁTILES DE MEDICIÓN POR COORDENADAS USADOS EN LA INDUSTRIA

Como se ha mencionado anteriormente los brazos de medición por coordenada cada vez son más utilizados en la industria y dando a conocer su manera de trabajar y la facilidad que brindan a la industria para la optimización de trabajos, obteniendo trabajos más eficientes y reduciendo los problemas que puedan surgir a futuros.

Dentro del campo de equipos portátiles de medición por coordenadas se cuenta con algunos tipos de modelos los cuales se utilizarán dependiendo de la necesidad que pueda surgir en el momento.

Láser Tracker

El láser tracker (LT) es un dispositivo de medición por coordenadas portátil el cual es extremadamente preciso y optimizar procesos como por ejemplo de alineación dentro de la industria aeroespacial mediante una medición rápida, sencilla y precisa para el ahorro de costos y mejoras de la calidad. (Figura 2.2.1)



Figura 2.2.1 Láser Tracker

El (LT) utiliza un rayo láser para medir en 3D las coordenadas de grandes componentes, equipos y máquinas con la ayuda de un retroreflector esférico (SMR, por sus siglas en inglés). Comúnmente el LT tiene un volumen de medición de 110 m y utiliza transmisores de ángulo de rotación de alta precisión para la medición de puntos 3D en tiempo real.

Un equipo LT está compuesto por interferómetro láser, divisor de haz, sistema de espejos de seguimiento, retroreflector, sensor de posición y una unidad de control. El funcionamiento se basa en un rayo láser emitido por el interferómetro que se divide en dos al encontrarse en un divisor de haz (Figura 2.2.2).

Uno de los rayos se dirige al receptor, mientras que la otra atraviesa el divisor de haz direccionándose mediante un mecanismo de espejos que tiene como fin llegar al retroreflector y reflejándose de regreso hacia el receptor. Si el reflector cambia de posición, se produce una variación de frecuencia y el consecuente desplazamiento relativo puede ser cuantificado.

Parte del rayo reflejado se direcciona a un PSD para obtener una medición del posible offset del rayo reflejado. El offset se usa para controlar el ángulo de tracking del espejo asegurando que el rayo incide en el centro óptico del retroreflector. En caso de que el láser tocara el autoreflector fuera del centro, el rayo incidiría fuera del centro del PSD, esto ocasionaría una señal de salida que es utilizada por la unidad de control del motor. A través de un algoritmo de control se controla la rotación de los dos ejes mecánicos del sistema de espejos de seguimiento, de tal manera que el rayo láser de medición siempre se encuentre centrado en el retroreflector mientras este se mueve en el espacio.[2]

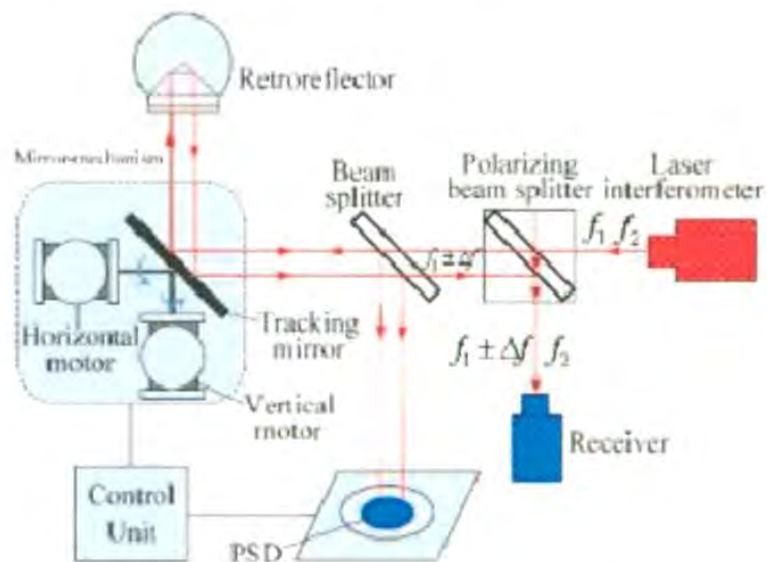


Figura 2.2.2 Principio de funcionamiento y componentes de un láser tracker.

La ampliación o automatización del sistema con escáneres guiados manualmente, palpadores inalámbricos o aplicaciones robóticas abren un enorme campo de aplicaciones, obteniendo mediciones veloces y altamente precisas que atribuyen directamente a la producción permitiendo un ahorro en los costes y mejoras en la calidad.

Brazo Articulado Por Coordenadas

El brazo articulado de medición por coordenadas es una máquina de medición portátil (mmc) que permite verificar fácilmente la calidad de productos llevando a cabo inspecciones 3D, certificaciones de herramientas, comparaciones CAD, análisis dimensionales entre otras. (Figura 2.2.3)



Figura 2.2.3 Brazo articulado por coordenadas.

Un (BAMC) 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.

Las articulaciones proporcionan más flexibilidad en el movimiento del brazo y suelen tener por lo menos tres articulaciones hombro, codo y muñeca, cada articulación permite que el brazo articulado se mueva en otra dirección. Por ejemplo; en dirección de arriba/abajo, izquierda/derecha y adelante/atrás.

Estas articulaciones dobles materializan giros entorno a ejes perpendiculares entre sí. Su naturaleza de operación manual hace que no se presenten configuraciones con articulaciones prismáticas debido que sería más complicada la manipulación del mismo, por lo que los brazos de medida que existen actualmente presentan configuraciones basadas en articulaciones giratorias.[1]

Los brazos articulados de medir por coordenadas (BAMC) se han dado a conocer espontáneamente debido a sus cualidades en sectores fuertes de la industria, de las cuales tenemos la industria aeroespacial, industria automotriz, industria de fabricación de metales y la industria de máquina herramienta y moldes. Como ya se mencionó, estas industrias utilizan actualmente brazos articulados para medir coordenadas debido a las grandes aplicaciones que estos pueden aportar tales como; análisis dimensional, control de calidad, inspección en el proceso, calibración de máquinas, alineación de piezas, verificación de piezas e ingeniería inversa.[1]

Análisis dimensional:

En el análisis de dimensional los brazos de medición por coordenadas son requeridos para la inspección y verificación de la exactitud y calidad de componentes que son usados para la industria a la que se asemeje. Muchos talleres de máquinas están equipados con máquinas de medición por coordenadas (CMM) portátiles, como brazos de medición y laser trackers. Estos cumplen con una variedad de necesidades de medición dimensional para asegurar que los productos terminados cumplen con las tolerancias requeridas por los clientes.[2]

Control de calidad:

Dentro de una industria tenemos prácticamente un sector que es el responsable del diseño de piezas o componentes para algún tipo de maquinado. El realizar dichos diseños conlleva la responsabilidad de satisfacer con las necesidades que la empresa necesita. Estos componentes al ser diseñados y maquinados deben pasar por algunas pruebas de control de calidad para demostrar si cumplen con los requisitos de diseño y especificaciones deseadas. Para una industria es esencial hacer una inspección detallada de una muestra previa a la producción para confirmar estos factores, los equipos de metrología portátiles, que incluyen brazos de medición y láser trackers, pueden capturar rápidamente la forma de la superficie de una pieza de un prototipo y las características geométricas, que se pueden comparar con datos nominales en un archivo CAD o usarse como registro digital para cumplir con los requisitos de documentación que pueda requerir en su momento la industria.[2]

Inspección en el proceso:

La mayoría de las industrias utilizan ayuda de empresas externas para apoyarse con algunos trabajos de maquinados, o bien algún componente nuevo que se adquiere para la solución a problemas. Para ambos casos no se puede asegurar que los componentes que se están obteniendo cuenten con las especificaciones deseadas, por tanto se tiene que lograr una identificación de las piezas para encontrar si existen algunos defectos en ellas por parte de los proveedores, esto es con el fin de establecer y mantener estrictas normas de calidad.

La implementación de un proceso integral de inspección en principio evita piezas defectuosas en el proceso de montaje, eliminando costosos desechos y el re-trabajo más tarde. La portabilidad de las herramientas de metrología como el BAMC, permite un trabajo eficiente en la línea de proceso de producción, proporcionando mediciones precisas o directamente sobre la máquina de producción de partes mediante la integración de las MMC portátiles. En el proceso de inspección de recepción, los operadores tienen una forma rápida y eficiente para determinar si estas partes cumplen con las especificaciones y requisitos de diseño para evaluar la conformidad de las piezas recibidas.[1]

Calibración de componentes

En una industria al contar con ciertos componentes para lograr obtener un trabajo óptimo, los componentes deben encontrarse en perfectas condiciones de fabricación siendo la más importante que cumpla con las características superficiales esperadas. El obtener un componente que no cumpla con ciertas características produce un retroceso en el proceso de trabajo dentro de la industria. Las piezas que se encuentran por fuera de una tolerancia en específico con frecuencia son el resultado de una máquina mal calibrada y por consecuencia esto produce un retroceso en el trabajo e incremento en los costos de producción.

Utilizando dispositivos de medición de coordenadas portátiles para la realización de controles rápidos de la calibración de las máquinas, los operadores pueden realizar una prueba completa de precisión volumétrica con un mínimo tiempo de configuración e identificar rápidamente errores de calibración, de este modo se logra obtener una optimización de la producción de piezas, reduciendo el tiempo de inactividad.[3]

Alineación de máquinas:

Las desalineaciones en una máquina pueden provocar tiempo de inactividad en ellas mismas y así reducir de manera significativa su rendimiento. Sin embargo, los dispositivos de medición por coordenadas portátiles, como láser tracker y brazos de medición, pueden ayudar a encontrar estos problemas.

El láser tracker es ideal para muchas tareas, como la alineación de herramientas maquinadas, rodillos y prensas, plantillas y accesorios, o la alineación de CMM. Este método preciso y rápido reduce el tiempo de inactividad, mejora la calidad y genera un análisis de tendencia adecuado de la distorsión y otros cambios en el funcionamiento de una máquina.[2]

Para tareas de menor escala, como la alineación en las máquinas, el brazo de medición por coordenadas es una solución ideal para complementar el trabajo del láser tracker.

Ingeniería inversa:

La ingeniería inversa consiste en tomar como referencia algo ya existente, desarmarlo, experimentar, ingeniar e inventar alguna mejora para este objeto que se está considerando mejorar, con el fin de tener la misma funcionalidad pero con mejores opciones de uso u mejor desarrollo tecnológico de cómo se encuentra creado.

La ingeniería inversa reconstruye diseños clásicos e implementa diseños nuevos haciéndolo por un método habitual que hoy en día es popular el cual es el modelaje en 3D de una pieza en CAD, generando documentación perdida o inexistente de diseños y actualizar o crear documentación conforme a la obra.

Con el Láser tracker 3D sin contacto, los equipos portátiles de captura de Figuras integran los procesos de modelado 3D en un solo paso. Pueden ofrecer simulaciones virtuales de interiores de automóviles, agilizar la creación de prototipos e inspeccionar superficies en ensamblajes aeroespaciales.

También es posible realizar tareas de ingeniería inversa con un BAMC, al cual se le puede adaptar un láser escáner que se ajusta al brazo (Figura 2.2.4). El operador puede medir de forma precisa las características geométricas con el palpador y después escanear áreas de las que se precisen mayor cantidad de puntos, el láser escáner permite una rápida y efectiva inspección en piezas y superficies complejas. Con el láser escáner podemos obtener inspecciones fácilmente de superficies blandas, deformables y hasta formas complejas, así mismo es fácil obtener la conversión de objetos cotidianos en modelos digitales.[1]



Figura 2.2.4 Láser escáner ajustado a un brazo articulado.

2.3 PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN NORMA ASME B89.4.22 & VDI

En la actualidad existen dos documentos internacionalmente aceptados para el establecimiento de las pruebas para llevar a cabo en procedimiento de verificación de brazos articulados por coordenadas; dichos documentos son la norma ASME B89.4.22 y la recomendación alemana técnica VDI-VDE 2617_parte 9, por ello cada una de estos documentos cuentan con diferentes métodos o pruebas para evaluar las mismas características de un brazo articulado por coordenadas.

La presente tesis de licenciatura está basada en la norma ASME B89.4.22, la cual sugiere la realización de distintas pruebas para llevar a cabo la evaluación de las características metrológicas de los brazos de medición por coordenadas.

Antes realizar la verificación de un brazo articulado por coordenadas se hacía referente a distintas normas siendo así; diferentes métodos de verificación para un BAMC. Contando con lo anterior era difícil una comparación entre brazos evaluados con distintas normas, por ello para estandarizar los resultados de métodos de verificación se publicó en el 2004 la única norma existente en el campo de verificación de brazos articulados por coordenadas (ASME B.89.4.22).

La norma ASME B89.4.22 es una norma elaborada por el comité de trabajo de metrología de la ASME (American Society of Mechanical Engineers) formado por especialistas del sector industrial, investigadores en el área de la metrología dimensional y de los principales fabricantes de brazos articulados. La norma obtiene la experiencia y conocimientos acumulados en los procedimientos de verificación propios de cada fabricante, recomendando los procedimientos que han de seguirse para una evaluación confiable del comportamiento del brazo de medición por coordenadas [4].

Esta norma se refiere a la evaluación de máquinas de medición de coordenadas de brazo articulado mediante las definiciones de cada fabricante y los procedimientos de pruebas. Estos procedimientos deben permitir a los usuarios determinar si una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado es apta para trabajar con sus requerimientos específicos. También debe proporcionar una información precisa de comparación de máquinas de diferentes fabricantes y proporcionar una determinación de si una máquina de medición por coordenadas (en este caso un brazo) cumple con los requisitos contractuales sin negociaciones después de que la máquina sea comprada.

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

En resumen, la ASME B.89.4.22 propone tres pruebas de evaluación diferentes para determinar si un BAMC cumple con los requerimientos metrológicos especificados por el fabricante. Estos se enlistan a continuación:

- Prueba de diámetro efectivo.
- Prueba de articulación de punto único, de repetibilidad de punto o de cono.
- Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico.

2.3.1 Prueba de diámetro efectivo:

Esta prueba consiste en medir una esfera calibrada de aproximadamente un diámetro de 10 y 50 mm, la cual se posiciona a la mitad del alcance máximo del brazo de medición por coordenadas, logrando así medir la esfera tres veces en la misma posición. Las mediciones que se deben realizar consisten en nueve puntos sobre el hemisferio superior de la esfera, cuatro puntos sobre el ecuador, cuatro puntos a 45° y girados 45° con respecto a los puntos tomados sobre el ecuador y finalmente un punto tomado en algún polo de la esfera. Dichos puntos mencionados anteriormente corresponden a una medición y para esta prueba debe repetirse tres veces la medición de estos puntos.

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

2.3.2 Prueba de punto único:

La prueba consiste en hacer la medición del mismo punto posicionando el brazo en diferentes orientaciones, exigiendo diferentes acomodos de las articulaciones del brazo así como los diferentes ángulos que puede tomar el brazo con el fin de lograr tomar el mismo punto medido.

Al realizar este método con el brazo de medición por coordenadas arrojará la capacidad con la que cuentan los elementos del brazo, verificando la capacidad de repetir las mismas coordenadas de un punto fijo en el espacio que dada la configuración cinemática del brazo se considerará su repetibilidad. Para conseguir un mayor número de orientaciones para la prueba de punto único, se utilizan como mínimo tres puntos donde se someterán las mediciones de un punto a diferentes orientaciones de un brazo de medición por coordenadas.

(Figura 2.3.2.1)

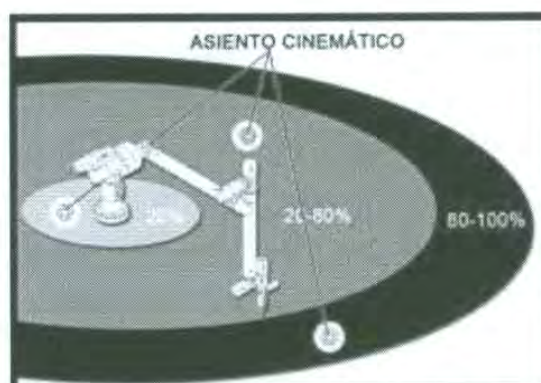


Figura 2.3.2.1 Localización de asiento cinemático para la prueba de punto único.

Normalmente cuando se someten a pruebas de mediciones es difícil determinar un mínimo de posiciones para la realización de las orientaciones de medida para la prueba de punto único. 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.

Anteriormente en la figura 2.3.2.1 se muestran tres asientos donde se someterán a prueba de punto único, logrando apreciar una escala de grises en la que se observa la primera, segunda y correspondientemente en color negro la tercera posición obteniendo en cada asiento cinemático una longitud diferente de la posición inicial del brazo.

El ensayo se realiza materializando el punto fijo a medir mediante asientos cinemáticos. El objeto de estos asientos es mantener el contacto entre el asiento y la esfera del palpador que se encuentra 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.

La primera posición para el asiento cinemático debe encontrarse en un radio con respecto a la posición del brazo dentro del 20% de su longitud, la segunda posición variando entre el 20% y el 80% de su longitud dejando la tercera posición el restante del porcentaje de los puntos anteriores. En la Figura 2.3.2.2 podemos apreciar los distintos asientos cinemáticos considerando los porcentajes ya antes mencionados.

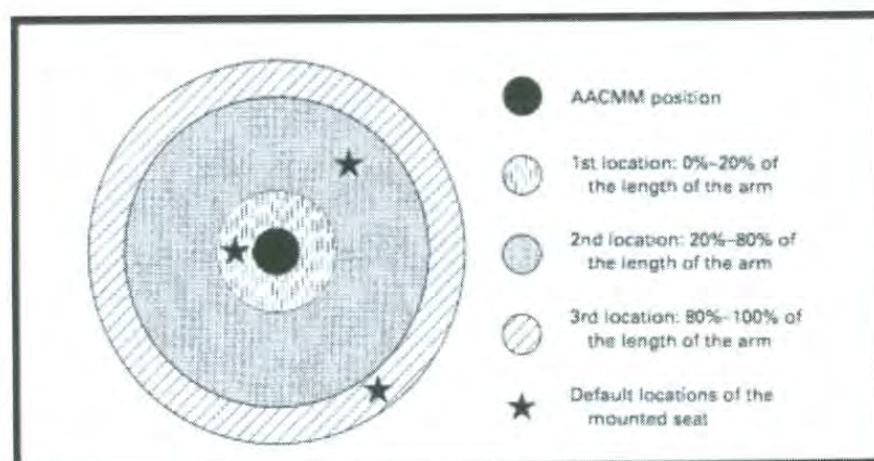


Figura 2.3.2.2 Posiciones de asientos cinemáticos. (Visto desde arriba)

Los procedimientos normalizados recomiendan hacer diez posiciones del brazo para cada uno de los tres puntos encontrados en la prueba, tratando de buscar la máxima variación en sus 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.

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.

2.3.3 Prueba de rendimiento volumétrico:

La tercera prueba en la que consiste la norma ASME B89.4.22 es la prueba de rendimiento volumétrico del brazo, siendo esta la prueba que se utilizó para el trabajo de tesis de licenciatura, logrando hacer una comparación entre lo medido con el brazo y el máximo error permitido provisto por el fabricante. El brazo se sometió a una verificación volumétrica con ayuda de un patrón calibrado (siendo utilizada una barra de esferas). (Véase anteriormente Figura 2.1.2)

La prueba consiste en medir distancias materializadas de la barra patrón, la cual se coloca en distintas orientaciones con el propósito de cubrir el mayor volumen de trabajo posible del brazo. 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 2.3.3.1)

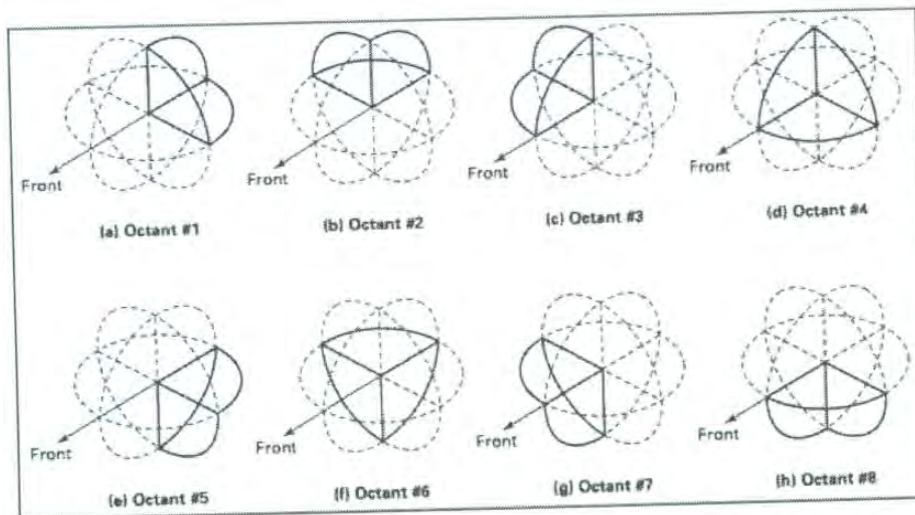


Figura 2.3.3.1 Esquema de los octantes de un brazo en todo su volumen.

La barra de esferas debe ser posicionada horizontalmente, verticalmente 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 en los que se encuentra trabajando, 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.

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 [1].

Para cada una de las posiciones medidas del brazo con respecto a cada patrón calibrado se obtendrá el error medido en distancias, que hace referencia a una diferencia entre la distancia medida y la calibrada.

De forma más simplificada con esta prueba encontraremos 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.

$$D_i = L_i - L_{col}$$

Desviación según ensayo de precisión volumétrica

(Ec. 2.1)

$$2RMS = 2\sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}$$

Desviación media según ensayo de precisión volumétrica

(Ec 2.2)

2.3.4 Recomendación VDI-VDE

La recomendación VDI-VDE 2617 [5] establece un solo test para la evaluación con el nombre de “Ensayo de error de palpado”. En el caso de la norma ASME B89.4.22, comparativamente se realizan dos test para la verificación de las mismas características, por un lado el “Rendimiento de diámetro efectivo” y por otro el “Prueba de punto único” mediante la medición de una esfera patrón situada en tres posiciones del volumen de medida del brazo definidas en distancia al origen y altura respecto al nivel cero del brazo, la recomendación VDI evalúa el error máximo permitido en mediciones de tamaño, forma y posición.

En un ensayo de error de palpado, el cual se realiza en la recomendación VDI-VDE 2617 especifica claramente el procedimiento a seguir con tres posiciones de la esfera que debe ser medida 5 veces con diferentes orientaciones de palpado definidas. La evaluación del error se basa en determinar el centro de la esfera mediante las diferentes orientaciones definidas. En cada posición se evalúa la distancia máxima entre todas las posibles distancias entre los cinco centros obtenidos, siendo el valor máximo obtenido para las tres posiciones de la esfera el considerado como error característico en esta evaluación [6].

Desde un punto de vista general, la segunda parte de estos estándares define un procedimiento basado en la colocación de un patrón de longitud en distintas posiciones y orientaciones a lo largo del volumen de medida del equipo para explorar su precisión en mediciones de longitud. En el caso de ASME, se definen 20 posiciones distribuidas en el volumen y organizadas por octantes y dos longitudes patrón (corta y larga), de modo que en varias posiciones definidas se mide una de ellas y en las demás la otra. Mientras que la norma ASME define un único test con indicaciones de las longitudes del patrón, la VDI define dos test en función de la longitud del patrón de longitud disponible. En caso de que el patrón cubra el porcentaje definido para todo el volumen, la VDI define el test para todo el volumen del brazo (7 posiciones del patrón) y en caso contrario, es posible la realización de test parciales independientes con el patrón disponible en cada cuadrante por separado (3 posiciones ortogonales por cuadrante), lo que permite desarrollar el test sin la necesidad de poseer patrones de longitud dedicados. Además, también da la posibilidad de enlazar distintas posiciones del patrón para materializar mediciones a lo largo del mismo diámetro del volumen de medida. En cuanto a mediciones a realizar en cada posición, la norma ASME define una repetición por cada posición del patrón, en una longitud por posición. Mientras tanto, la VDI especifica que se deben medir cinco longitudes por posición del patrón, con tres repeticiones cada una, independientemente de si se trata del test para el volumen completo o para volúmenes parciales, lo que a priori resulta más adecuado a la hora de reflejar en los resultados la influencia del operario [6].

CAPÍTULO 3.- MODELADO CINEMÁTICO DE DENAVID & HARTENBERG

3.1 INTRODUCCIÓN

Los brazos de medición por coordenadas tienen una gran similitud con los brazos robots que se usan actualmente en la industria y en algunos campos de investigación. Debido a estas grandes similitudes de funcionamiento el modelado matemático de los brazos de medición se ha basado en los modelados usados actualmente para los brazos robóticos. De esta manera, en los brazos de medición por coordenadas podemos definir las anteriores relaciones del sistema de la siguiente forma en que lo define el autor Dr. Agustín Brau "una relación matemática sistemática entre todas y cada una de las articulaciones que forman su estructura y la posición y orientación del palpador" [1].

Este modelo constituye un estudio analítico de geometría del movimiento del brazo de medir por coordenadas basado en colocar sucesivos sistemas de referencia en las articulaciones del brazo siguiendo una serie de reglas ya definidas mediante una combinación de parámetros geométricos, de modo que sea posible encontrar la posición y orientación del palpador en el extremo del brazo (para cualquiera de sus articulaciones), con respecto al sistema de referencia global del brazo de medida. Las relaciones locales entre dos sistemas de referencia sucesivos se representan mediante matrices de giro y traslación que expresan estas relaciones geométricas en función de variables que permiten describir cualquier cambio en la posición y orientación del palpador. Con ello, las entradas del modelo matemático son por un lado variables que describen la geometría del brazo y por otro los ángulos girados por cada articulación en cada momento, de modo que para cada valor con estas variables es posible determinar la relación entre la posición y orientación del palpador y el sistema de referencia global del brazo de medida.

Uno de los métodos más utilizados para representar la geometría espacial de mecanismos con varios grados de libertad en un sistema de referencia fijo es el propuesto por Denavit & Hartenberg [7]. El modelo es habitualmente usado en el modelado cinemático de brazos robóticos o brazos articulados de medición por coordenadas para determinar la relación entre sus sistemas de referencia partiendo de sus características geométricas.

Al momento de resolver el método de Denavit & Hartenberg, cada una de las articulaciones y elementos del brazo de medida del sistema se pueden representar por medio de los siguientes cuatro parámetros geométricos: d_i, a_i, θ_i y α_i . En la Figura 3.1.1 se representan dichos parámetros geométricos.

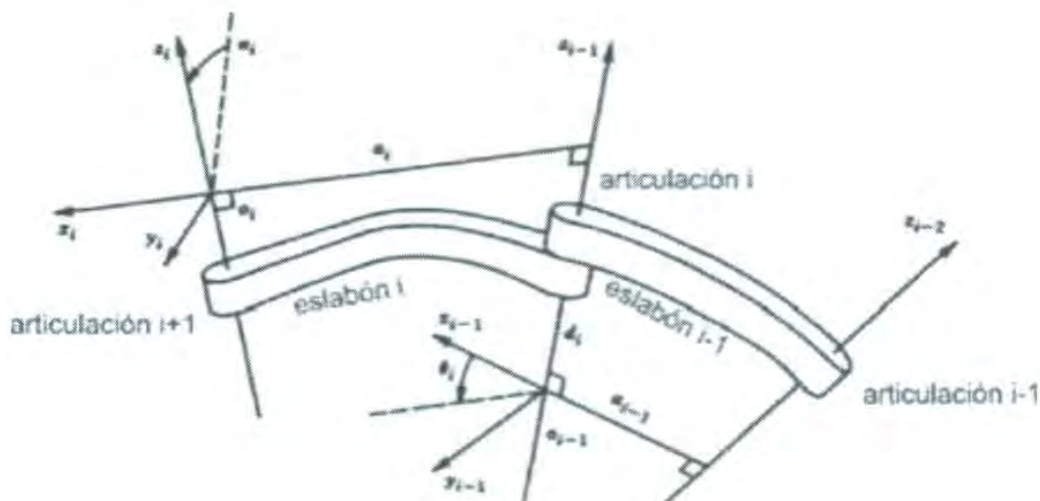


Figura 3.1.1 Representación de parámetros geométricos.

- Los parámetros d_i, a_i hacen referencia a dimensiones longitudinales en el sistema de referencias sucesivos.
- Los parámetros θ_i y α_i representan los ángulos de giro del sistema.

Una vez determinado los cuatro parámetros anteriormente señalados, podemos obtener una relación geométrica de los mismos usando una matriz de transformación homogénea 4x4.

$$\begin{pmatrix} Rot_i & Trasl_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (Ec. 3.1)$$

El término Rot_i representa una matriz de giro 3x3 con las componentes de los vectores unitarios del sistema de referencia i con respecto al sistema de referencia $i-1$, el término $Trasl_i$ representa un vector de traslación 3x1 desde el origen del sistema i al sistema de referencia $i-1$, "0" es un vector de dimensión 1x3 cuyas componentes son cero en el modelado de un brazo de medida y permite realizar una transformación de perspectiva de los puntos; y el último elemento "1" de la diagonal principal es un factor de escala.

En el método de D-H se presenta un procedimiento general donde se determinan los parámetros geométricos iniciales del modelo cinemático del brazo de medida fijando un sistema de referencia en cada una de las articulaciones del brazo. Estos sistemas de referencia se relacionan entre sí por medio de matrices de transformación homogéneas, como la descrita en la ecuación 3.1. De este modo, mediante la multiplicación de las matrices obtenidas se obtiene una matriz global para cada posición del brazo dependiente de los cuatro parámetros geométricos, que permitirá obtener en el sistema de referencia global las coordenadas de un punto definido por la esfera del palpador del brazo de medida respecto al último sistema de referencia [1], [7].

Para definir la cadena de transformaciones completa, en los ejes de articulación de cada elemento se establece un sistema de coordenadas cartesianas orto-normal (x_0, y_0, z_0) , más el sistema de coordenadas de la base. Cuando el elemento i se mueve respecto al $i-1$, el sistema de coordenadas i ésimo se mueve junto con el elemento i . Las coordenadas de la base se definen como el sistema de coordenadas 0 (x_0, y_0, z_0) .

A continuación se enlistan los pasos para establecer un sistema de coordenadas orto-normales para cada articulación del brazo.

1. Localizar el sistema de coordenadas de la base: Establecer un sistema de coordenadas orto-normal dextrógiro (x_0, y_0, z_0) en la base soporte con el eje z_0 estando a lo largo del eje de movimiento de la articulación 1. Los ejes x_0 e y_0 se pueden establecer convenientemente y son normales al eje z_0 .
2. Inicializar y repetir: Para cada $i=1, \dots, n-1$, realizar los pasos 3 a 6.
3. Localizar los ejes de la articulación: Alinear el con el eje de movimiento de la articulación $i+1$.
4. Establecer el origen del sistema de coordenadas i ésimo; Localizar el origen del sistema de coordenadas i ésimo en la intersección de los ejes z_i y z_{i-1} ó en la intersección de las normales comunes entre los ejes z_i y z_{i-1} y el eje z_i .
5. Situar el eje x_i : Situar x_i normal al eje z_{i-1} ó a lo largo de la normal común entre los ejes z_i y z_{i-1} cuando son paralelos.
6. Situar el eje y_i : Asignar y_i para completar el sistema de coordenadas dextrógiro.

7. Obtener los parámetros de la articulación y del elemento: Para $i = 1, \dots, n$, realizar los pasos 8 a 11.

8. Hallar d_i : d_i es la distancia del origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i a lo largo del eje z_{i-1} .

9. Encontrar a_i : a_i es la distancia desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema de coordenadas i -ésimo a lo largo del eje x_i .

10. Hallar θ_i : θ_i es el ángulo de rotación desde el eje x_{i-1} hasta el eje x_i respecto del eje z_{i-1} .

11. Obtener α_i : α_i es el ángulo de rotación desde el eje z_{i-1} hasta el eje z_i respecto del eje x_i .

A continuación se describe de manera detallada el significado de los cuatro parámetros geométricos vistos anteriormente en el modelado cinemático de Denavit & Hartenberg.

- θ_i : Ángulo formado por los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} utilizando la regla de la mano derecha.
- d_i : Distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i .
- a_i : Distancia a lo largo del eje x_i , desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo para articulaciones giratorias. Si la articulación es prismática se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .
- α_i : Ángulo de separación del eje z_{i-1} y z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i utilizando la regla de la mano derecha.

Una vez establecido el sistema de coordenadas para cada elemento, se puede obtener una matriz de transformación homogénea que relacione el sistema de coordenadas i -ésimo con el sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo. De este modo, un punto P_i expresado en el sistema de coordenadas i -ésimo se puede expresar en el sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo como (P_{i-1}) realizando las transformaciones sucesivas representadas en la Ec.3.2.

Calculo de matrices logrando transformaciones sucesivas para expresar el sistema de coordenadas i -ésimo. (Ec.3.2)

$$A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.3.2})$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz calculada en la ecuación 3.2 se obtiene pre-multiplicando la matriz identidad por las matrices que representan giros o traslaciones en el sistema $(i-1)$ -ésimo (T_{zd} , $T_{z\theta}$) en el orden adecuado y post-multiplicándola por las que los representan en el sistema i -ésimo (T_{xa} , $T_{x\alpha}$). Utilizando la matriz ${}^{i-1}A_i$ se puede relacionar un punto P_i expresado en coordenadas con respecto al sistema i -ésimo con el mismo punto expresado con respecto al sistema $(i-1)$ -ésimo de la siguiente manera:

$$P_{i-1} = {}^{i-1}A_i \cdot P_i \quad (\text{Ec.3.3})$$

De esta forma la matriz homogénea 0T_n que especifica la localización del sistema de coordenadas n -ésimo con respecto al sistema de coordenadas de la base, es el producto en cadena de matrices de transformación de coordenadas sucesivas, ${}^{i-1}A_i$ y se expresa como:

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i, \quad (\text{Ec.3.4})$$

Donde n es el número de grados de libertad del brazo. Finalmente, utilizando la ecuación 3.4, se puede conocer la posición de un punto medido con el palpador del brazo de medida, $\bar{X}_{\text{palpador}}$, en el sistema de coordenadas de la base del brazo a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_{\text{brazo}} = {}^0T_n \cdot \bar{X}_{\text{palpador}} \quad (\text{Ec.3.5})$$

3.2 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE BRAZOS ARTICULADOS DE MEDIR POR COORDENADAS

El término “calibración” de algún instrumento de medición puede ser tratado como; un conjunto de técnicas a realizar para establecer una relación entre los valores obtenidos por el instrumento y los valores establecidos por un patrón trazable.

En el caso de los brazos articulados de medir por coordenadas, al obtener un procedimiento de calibración se exige un certificado de calibración donde se muestra la incertidumbre de error del equipo, obtenido de las pruebas de evaluación a las que se encontró sometido, mediante los procedimientos normalizados correspondientes. Siendo el objetivo de cualquier método existente de calibración minimizar los errores de obtención de coordenadas del extremo del brazo (en este caso el palpador).

Como se ha mencionado, el uso de los brazos de medición dentro de las industrias ha observado un gran incremento debido a sus características metrológicas y portabilidad. Por lo anterior, cada vez son más los investigadores que realizan investigaciones para mejorar la precisión y aumentar la rapidez en los procedimientos de evaluación en los brazos de medida. Los nuevos artículos relacionados a brazos articulados comienzan a abarcar nuevas propuestas para crear algoritmos para la identificación de parámetros así como también dispositivos que faciliten la identificación de parámetros, como la evaluación de la precisión de los brazos articulados de medición por coordenadas,[8]

Cabe mencionar que en esta tesis de licenciatura realizamos una verificación del brazo articulado y no una calibración. La diferencia que existe entre ambas es sencilla; La verificación o rendimiento volumétrico se lleva a cabo para conocer el error del brazo de medida en todo su volumen de trabajo y poder determinar la confiabilidad en las mediciones.

En una calibración se utilizan los resultados encontrados en la verificación para encontrar una relación matemática con el propósito de corregir el error en las mediciones asociadas al brazo de medida.

Se debe hacer una observación con respecto al concepto de calibración la cual corresponde solamente a una verificación oficial, certificando que las pruebas y los resultados obtenidos son confiables.

Al momento de realizar el proceso de calibración de un brazo de medida, se entrega un certificado donde se muestra el error de medición asociado al brazo. Por otro lado, si se desean corregir los errores del instrumento de medición, esto generaría un costo adicional.

Es importante entender lo anterior debido que dentro del sector industrial existe una confusión con respecto al concepto de calibración, entendiendo que por calibrar es corregir.

Entre los estudios orientados a desarrollar procedimientos novedosos para una mejor calibración y verificación de los brazos destacan algunos de los siguientes métodos. En [9] se presenta un método para estimar la incertidumbre de un brazo de medida utilizando un patrón tridimensional. Este patrón consiste en una placa con nueve esferas distribuidas uniformemente a diferentes alturas sobre la superficie metálica de la placa, el cual es medido con el brazo de medida en cinco posiciones y orientaciones con respecto al brazo como se muestra en la Figura 3.2.1 .

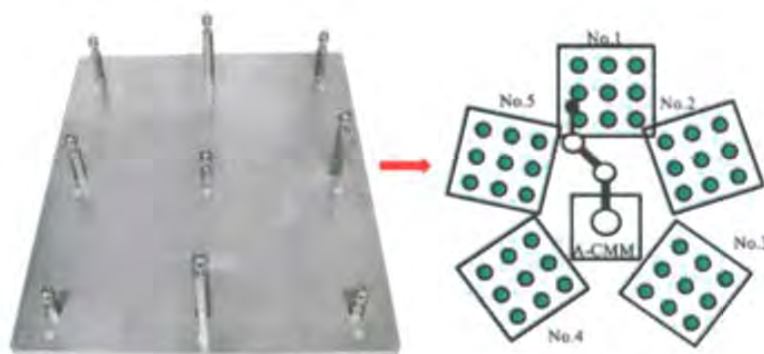


Figura 3.2.1 Representación de patrón tridimensional.

En [10] se presenta el desarrollo de un objeto patrón para la verificación de brazos de medida al que el autor llama “Barra virtual de esferas”, consistente en una barra con cuatro agujeros cónicos en cada extremo de la barra, los cuales sirven como asiento para el palpador del brazo de medida (Figura 3.2.2) .

Cuatro puntos (uno por agujero) sobre los agujeros cónicos son capturados por el palpador del brazo que a través de un procedimiento de optimización se ajustan a una esfera virtual. Conocidas las esferas virtuales, el autor calcula las distancias entre ellas y las compara con las distancias nominales para determinar la precisión de medida del brazo.

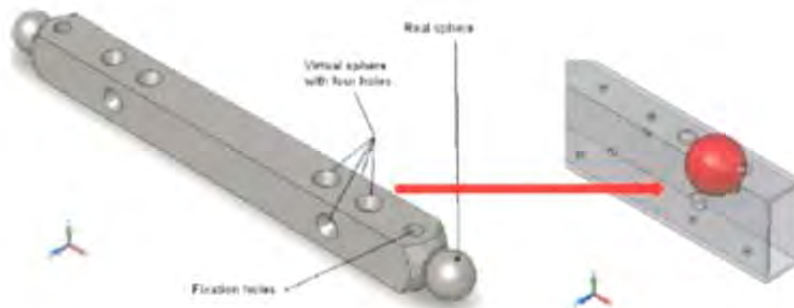


Figura 3.2.2 Barra virtual de esferas.

Los patrones lineales, formados principalmente por una barra, son los más utilizados en la actualidad por los autores y las normas, debido principalmente a su facilidad de uso y que la alta precisión que poseen es suficiente para calibrar brazos. En uno de los primeros estudios sobre brazos de medir utilizan un instrumento orientable en el espacio formado por una barra y elementos móviles y un interferómetro que mide la distancia a lo largo de su eje longitudinal (Figura 3.2.3), estas distancias son utilizadas para comprobar el error en las mediciones de los brazos. [11]

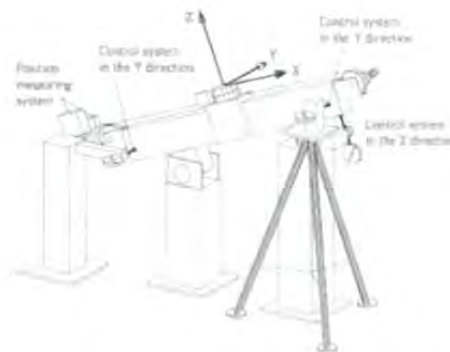


Figura 3.2.3 Patrón para calibración de Kovac..

En [12] se muestra una placa de medida que servirá como objeto patrón para el brazo de medida. La placa consiste con 16 grupos con 4 agujeros cónicos como se muestra en la Figura 3.2.4.

Del mismo modo que en [10], en cada uno de los grupos de agujeros cónicos (donde puede asentarse el palpador del brazo) se palpan cuatro puntos, contando con lo anterior se calcula el centro de las 16 esferas, repitiendo el mismo procedimiento; colocando la placa en tres orientaciones diferentes con respecto al brazo de medida. La distancia virtual calculada entre el centro de las esferas virtuales ajustadas por mínimos cuadrados en cada una de las orientaciones se compara con la distancia nominal (calculada con una máquina de medir por coordenadas) para determinar la precisión del brazo de medida.

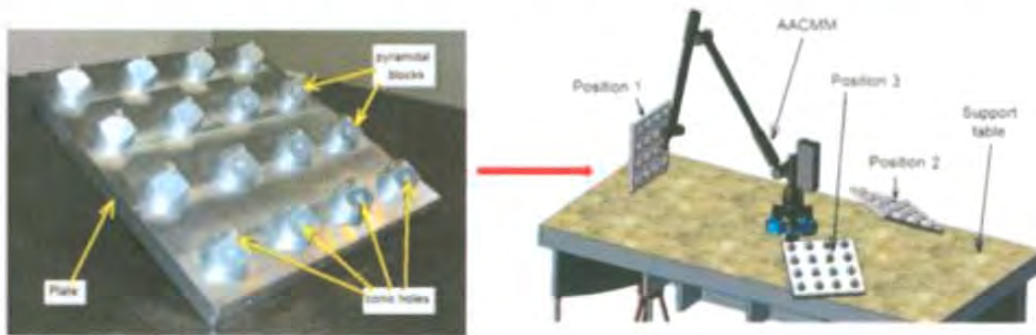


Figura 3.2.4 Placa de esferas virtuales.

Otro método que existe para hacer una compensación del palpador del brazo de medición es con ayuda de un software que nos proporciona la marca FARO llamado "CAM 2" y además utilizando un cono de compensación. (Figura 3.2.5). Con este método lograremos hacer una compensación correctamente del brazo

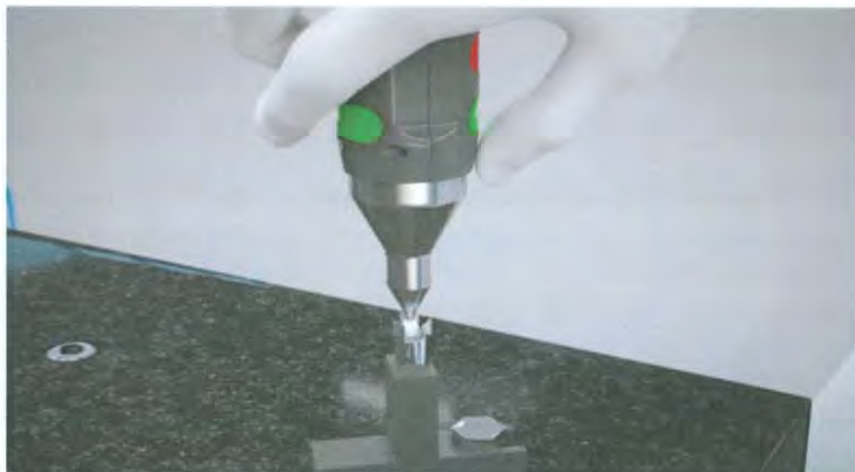


Figura 3.2.5 Cono de compensación.

Para realizar la compensación colocaremos la zona de medición del brazo en vertical sobre el cono de medición y giraremos la manija del brazo hacia el primer hueco del cono de compensación, teniendo la punta del palpador hacia el extremo del hueco, presionando el botón verde de la manija mientras regresamos al punto de partida. (Figura 3.2.6)



Figura 3.2.6 Captura de compensación.

El software guardara los datos capturados y nos indicara que continuemos con el proceso de compensación repitiendo el mismo procedimiento para los huecos restantes. Tras finalizar el último movimiento giratorio y dejar de presionar el botón verde, seguiremos por presionar el botón rojo para confirmar el fin de la compensación, el software CAM 2 guardara estos datos y podremos trabajar con mediciones más precisas.



Figura 3.2.7 Salvando compensación.

3.3 PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE DATOS PARA VERIFICACIÓN DEL BRAZO

Como anteriormente se vio, realizar una verificación del brazo de medición nos proporciona información útil y necesaria para conocer el *estado* actual en el que se encuentra operando el brazo de medir por coordenadas.

Para la prueba se considera necesario tener condiciones ambientales controladas para evitar el proceso de dilatación de los componentes metroológicos utilizados para las pruebas. En nuestro trabajo, durante la verificación del BAMC se observó una variación de la temperatura entre 20 a 23 °c. Es importante tener el área de trabajo controlado para obtener resultados más precisos.

Antes de comenzar con el procedimiento de captura de datos fue indispensable utilizar el método de Denavit & Hartenberg para conocer la posición y orientación del palpador para cualquiera de sus articulaciones, todo esto con ayuda del estudio analítico de geometría de movimientos del brazo que nos proporciona el modelado propuesto por D-H.

Para comenzar se debe colocar el brazo en la posición donde inicialmente todas sus articulaciones se encuentren en posición 0 donde " $x=0$, $y=0$, $z=0$ ", apoyándose con el software que nos proporciona Faro (CAM2) donde al someter a movimiento para cada articulación va mostrando la posición exacta en los tres ejes del espacio en el que se encuentra ubicado dicha articulación, siendo indispensable acomodar todas sus articulaciones en posición inicial. Al acomodar las articulaciones del brazo Faro fusión logramos obtener la posición representada en la Figura 3.3.1, nombrada "posición inicial del brazo para todas sus articulaciones"



Figura 3.3.1

Posición inicial del brazo para todas sus articulaciones.



Figura 3.3.2

CAD de posición inicial del brazo.

Representando de una manera más objetiva esta posición; se diseñó el brazo con apoyo del software “SolidWorks” logrando un dibujo asistido por computadora (CAD) y así tener una idea más clara de cómo se encuentra representado el brazo en posición inicial para todas sus articulaciones. (Véase anteriormente Figura 3.3.2).

Fue desarrollada dentro del Centro de Asistencia Metrológica de la Universidad de Sonora la prueba de rendimiento volumétrico para un BAMC, utilizando una barra patrón sometida a 20 orientaciones, logrando cubrir el volumen total del brazo. (Siendo las mínimas establecidas por la norma para esta prueba).

La barra patrón que fue utilizado en esta prueba cuenta con 15 esferas a lo largo, de las cuales fueron tomadas solamente 4 de estas, seleccionando así; las esferas de modo que pudiésemos cubrir el volumen total del brazo formando una esfera dos veces la longitud del brazo.

Las esferas seleccionadas para esta prueba fueron; 1, 4, 7,10; obteniendo una prueba efectiva del volumen total del brazo. (Figura 3.3.3)



Figura 3.3.3 Barra de esferas.

Logrando obtener las mediciones para las 20 posiciones establecidas por la norma, se procederá a calcular los errores de centros en distancias posibles con las esferas medidas anteriormente.

En la figura 3.3.4 se muestran las posibles mediciones que se pueden obtener al medir los centros de una esfera con respecto a otra, teniendo así un total de 6 distancias contables.

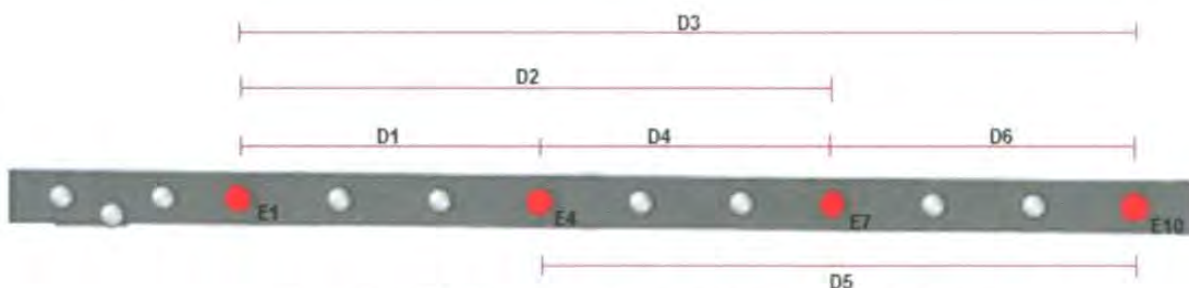


Figura 3.3.4 Distancias respecto a centro de esferas.

Para el procedimiento de esta prueba se tomaron nueve puntos por cada una de las cuatro esferas que se contemplaron para la prueba de rendimiento volumétrico. Cinco puntos fueron palpados sobre el ecuador, dos a 45° con respecto al ecuador, uno en el hemisferio norte y para finalizar uno en el hemisferio sur, como se muestra en la figura 3.3.5

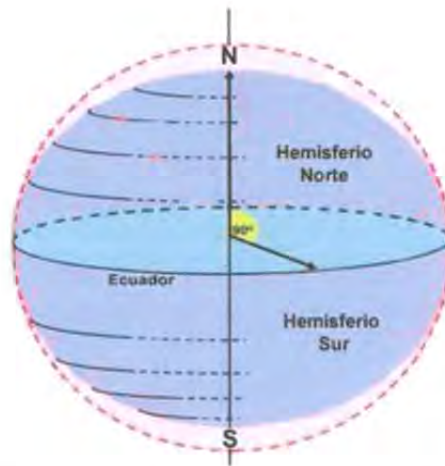


Figura 3.3.5 Hemisferios de una esfera.

En cuanto a las posiciones de la barra, la norma establece un mínimo de 20 posiciones para alcanzar a cubrir el volumen total del brazo, de las cuales; dos son en posición vertical, diez en horizontal y ocho a 45° , debido al poco espacio con el que cuenta el centro de atención metrológica de la universidad de sonora, se tuvo que decidir por ciertas posiciones, evitando posiciones en la barra que no se podían medir debido a que sobrepasaba el área de trabajo con el que cuenta el centro de atención metrológico (CAM).

Teniendo de apoyo dos trípodes con altura configurable logramos establecer cuatro posiciones horizontales con la abertura mínima de los trípodes (Figuras 3.3.6, 3.3.7), seguido por seis posiciones a 45° situándose la esfera 1 en la posición más baja (Figuras 3.3.8, 3.3.9), nuevamente seis posiciones a 45° pero esta vez encontrándose la esfera 1 en la posición más alta (Figuras 3.3.10, 3.3.11) y por último cuatro posiciones en horizontal teniendo la abertura de los trípodes en su máxima capacidad (Figuras 3.3.12, 3.3.13).

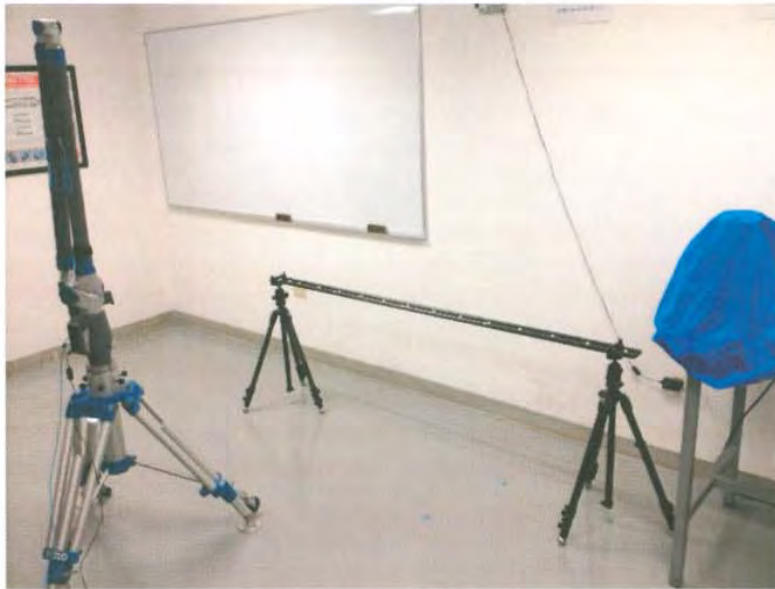


Figura 3.3.6 Barra colocada horizontalmente con trípodes en su mínima abertura



Figura 3.3.7 Barra colocada horizontalmente con trípodes en su mínima abertura.



Figura 3.3.8 Mediciones con la barra colocada en posición horizontal.



Figura 3.3.9 Barra colocada a 45° , siendo la esfera 1 la que se encuentra en el extremo de menor altura.



Figura 3.3.10 Mediciones con la barra colocada a 45° .



Figura 3.3.11 Barra colocada a 45° , siendo la esfera 1 la que se encuentra en el extremo de mayor altura.



Figura 3.3.12 Mediciones con la barra colocada a 45°.



Figura 3.3.13 Barra colocada horizontalmente con trípodes en su máxima abertura.

Realizar la prueba llevó un tiempo aproximado de diez horas, este tiempo se hubiese sido mayor sin el apoyo del software que hoy en día nos brindan ayuda en la realización de proyectos de investigación. Con el apoyo del software Matlab se guardar la captura de los nueve puntos palpados en cada una de las cuatro esferas (para las veinte posiciones establecidas en el proceso de tesis) resultando la captura de puntos una tarea sencilla. (Figura 3.3.15)

Use of Metrology Platform in real time

Start up AACMM Starts connection between Articulated Measuring Arm and Matlab software

Select position and sphere for calibration or verification procedure Position 1 Sphere 1

No. Channels Duration (Sec) Sample rate

Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6

Get Data N: 0

Delete Save Reset

X	Y	Z	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7

N: 0 Save Data Delete Data Reset

Calculate the HTM using the optimal geometrical parameters

Select Position Position 1 Calculate

Calculate HTM using sensor's readings

Select Position Position 1 Calculate

Figura 3.3.15 Interfaz para la captura de datos del procedimiento de verificación de medida en Matlab.

Como se ilustra en la figura 3.3.15 en la parte superior izquierda se muestra un botón "Star up AACMM", el cual tiene como función inicializar el brazo de medida, sino antes; haber pasado por su cero físico a las 7 articulaciones del brazo. Logrado lo anterior el brazo estará listo para iniciar la captura de datos.

Es importante destacar que para los nueve puntos palpados por esfera (para las 20 posiciones), se salva un documento de texto con extensión (TXT), en el cual el interfaz logra guardar la captura de las coordenadas captadas por el brazo.

Obteniendo lo anterior; continuamos con la lectura de los puntos, el cual se logró con una programación desarrollada en Matlab (ver Anexo 1 donde se presenta el código para el cálculo de los errores en distancia) en el cual encontrando los valores guardados por el interfaz seguimos por sustituirlos por variables establecidas en la programación.

Obteniendo como finalidad los parámetros establecidos por la norma

- La máxima desviación obtenida para todas las posiciones.
- El rango de estas desviaciones.
- Un rango que da idea de una desviación media de las esferas.

Al momento de realizar las nueve mediciones que se realizaron en cada esfera, se fueron realizando los siguientes pasos: (Para cada esfera medida y para su respectiva orientación).

1. Localizar solamente las coordenadas en "X, Y, Z" (logrando tomar solamente estas coordenadas con ayuda del software Matlab, al momento de realizar los cálculos estimados).
2. Encontrar la media de los puntos. Hacer los cálculos para la estimación de la esfera que fue aproximada por los nueve puntos medidos.
3. Al tener las cuatro estimaciones de las esferas para cada posición, seguimos por hacer un cálculo en distancias entre los centros de las esferas.
4. Obteniendo la distancia entre los centros de las esferas; seguimos por obtener la distancia entre esferas medidas en su respectiva orientación.
5. Finalmente se determina el cálculo de errores en estas distancias entre los centros de las esferas.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se vio anteriormente, con el análisis del modelado de Denavit & Hartenberg podemos conocer la posición y orientación del palpador para cualquier configuración de valores de las articulaciones del brazo de medida, obteniendo una tabla de los valores iniciales del modelo cinemático del brazo, También se analizaron los errores en distancias cometido por el brazo.

Para determinar los valores iniciales del modelo cinemático del brazo, es necesario seguir una serie de reglas ya definidas mediante una combinación de parámetros geométricos denominada por el modelado de Denavit & Hartenberg. Aquí se deben determinar sistemas de referencia sucesivos en cada una de las articulaciones del brazo. Los sistemas de referencia en cada una de las articulaciones se ilustran en la figura 3.4.1.

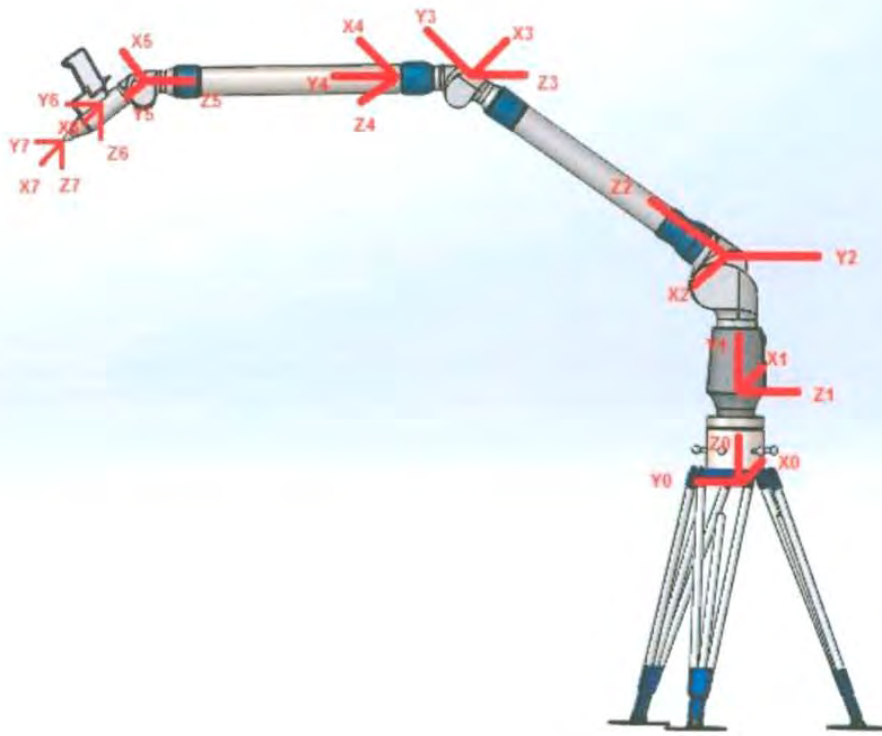


Figura 3.4.1 Sistemas de referencia para cada articulación del brazo.

Después de desarrollar el modelado de Denavit & Hartenberg ; se determinaron los sistemas de referencia vistos anteriormente y siguiendo los pasos establecidos en la página 24 y 25 de esta tesis de licenciatura obtuvimos los resultados para los siguientes cuatro parámetros geométricos: d_i , a_i , θ_i y α_i . Obteniendo los valores iniciales para cada parámetro geométrico los que se presentan en la tabla 3.4.1.

	a_i	d_i	θ_i	α_i
1	-50	144	0	-90
2	-50	0	225	-90
3	-30	890	180	-90
4	30	0	90	-90
5	30	890	0	90
6	35	0	90	-90
7	5	220	0	0

Tabla 3.4.1 Valores de d_i , a_i , θ_i y α_i para cada articulación.

Al realizar la programación en Matlab para obtener los errores en distancia se logró obtener una relación de errores en milímetros, de las seis mediciones posibles para cada una de las veinte posiciones realizadas. (Véase anteriormente la Figura 3.3.4) Para las primeras cuatro posiciones, donde la barra se encontraba en posición horizontal y los tripodes en la altura mínima, en la tabla 3.4.2 se muestran los errores en distancia calculados para las seis posibles mediciones existentes entre las 4 esferas encontradas en la barra.

ERRORES EN DISTANCIA (mm)								
Barra Horizontal(Abajo)								
Orientaciones	E 1-4	E 1-7	E 1-10	E 4-7	E 4-10	E 7-10	Min	Max
1	0.136	0.1208	0.1154	0.0151	0.0204	0.0052	0.0052	0.136
2	0.0329	0.0562	0.0258	0.0233	0.059	0.0826	0.0233	0.0826
3	0.1062	0.0776	0.0748	0.0285	0.0311	0.0026	0.0026	0.1062
4	0.0218	0.0533	0.0656	0.0314	0.0436	0.0121	0.0121	0.0656

Tabla 3.4.2 Errores en distancia.

Siendo los siguientes errores en distancia representados en la tabla 3.4.3 para las siguientes seis orientaciones, colocada la barra a 45° donde la esfera uno se encuentra en el punto donde el tripode está en su menor abertura.

ERRORES EN DISTANCIA (mm)								
Barra 45°(Esfera 1 Abajo)								
Orientaciones	E 1-4	E 1-7	E 1-10	E 4-7	E 4-10	E 7-10	Min	Max
5	0.0434	0.043	0.0465	0.00176068	0.0029	0.0033	0.00176068	0.0465
6	0.0089	0.0082	0.017	0.00026078	0.0078	0.0085	0.00026078	0.017
7	0.0083	0.0042	0.002	0.0041	0.0105	0.0067	0.002	0.0105
8	0.0251	0.7447	0.7681	0.7698	0.7932	0.023	0.023	0.7932
9	0.0179	0.0106	0.007	0.0074	0.0252	0.0179	0.007	0.0252
10	0.012	0.0205	0.002	0.0086	0.0138	0.0222	0.002	0.0222

Tabla 3.4..3 Errores en distancia

Continuando con los errores en distancia correspondientes a la posición 11 hasta la posición 16, se realizaron las medidas situando la barra a 45°; pero esta vez donde la esfera uno se encontraba en el punto donde el trípode se encontraba en su mayor abertura, encontrando así los resultados capturados en la tabla 3.4.4.

ERRORES EN DISTANCIA (mm)								
Barra 45°(Esfera 1 Arriba)								
Orientaciones	E 1-4	E 1-7	E 1-10	E 4-7	E 4-10	E 7-10	Min	Max
11	0.0126	0.0214	0.029	0.0339	0.0414	0.0073	0.0073	0.0414
12	0.008	0.0013	0.0069	0.0067	0.00013392	0.0058	0.000133922	0.008
13	0.0063	0.0153	0.0297	0.0089	0.031	0.014	0.0063	0.031
14	0.009	0.0076	0.0357	0.0015	0.0264	0.0279	0.0015	0.0357
15	0.0165	0.02	0.0307	0.0034	0.014	0.0105	0.0034	0.0307
16	0.0222	0.0425	0.05	0.0202	0.0275	0.0072	0.0072	0.05

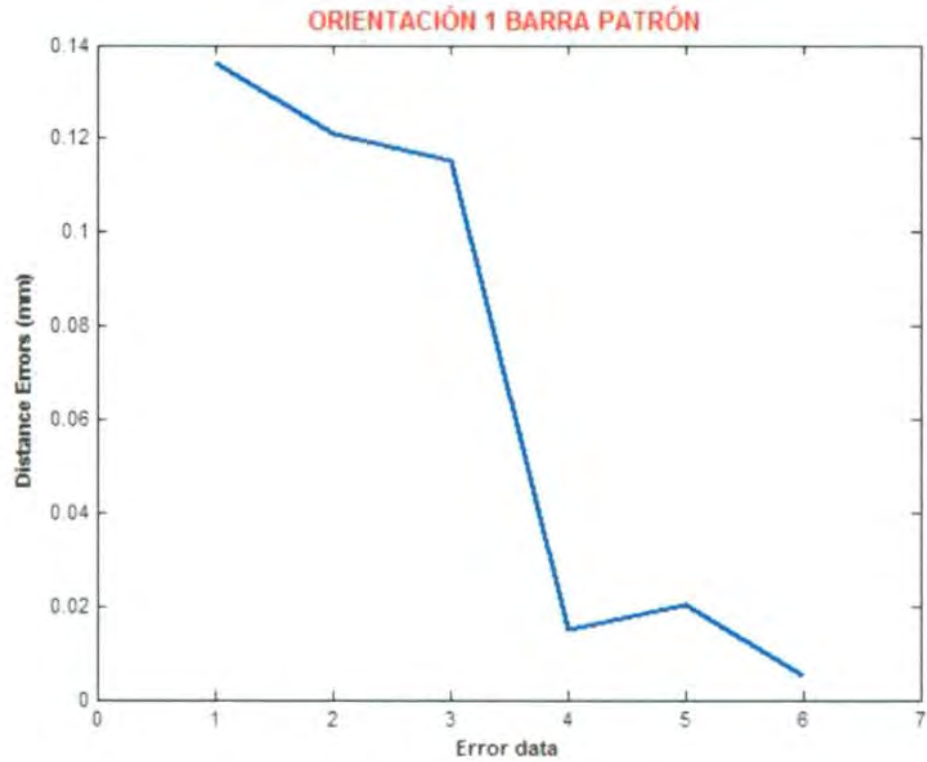
Tabla 3.4.4 Errores en distancia.

Finalmente logrando concluir con las mediciones, se realizaron las últimas cuatro posiciones con la barra horizontalmente y teniendo ambos trípodes en su máxima abertura. Los errores en distancia para esta posición se encuentran en la tabla 3.4.5.

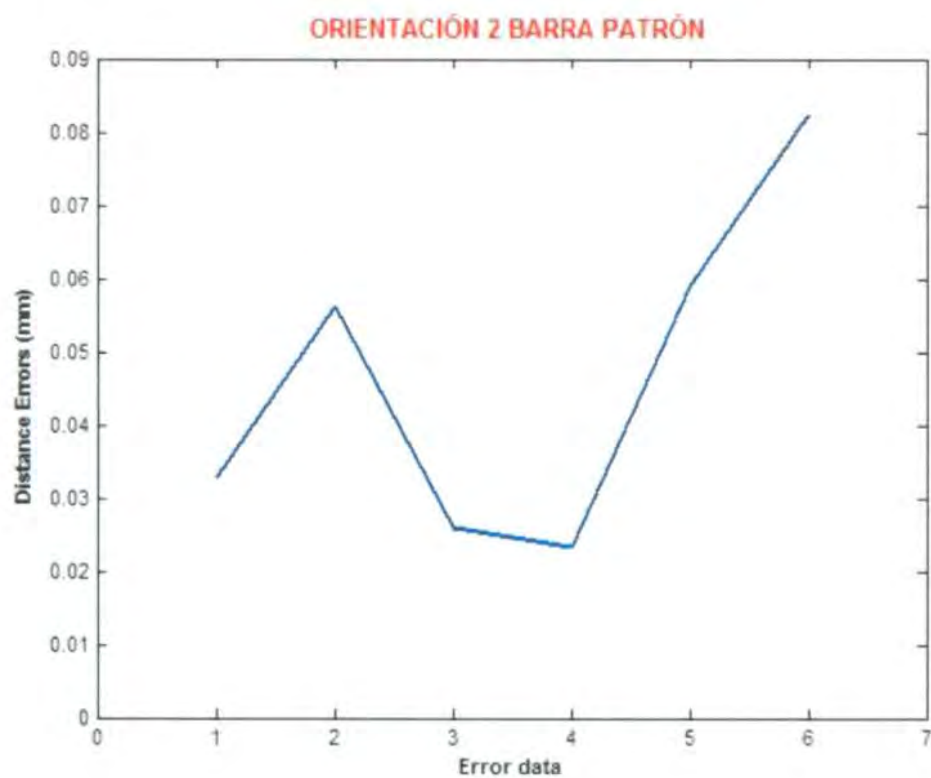
ERRORES EN DISTANCIA (mm)								
Barra Horizontal(Arriba)								
Orientaciones	E 1-4	E 1-7	E 1-10	E 4-7	E 4-10	E 7-10	Min	Max
17	0.0038	0.0134	0.0326	0.0173	0.0285	0.0457	0.0038	0.0457
18	0.0139	0.0299	0.032	0.0158	0.0178	0.0019	0.0019	0.032
19	0.0461	0.0263	0.0442	0.0198	0.0017	0.0182	0.0017	0.0461
20	0.006	0.0362	0.025	0.0301	0.0189	0.0113	0.006	0.0362

Tabla 3.4.5 Errores en distancia

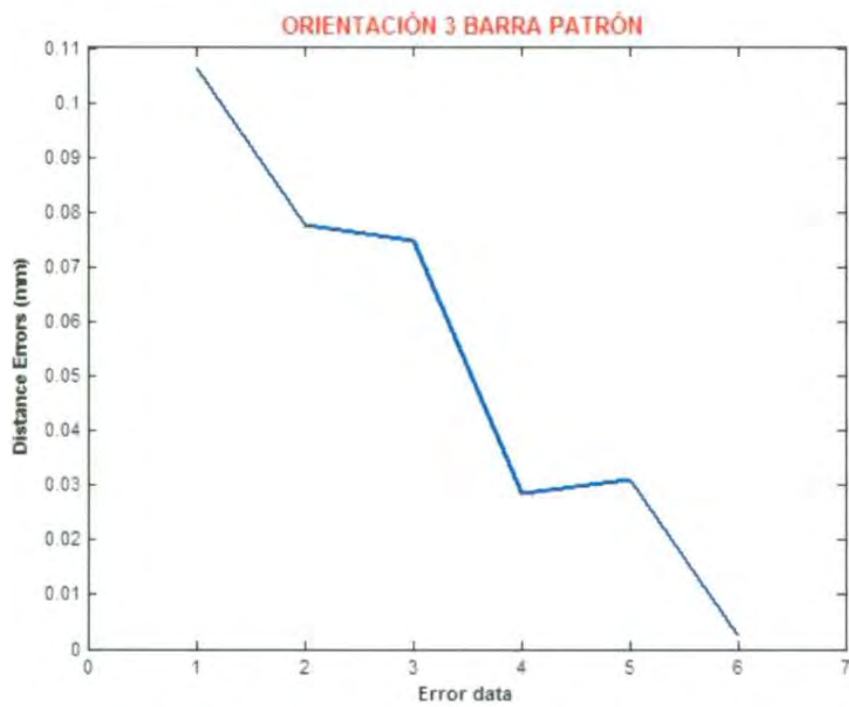
Contando con los resultados desplegados en las tablas anteriores se continuo por obtener resultados más visuales y para ello se graficaron los errores en distancia para cada una de las orientaciones presentadas en esta tesis con la ayuda del software Matlab.



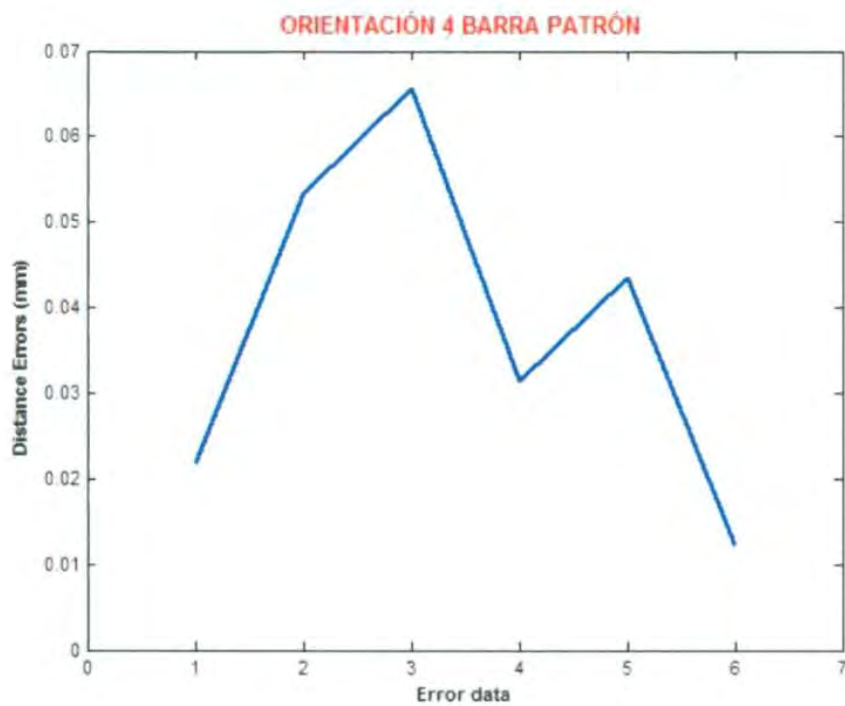
Gráfica 3.4.1 Error en distancia orientación 1.



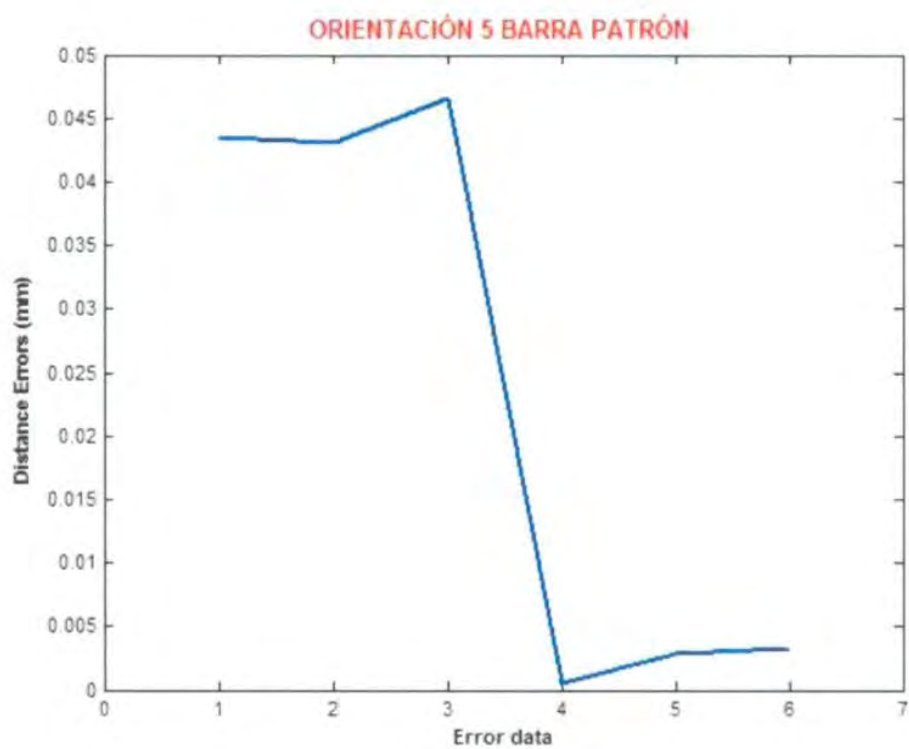
Gráfica 3.4.2 Error en distancia orientación 2.



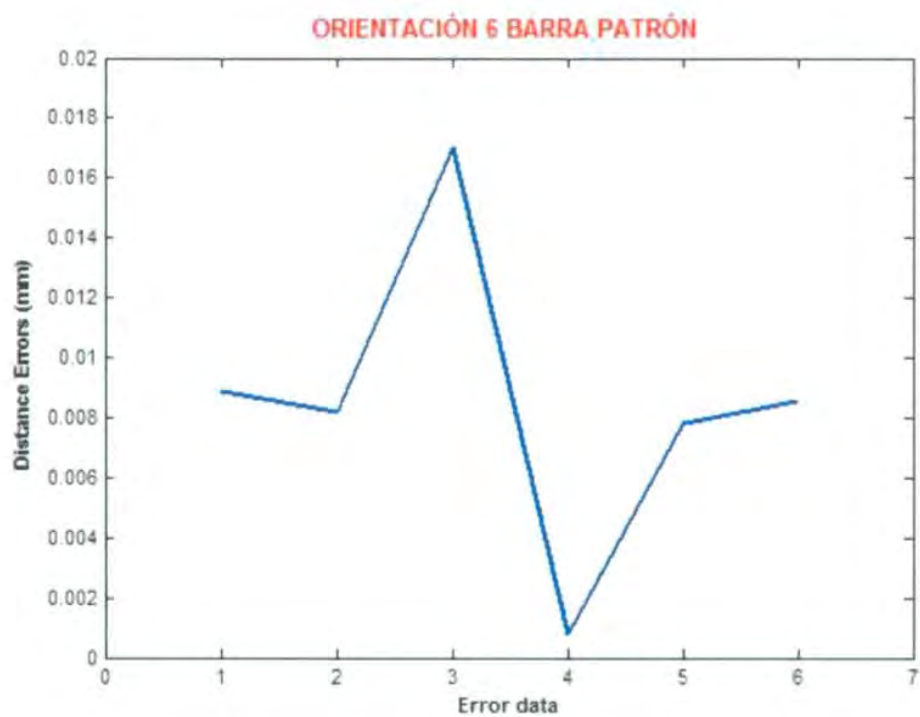
Gráfica 3.4.3 Error en distancia orientación 3.



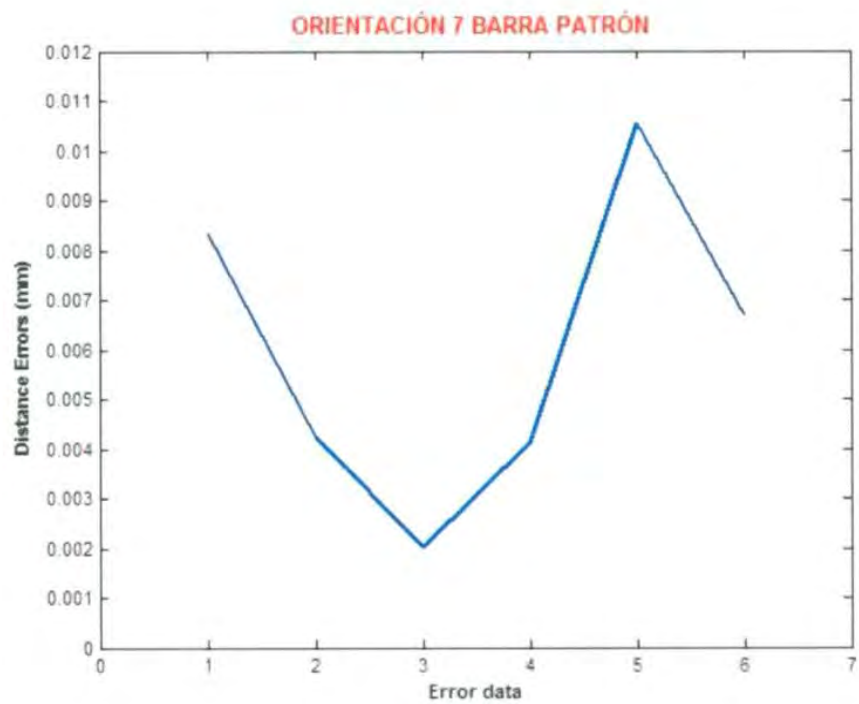
Gráfica 3.4.4 Error en distancia orientación 4.



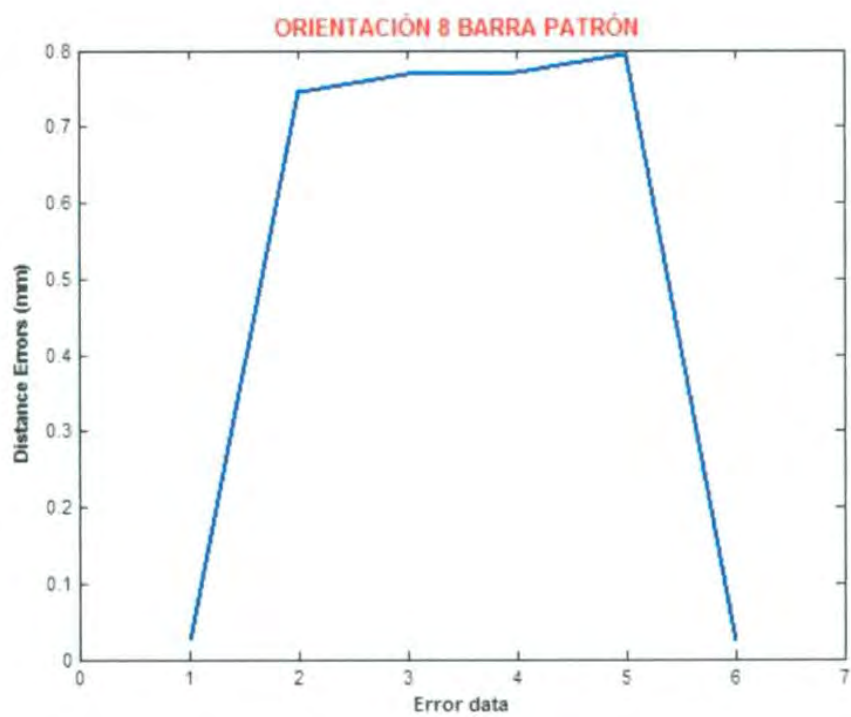
Gráfica 3.4.5 Error en distancia orientación 5.



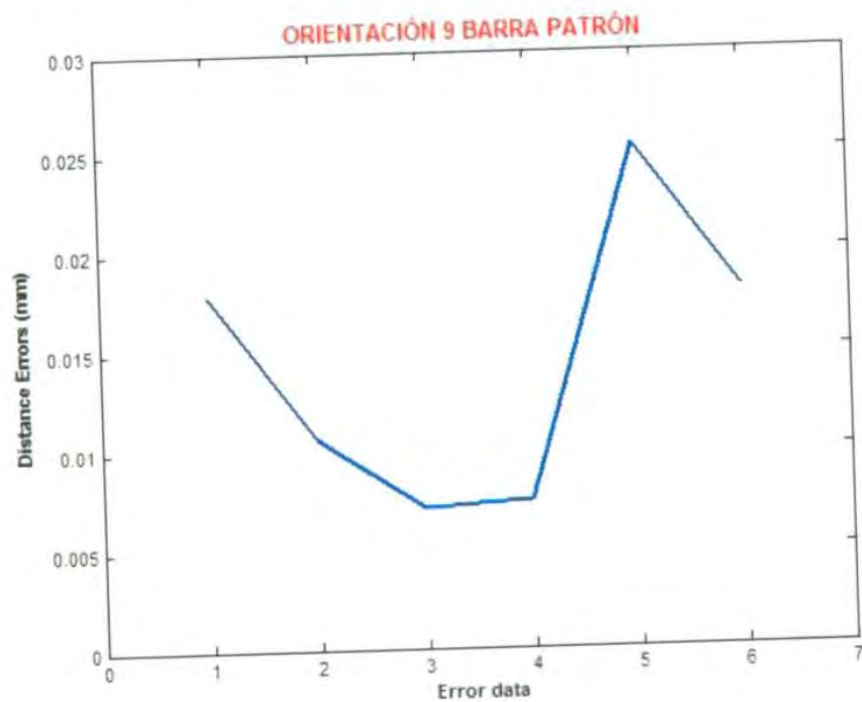
Gráfica 3.4.6 Error en distancia orientación 6.



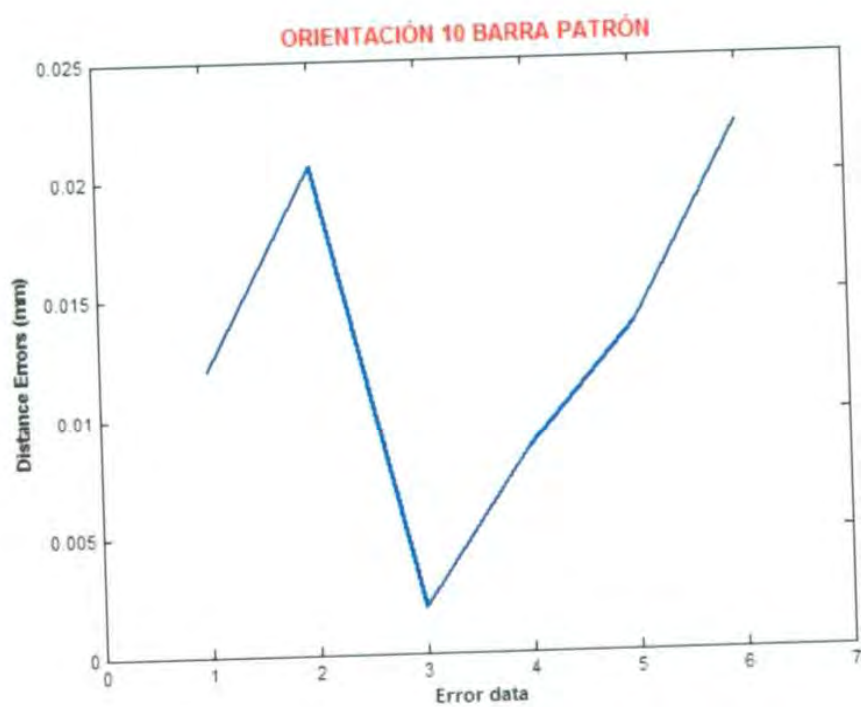
Gráfica 3.4.7 Error en distancia orientación 7.



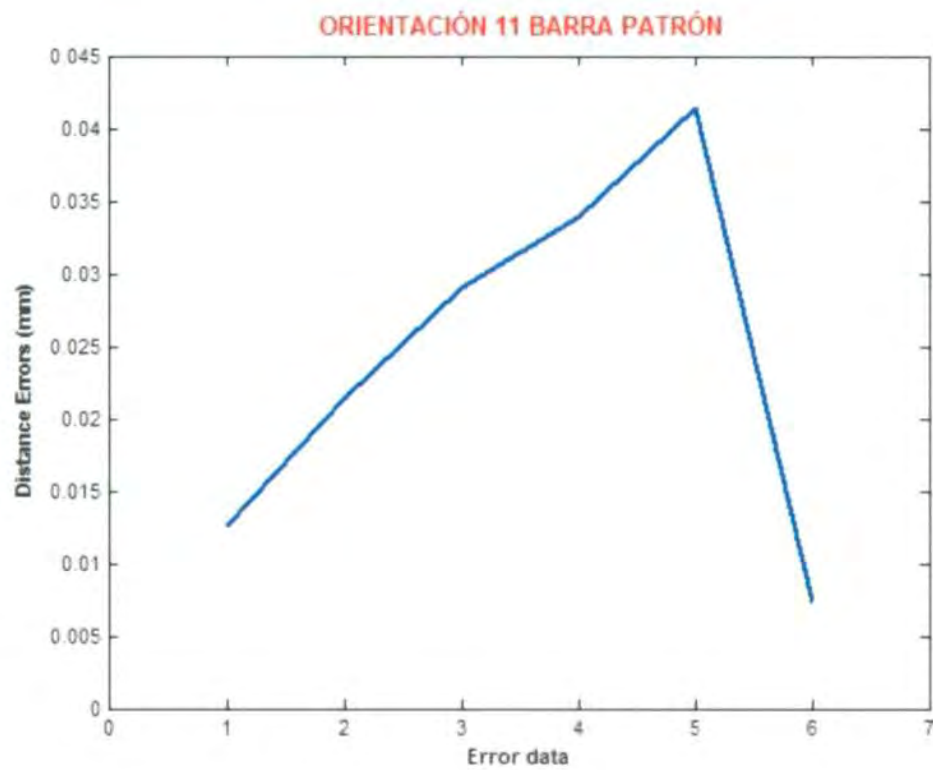
Gráfica 3.4.8 Error en distancia orientación 8.



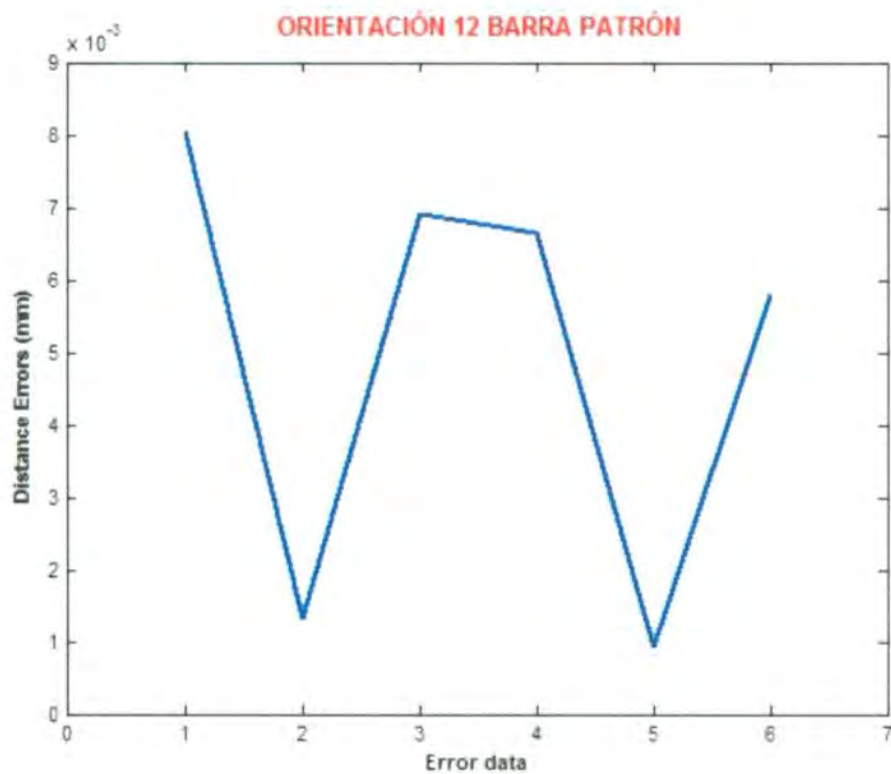
Gráfica 3.4.9 Error en distancia orientación 9.



Gráfica 3.4.10 Error en distancia orientación 10.

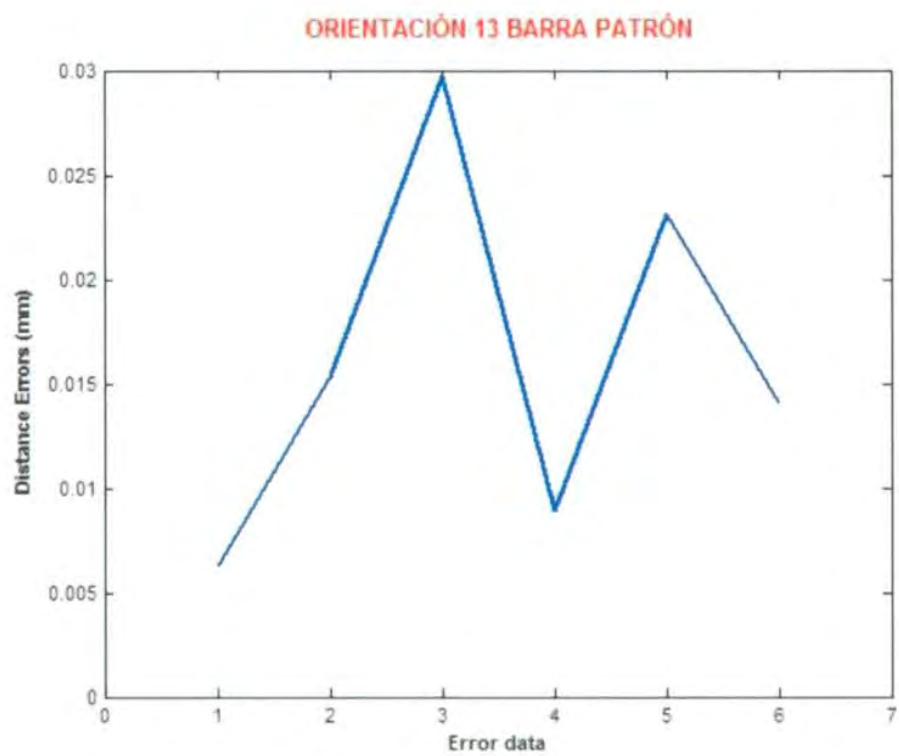


Gráfica 3.4.11 Error en distancia orientación 11.

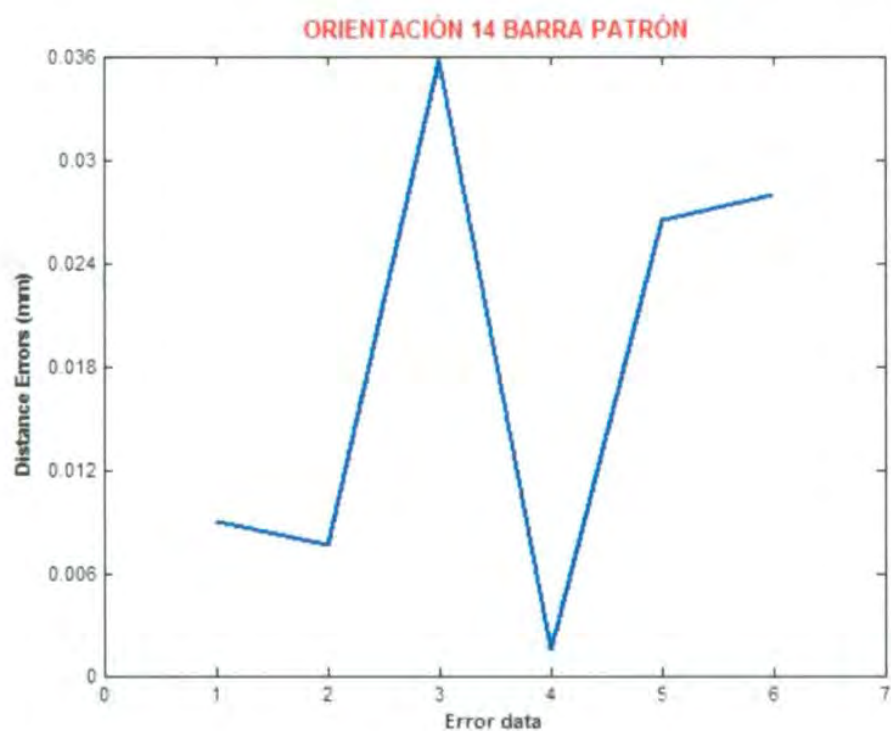


Gráfica 3.4.12 Error en distancia orientación 12.

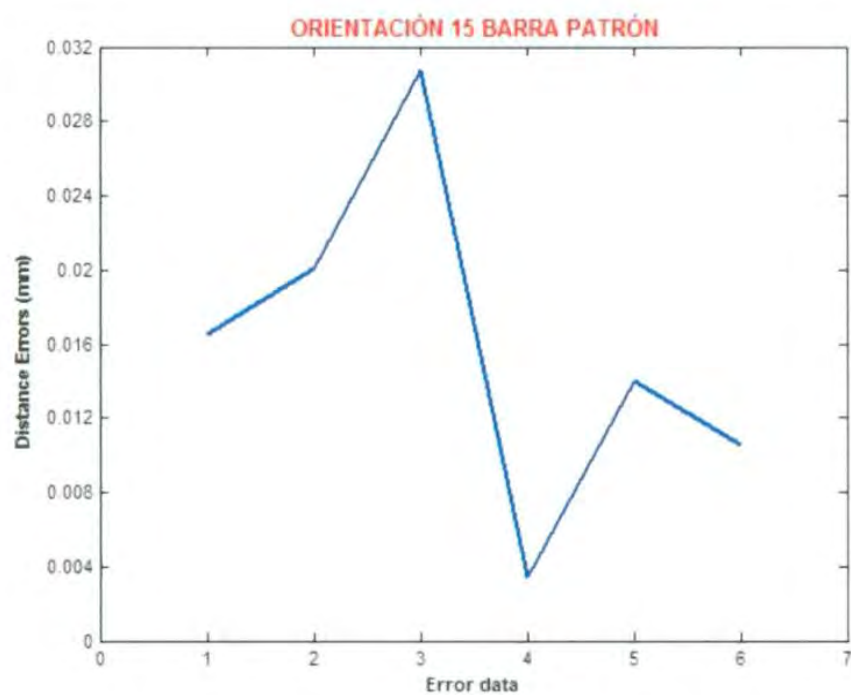
R. T150268



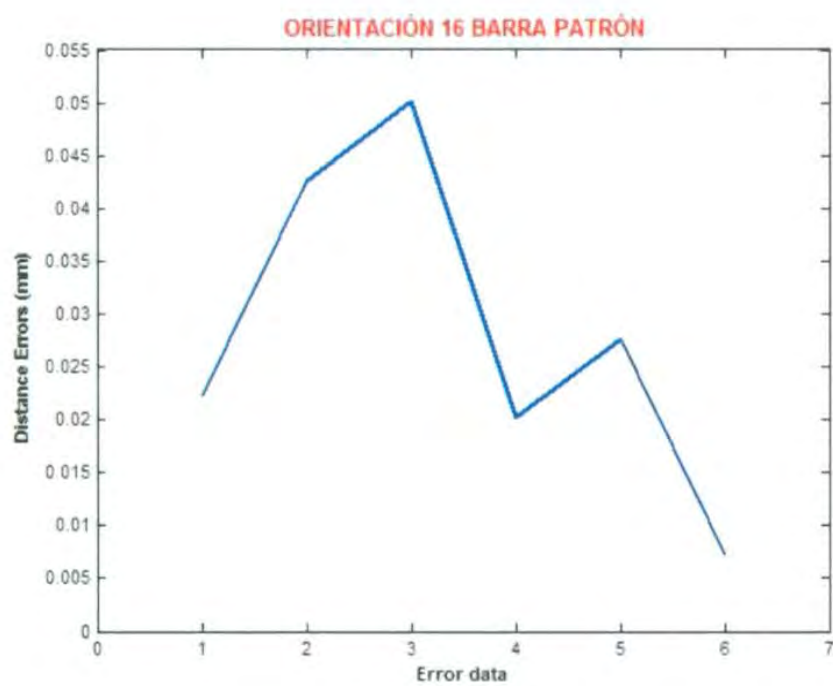
Gráfica 3.4.13 Error en distancia orientación 13.



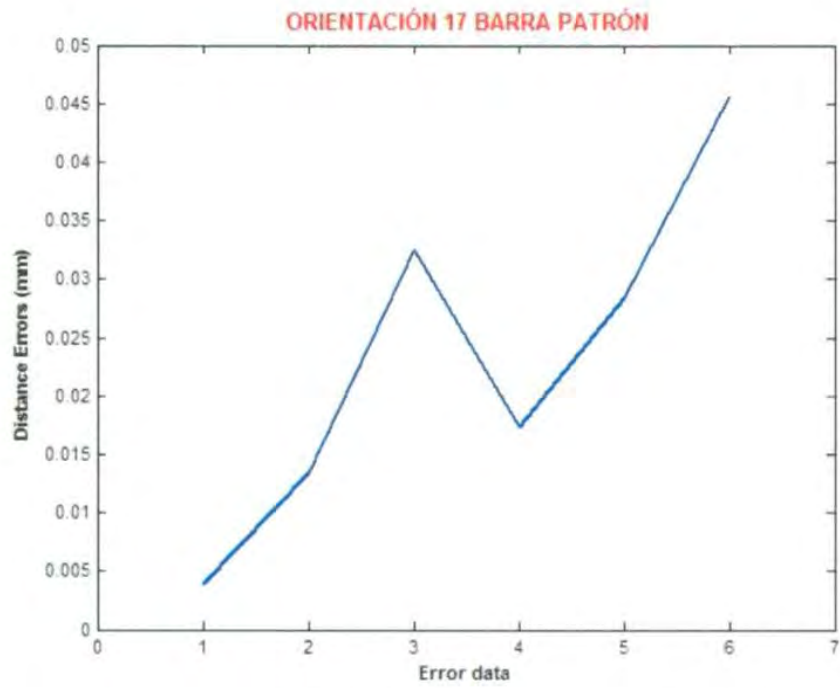
Gráfica 3.4.14 Error en distancia orientación 14.



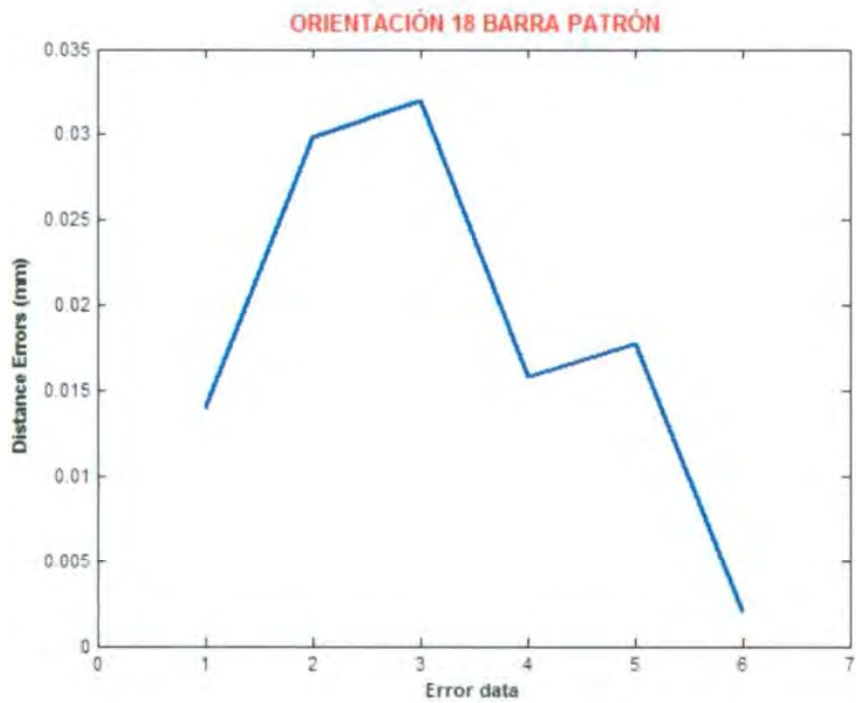
Gráfica 3.4.15 Error en distancia orientación 15.



Gráfica 3.4.16 Error en distancia orientación 16.



Gráfica 3.4.17 Error en distancia orientación 17.



Gráfica 3.4.18 Error en distancia orientación 18.



Gráfica 3.4.19 Error en distancia orientación 19.



Gráfica 3.4.20 Error en distancia orientación 20.

Como apreciamos anteriormente podemos encontrar las gráficas correspondientes a los errores en distancia contra la distancia entre esferas materializada, dadas respecto a cada una de las veinte orientaciones realizadas.

Las gráficas se encuentran desde la gráfica 3.4.1 hasta la 3.4.20, teniendo de una manera más visual los resultados desplegados por las tablas obtenidas anteriormente. (Tabla 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5).

Para finalizar el fabricante reporta un error volumétrico de 0.179 mm, como observamos anteriormente (véase tablas 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5) se obtuvo un error máximo de 0.7932mm medido con el BAMC, determinando un error máximo mayor que el provisto por el fabricante. Podemos concluir que el brazo no se encuentra en sus mejores condiciones de trabajo, y para obtener resultados óptimos es recomendable realizar una calibración del mismo.

CAPÍTULO 4.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1 CONCLUSIONES

El objetivo final alcanzado para este trabajo de tesis de licenciatura fue realizar una verificación volumétrica de un brazo para medir por coordenadas, que nos permitió conocer el estado actual en el que se encontraba el brazo y lograr comparar estos resultados con los del fabricante. A continuación se explican las conclusiones obtenidas por cada uno de los capítulos de este trabajo.

En el capítulo 2 se logró conocer la importancia de los equipos de medición por coordenadas dentro de la industria concluyendo que los brazos de medida y láser tracker son actualmente de mayor utilidad. Se conocieron los procedimientos de verificación por la norma ASME B89.4.22, obteniendo información de los diversos métodos que nos proporciona esta norma, demostrando que con esta prueba es más fácil determinar el volumen total de trabajo del brazo.

Finalmente en el mismo capítulo, se trató un poco una comparativa con la recomendación alemana VDI-VDE 2617_parte 9 proporcionando algunos otros métodos para la verificación de un brazo.

En el capítulo 3 se presentó de manera general el modelado cinemático de un brazo de medición por coordenadas el cual está basado en el propuesto por Denavit & Hartenberg logrando identificar la posición y orientación del palpador para cada una de sus articulaciones en la posición inicial del brazo. Después adentrarnos en los diversos procedimientos de calibración de brazos articulados definiendo que al obtener una calibración no se corrige el problema del instrumento de medición; solamente se conoce el estado actual del mismo y para corregirlo se debe pagar por ello.

En el mismo capítulo se logró determinar los procedimientos de captura de datos, donde el apoyo de varios software fue una herramienta esencial para el desarrollo de los valores medidos en la verificación del brazo, facilitándonos encontrar los grandes errores en distancias con los que el brazo cuenta.

Analizando los resultados podemos concluir que el brazo de medición por coordenadas no se encontraba en el mejor estado y se encontraba operando con ciertos errores de los cuales podemos darnos cuenta en las imágenes anteriores, cabe mencionar que la fuerza de palpado del operador también influye al momento de realizar una medición, golpear la barra o lograr un contacto fuerte hacia cada esfera medida.

Lo anterior influye de gran manera para la verificación, debido a que se pueden encontrar resultados alterados como se muestra en la gráfica 3.4.8, donde podemos hacer referencia que el brazo no realizó las medidas correctas para esta orientación, pero si hacemos una comparativa hacia las demás orientaciones existe una notoria diferencia en distancias para cada una de las orientaciones que se presentaron en esta tesis de licenciatura.

4.2 TRABAJO FUTURO

Tras realizar este trabajo de tesis de licenciatura basado en la verificación de un brazo de medición por coordenadas concretamos que este instrumento se está convirtiendo en un gran instrumento de medición para la industria facilitando los trabajos tales como análisis dimensional, control de calidad, inspección en el proceso de producción, calibración de máquinas, alineación de piezas, verificación de piezas e ingeniería inversa.

Para todos estos campos de aplicación es importante contar con el instrumento adecuado y en perfectas condiciones para trabajar, los brazos de medición por coordenadas se pueden calibrar por diversos métodos como algunos que se presentan en esta tesis. Haciendo referencia a la norma ASME B89.4.22 ; para esta tesis se presentó la oportunidad de realizar la prueba de rendimiento volumétrico de un brazo articulado por coordenadas, definiendo los pasos que se deben de considerar para realizar dicha prueba, no obstante; existen otros dos métodos dentro de esta norma, de los cuales se pueden continuar trabajando con estos otros métodos y logrando obtener resultados comparativos entre los tres diversos métodos tales como diferencias que presenta uno sobre otro, eficiencia para determinar los estado de medición del componente.

Así como también existen los brazos de medición, existen otros instrumentos de alta gama que son eficientes tales como el láser tracker, del cual también existe un extenso tema de investigación referente al mismo tal como; lograr una verificación de trabajo del mismo, su operatividad y diferentes ventajas que nos aporta este tipo de instrumento para la aplicación correspondiente.

Finalmente, con los valores iniciales del modelo cinemático del brazo de medir por coordenadas, se pretende realizar una optimización de parámetros geométricos que nos permita minimizar los errores de medición cometidos por el brazo. Es importante mencionar que el trabajo realizado en esta tesis se pretende publicar en una revista indizada reconocida por el Conacyt.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Brau, "Diseño, fabricación y calibración de una plataforma multiregistro para la verificación de instrumentos de medir por coordenadas portátiles.," 2013.
- [2] R. A. Cacho, "Desarrollo, implementación y ensayo de técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante plataforma multi-registro.," p. 275, 2015.
- [3] D. E. M. P. O. R. Coordenadas, N. A. B, and D. J. S. Mazo, "VERIFICACIÓN DE BRAZOS ARTICULADOS," 2010.
- [4] T. A. S. of M. Engineers, "ASME B89_4_22-2004.pdf." pp. 1–44, 2005.
- [5] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI/VDE 2617 Part 9, Acceptance and reverification test for articulated arm coordinate measuring machines." pp. 1–20, 2009.
- [6] J. Santolaria, a C. Majarena, D. Samper, J. J. García, and J. J. Aguilar, "Comparación de estándares internacionales de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas : ASME B89 . 4 . 22- 2004 vs VDI 2617 _ 9-2009," *XVIII Congr. Nac. Ing. Mecánica*, pp. 1–9, 2009.
- [7] J. DENAVIT, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.," *Trans. ASME. J. Appl. Mech.*, vol. 22, pp. 215–221, 1955.
- [8] A. B. Avila, J. S. Mazo, and J. J. A. Martín, "Design and mechanical evaluation of a capacitive sensor-based indexed platform for verification of Portable Coordinate Measuring Instruments," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, pp. 606–633, 2014.
- [9] K. Shimojima, R. Furutani, K. Takamasu, and K. Araki, "the Estimation Method of Uncertainty of Articulated Coordinate Measuring Machine," pp. 1844–1848, 2003.
- [10] G. R. L. A. Piratelli-Filho, "Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test," *Measurement*, vol. 43, no. 2, pp. 236–244.
- [11] D. Gonzalez-Madruga, "Desarrollo de técnicas de mejora de la fiabilidad en la medición con brazos portátiles de medir por coordenadas," 2013.
- [12] A. Piratelli-filho, F. Henrique, T. Fernandes, R. Valdés, "Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation," *Precis. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 349–355, 2012.

ANEXO 1

(Programación para cálculo de errores en distancias)

```
function Errores_BrazoRicardo
```

```
%Esta funcion encuentra los errores en distancia comparados con las  
%distancias nominales obtenidas de la barra patron de esferas.
```

```
%% CONSTANTES
```

```
radio = 7.5;
```

```
BarraNom = load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Matlab\BarraNom.txt');
```

```
%Distancias NOMINALES
```

```
D1n = sqrt(sum(minus(BarraNom(5,:),BarraNom(1,:)).^2));% Bola 1-4  
D2n = sqrt(sum(minus(BarraNom(8,:),BarraNom(1,:)).^2));% Bola 1-7  
D3n = sqrt(sum(minus(BarraNom(11,:),BarraNom(1,:)).^2));% Bola 1-10  
D4n = sqrt(sum(minus(BarraNom(8,:),BarraNom(5,:)).^2));% Bola 4-7  
D5n = sqrt(sum(minus(BarraNom(11,:),BarraNom(5,:)).^2));% Bola 4-10  
D6n = sqrt(sum(minus(BarraNom(11,:),BarraNom(8,:)).^2));% Bola 7-10
```

```
%% CALCULO DE ERRORES EN DISTANCIA EN 20 ORIENTACIONES DE BARRA PATRON
```

```
%-----Orientacion 1. Bola 1 4 7 10-----%
```

```
E101_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
1\orientacion 1_esfera 1.txt');
```

```
E501_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
1\orientacion 1_esfera 4.txt');
```

```
E801_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
1\orientacion 1_esfera 7.txt');
```

```
E1101_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
1\orientacion 1_esfera 10.txt');
```

```
% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.
```

```
E101 = E101_Temp(1:9,1:3);  
E501 = E501_Temp(1:9,1:3);  
E801 = E801_Temp(1:9,1:3);  
E1101 = E1101_Temp(1:9,1:3);
```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE101_Temp = mean(E101)';
CE501_Temp = mean(E501)';
CE801_Temp = mean(E801)';
CE1101_Temp = mean(E1101)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE101,RE101,dE101] = lssphere(E101, CE101_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE501,RE501,dE501] = lssphere(E501, CE501_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE801,RE801,dE801] = lssphere(E801, CE801_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1101,RE1101,dE1101] = lssphere(E1101, CE1101_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 1

D101 = sqrt(sum(minus(CE501,CE101).^2));% Bola 1-4
D201 = sqrt(sum(minus(CE801,CE101).^2));% Bola 1-7
D301 = sqrt(sum(minus(CE1101,CE101).^2));% Bola 1-10
D401 = sqrt(sum(minus(CE801,CE501).^2));% Bola 4-7
D501 = sqrt(sum(minus(CE1101,CE501).^2));% Bola 4-10
D601 = sqrt(sum(minus(CE1101,CE801).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posici?n
Error_O1 = [abs(D101-D1n) abs(D201-D2n) abs(D301-D3n) abs(D401-D4n)...
            abs(D501-D5n) abs(D601-D6n)];

%-----Orientacion 2 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E102_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
2\orientacion 2_esfera 1.txt');
E502_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
2\orientacion 2_esfera 4.txt');
E802_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
2\orientacion 2_esfera 7.txt');
E1102_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
2\orientacion 2_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E102 = E102_Temp(1:9,1:3);
E502 = E502_Temp(1:9,1:3);
E802 = E802_Temp(1:9,1:3);
E1102 = E1102_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE102_Temp = mean(E102)';
CE502_Temp = mean(E502)';
CE802_Temp = mean(E802)';
CE1102_Temp = mean(E1102)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE102,RE102,dE102] = lssphere(E102, CE102_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE502,RE502,dE502] = lssphere(E502, CE502_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE802,RE802,dE802] = lssphere(E802, CE802_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1102,RE1102,dE1102] = lssphere(E1102, CE1102_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 2

D102 = sqrt(sum(minus(CE502,CE102).^2));% Bola 1-4
D202 = sqrt(sum(minus(CE802,CE102).^2));% Bola 1-7
D302 = sqrt(sum(minus(CE1102,CE102).^2));% Bola 1-10
D402 = sqrt(sum(minus(CE802,CE502).^2));% Bola 4-7
D502 = sqrt(sum(minus(CE1102,CE502).^2));% Bola 4-10
D602 = sqrt(sum(minus(CE1102,CE802).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O2 = [abs(D102-D1n) abs(D202-D2n) abs(D302-D3n) abs(D402-D4n)...
            abs(D502-D5n) abs(D602-D6n)];

%-----Orientacion 3 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E103_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
3\orientacion 3_esfera 1.txt');
E503_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
3\orientacion 3_esfera 4.txt');
E803_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
3\orientacion 3_esfera 7.txt');
E1103_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
3\orientacion 3_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E103 = E103_Temp(1:9,1:3);
E503 = E503_Temp(1:9,1:3);
E803 = E803_Temp(1:9,1:3);
E1103 = E1103_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE103_Temp = mean(E103)';
CE503_Temp = mean(E503)';
CE803_Temp = mean(E803)';
CE1103_Temp = mean(E1103)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE103,RE103,dE103] = lssphere(E103, CE103_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE503,RE503,dE503] = lssphere(E503, CE503_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE803,RE803,dE803] = lssphere(E803, CE803_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1103,RE1103,dE1103] = lssphere(E1103, CE1103_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 3

D103 = sqrt(sum(minus(CE503,CE103).^2));% Bola 1-4
D203 = sqrt(sum(minus(CE803,CE103).^2));% Bola 1-7
D303 = sqrt(sum(minus(CE1103,CE103).^2));% Bola 1-10
D403 = sqrt(sum(minus(CE803,CE503).^2));% Bola 4-7
D503 = sqrt(sum(minus(CE1103,CE503).^2));% Bola 4-10
D603 = sqrt(sum(minus(CE1103,CE803).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O3 = [abs(D103-D1n) abs(D203-D2n) abs(D303-D3n) abs(D403-D4n)...
            abs(D503-D5n) abs(D603-D6n)];

%-----Orientacion 4 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E104_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
4\orientacion 4_esfera 1.txt');
E504_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
4\orientacion 4_esfera 4.txt');
E804_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
4\orientacion 4_esfera 7.txt');
E1104_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
4\orientacion 4_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E104 = E104_Temp(1:9,1:3);
E504 = E504_Temp(1:9,1:3);
E804 = E804_Temp(1:9,1:3);
E1104 = E1104_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE104_Temp = mean(E104)';
CE504_Temp = mean(E504)';
CE804_Temp = mean(E804)';
CE1104_Temp = mean(E1104)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE104,RE104,dE104] = lssphere(E104, CE104_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE504,RE504,dE504] = lssphere(E504, CE504_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE804,RE804,dE804] = lssphere(E804, CE804_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1104,RE1104,dE1104] = lssphere(E1104, CE1104_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 4

D104 = sqrt(sum(minus(CE504,CE104).^2));% Bola 1-4
D204 = sqrt(sum(minus(CE804,CE104).^2));% Bola 1-7
D304 = sqrt(sum(minus(CE1104,CE104).^2));% Bola 1-10
D404 = sqrt(sum(minus(CE804,CE504).^2));% Bola 4-7
D504 = sqrt(sum(minus(CE1104,CE504).^2));% Bola 4-10
D604 = sqrt(sum(minus(CE1104,CE804).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O4 = [abs(D104-D1n) abs(D204-D2n) abs(D304-D3n) abs(D404-D4n)...
            abs(D504-D5n) abs(D604-D6n)];

%-----Orientacion 5 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E105_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
5\orientacion 5_esfera 1.txt');
E505_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
5\orientacion 5_esfera 4.txt');
E805_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
5\orientacion 5_esfera 7.txt');
E1105_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
5\orientacion 5_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E105 = E105_Temp(1:9,1:3);
E505 = E505_Temp(1:9,1:3);
E805 = E805_Temp(1:9,1:3);
E1105 = E1105_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE105_Temp = mean(E105)';
CE505_Temp = mean(E505)';
CE805_Temp = mean(E805)';
CE1105_Temp = mean(E1105)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE105,RE105,dE105] = lssphere(E105, CE105_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE505,RE505,dE505] = lssphere(E505, CE505_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE805,RE805,dE805] = lssphere(E805, CE805_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1105,RE1105,dE1105] = lssphere(E1105, CE1105_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 5

D105 = sqrt(sum(minus(CE505,CE105).^2));% Bola 1-4
D205 = sqrt(sum(minus(CE805,CE105).^2));% Bola 1-7
D305 = sqrt(sum(minus(CE1105,CE105).^2));% Bola 1-10
D405 = sqrt(sum(minus(CE805,CE505).^2));% Bola 4-7
D505 = sqrt(sum(minus(CE1105,CE505).^2));% Bola 4-10
D605 = sqrt(sum(minus(CE1105,CE805).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O5 = [abs(D105-D1n) abs(D205-D2n) abs(D305-D3n) abs(D405-D4n)...
            abs(D505-D5n) abs(D605-D6n)];

%-----Orientacion 6 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E106_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
6\orientacion 6_esfera 1.txt');
E506_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
6\orientacion 6_esfera 4.txt');
E806_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
6\orientacion 6_esfera 7.txt');
E1106_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
6\orientacion 6_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E106 = E106_Temp(1:9,1:3);
E506 = E506_Temp(1:9,1:3);
E806 = E806_Temp(1:9,1:3);
E1106 = E1106_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE106_Temp = mean(E106)';
CE506_Temp = mean(E506)';
CE806_Temp = mean(E806)';
CE1106_Temp = mean(E1106)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE106,RE106,dE106] = lssphere(E106, CE106_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE506,RE506,dE506] = lssphere(E506, CE506_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE806,RE806,dE806] = lssphere(E806, CE806_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1106,RE1106,dE1106] = lssphere(E1106, CE1106_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 6

D106 = sqrt(sum(minus(CE506,CE106).^2));% Bola 1-4
D206 = sqrt(sum(minus(CE806,CE106).^2));% Bola 1-7
D306 = sqrt(sum(minus(CE1106,CE106).^2));% Bola 1-10
D406 = sqrt(sum(minus(CE806,CE506).^2));% Bola 4-7
D506 = sqrt(sum(minus(CE1106,CE506).^2));% Bola 4-10
D606 = sqrt(sum(minus(CE1106,CE806).^2));% Bola 7-10

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O6 = [abs(D106-D1n) abs(D206-D2n) abs(D306-D3n) abs(D406-D4n)...
            abs(D506-D5n) abs(D606-D6n)];

%-----Orientacion 7 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E107_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
7\orientacion 7_esfera 1.txt');
E507_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
7\orientacion 7_esfera 4.txt');
E807_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
7\orientacion 7_esfera 7.txt');
E1107_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
7\orientacion 7_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E107 = E107_Temp(1:9,1:3);
E507 = E507_Temp(1:9,1:3);
E807 = E807_Temp(1:9,1:3);
E1107 = E1107_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE107_Temp = mean(E107)';
CE507_Temp = mean(E507)';
CE807_Temp = mean(E807)';
CE1107_Temp = mean(E1107)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE107,RE107,dE107] = lssphere(E107, CE107_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE507,RE507,dE507] = lssphere(E507, CE507_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE807,RE807,dE807] = lssphere(E807, CE807_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1107,RE1107,dE1107] = lssphere(E1107, CE1107_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 7

D107 = sqrt(sum(minus(CE507,CE107).^2));% Bola 1-5
D207 = sqrt(sum(minus(CE807,CE107).^2));% Bola 1-8
D307 = sqrt(sum(minus(CE1107,CE107).^2));% Bola 1-11
D407 = sqrt(sum(minus(CE807,CE507).^2));% Bola 5-8
D507 = sqrt(sum(minus(CE1107,CE507).^2));% Bola 5-11
D607 = sqrt(sum(minus(CE1107,CE807).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion
Error_O7 = [abs(D107-D1n) abs(D207-D2n) abs(D307-D3n) abs(D407-D4n)...
            abs(D507-D5n) abs(D607-D6n)];

%-----Orientacion 8 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E108_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
8\orientacion 8_esfera 1.txt');
E508_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
8\orientacion 8_esfera 4.txt');
E808_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
8\orientacion 8_esfera 7.txt');
E1108_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
8\orientacion 8_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E108 = E108_Temp(1:9,1:3);
E508 = E508_Temp(1:9,1:3);
E808 = E808_Temp(1:9,1:3);
E1108 = E1108_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE108_Temp = mean(E108)';
CE508_Temp = mean(E508)';
CE808_Temp = mean(E808)';
CE1108_Temp = mean(E1108)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE108,RE108,dE108] = lssphere(E108, CE108_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE508,RE508,dE508] = lssphere(E508, CE508_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE808,RE808,dE808] = lssphere(E808, CE808_Temp, radio, .00001, .00001);
[CE1108,RE1108,dE1108] = lssphere(E1108, CE1108_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 8

D108 = sqrt(sum(minus(CE508,CE108).^2));% Bola 1-5
D208 = sqrt(sum(minus(CE808,CE108).^2));% Bola 1-8
D308 = sqrt(sum(minus(CE1108,CE108).^2));% Bola 1-11
D408 = sqrt(sum(minus(CE808,CE508).^2));% Bola 5-8
D508 = sqrt(sum(minus(CE1108,CE508).^2));% Bola 5-11
D608 = sqrt(sum(minus(CE1108,CE808).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O8 = [abs(D108-D1n) abs(D208-D2n) abs(D308-D3n) abs(D408-D4n)...
            abs(D508-D5n) abs(D608-D6n)];

%-----Orientacion 9 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
----

E109_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
9\orientacion 9_esfera 1.txt');
E509_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
9\orientacion 9_esfera 4.txt');
E809_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
9\orientacion 9_esfera 7.txt');
E1109_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
9\orientacion 9_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E109 = E109_Temp(1:9,1:3);
E509 = E509_Temp(1:9,1:3);
E809 = E809_Temp(1:9,1:3);
E1109 = E1109_Temp(1:9,1:3);

```

```
% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)
```

```
CE109_Temp = mean(E109)';  
CE509_Temp = mean(E509)';  
CE809_Temp = mean(E809)';  
CE1109_Temp = mean(E1109)';
```

```
% Calculo del centro de las esferas medidas
```

```
[CE109,RE109,dE109] = lssphere(E109, CE109_Temp, radio, .00001, .00001);  
[CE509,RE509,dE509] = lssphere(E509, CE509_Temp, radio, .00001, .00001);  
[CE809,RE809,dE809] = lssphere(E809, CE809_Temp, radio, .00001, .00001);  
[CE1109,RE1109,dE1109] = lssphere(E1109, CE1109_Temp, radio, .00001,  
.00001);
```

```
% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 9
```

```
D109 = sqrt(sum(minus(CE509,CE109).^2));% Bola 1-5  
D209 = sqrt(sum(minus(CE809,CE109).^2));% Bola 1-8  
D309 = sqrt(sum(minus(CE1109,CE109).^2));% Bola 1-11  
D409 = sqrt(sum(minus(CE809,CE509).^2));% Bola 5-8  
D509 = sqrt(sum(minus(CE1109,CE509).^2));% Bola 5-11  
D609 = sqrt(sum(minus(CE1109,CE809).^2));% Bola 8-11
```

```
% Errores en distancia en esta posicion
```

```
Error_09 = [abs(D109-D1n) abs(D209-D2n) abs(D309-D3n) abs(D409-D4n)...  
            abs(D509-D5n) abs(D609-D6n)];
```

```
%-----Orientacion 10 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----  
-----
```

```
E1010_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
10\orientacion 10_esfera 1.txt');  
E5010_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
10\orientacion 10_esfera 4.txt');  
E8010_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
10\orientacion 10_esfera 7.txt');
```

```
E11010_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
10\orientacion 10_esfera 10.txt');
```

```
% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.
```

```
E1010 = E1010_Temp(1:9,1:3);  
E5010 = E5010_Temp(1:9,1:3);  
E8010 = E8010_Temp(1:9,1:3);  
E11010 = E11010_Temp(1:9,1:3);
```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1010_Temp = mean(E1010)';
CE5010_Temp = mean(E5010)';
CE8010_Temp = mean(E8010)';
CE11010_Temp = mean(E11010)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1010,RE1010,dE1010] = lssphere(E1010, CE1010_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5010,RE5010,dE5010] = lssphere(E5010, CE5010_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8010,RE8010,dE8010] = lssphere(E8010, CE8010_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11010,RE11010,dE11010] = lssphere(E11010, CE11010_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 10

D1010 = sqrt(sum(minus(CE5010,CE1010).^2));% Bola 1-5
D2010 = sqrt(sum(minus(CE8010,CE1010).^2));% Bola 1-8
D3010 = sqrt(sum(minus(CE11010,CE1010).^2));% Bola 1-11
D4010 = sqrt(sum(minus(CE8010,CE5010).^2));% Bola 5-8
D5010 = sqrt(sum(minus(CE11010,CE5010).^2));% Bola 5-11
D6010 = sqrt(sum(minus(CE11010,CE8010).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O10 = [abs(D1010-D1n) abs(D2010-D2n) abs(D3010-D3n) abs(D4010-
D4n)...
             abs(D5010-D5n) abs(D6010-D6n)];

%-----Orientacion 11 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1011_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
11\orientacion 11_esfera 1.txt');

E5011_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
11\orientacion 11_esfera 4.txt');
E8011_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
11\orientacion 11_esfera 7.txt');
E11011_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
11\orientacion 11_esfera 10.txt');

```

```
% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.
```

```
E1O11 = E1O11_Temp(1:9,1:3);  
E5O11 = E5O11_Temp(1:9,1:3);  
E8O11 = E8O11_Temp(1:9,1:3);  
E11O11 = E11O11_Temp(1:9,1:3);
```

```
% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)
```

```
CE1O11_Temp = mean(E1O11)';  
CE5O11_Temp = mean(E5O11)';  
CE8O11_Temp = mean(E8O11)';  
CE11O11_Temp = mean(E11O11)';
```

```
% Calculo del centro de las esferas medidas
```

```
[CE1O11,RE1O11,dE1O11] = lssphere(E1O11, CE1O11_Temp, radio, .00001,  
.00001);  
[CE5O11,RE5O11,dE5O11] = lssphere(E5O11, CE5O11_Temp, radio, .00001,  
.00001);  
[CE8O11,RE8O11,dE8O11] = lssphere(E8O11, CE8O11_Temp, radio, .00001,  
.00001);  
[CE11O11,RE11O11,dE11O11] = lssphere(E11O11, CE11O11_Temp, radio, .00001,  
.00001);
```

```
% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 11
```

```
D1O11 = sqrt(sum(minus(CE5O11,CE1O11).^2));% Bola 1-5  
D2O11 = sqrt(sum(minus(CE8O11,CE1O11).^2));% Bola 1-8  
D3O11 = sqrt(sum(minus(CE11O11,CE1O11).^2));% Bola 1-11  
D4O11 = sqrt(sum(minus(CE8O11,CE5O11).^2));% Bola 5-8  
D5O11 = sqrt(sum(minus(CE11O11,CE5O11).^2));% Bola 5-11  
D6O11 = sqrt(sum(minus(CE11O11,CE8O11).^2));% Bola 8-11
```

```
% Errores en distancia en esta posicion
```

```
Error_O11 = [abs(D1O11-D1n) abs(D2O11-D2n) abs(D3O11-D3n) abs(D4O11-  
D4n)...  
abs(D5O11-D5n) abs(D6O11-D6n)];
```

```
%-----Orientacion 12 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----  
-----
```

```
E1O12_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
12\orientacion 12_esfera 1.txt');  
E5O12_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
12\orientacion 12_esfera 4.txt');  
E8O12_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
12\orientacion 12_esfera 7.txt');
```

```

E1012_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
12\orientacion 12_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1012 = E1012_Temp(1:9,1:3);
E5012 = E5012_Temp(1:9,1:3);
E8012 = E8012_Temp(1:9,1:3);
E11012 = E11012_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1012_Temp = mean(E1012)';
CE5012_Temp = mean(E5012)';
CE8012_Temp = mean(E8012)';
CE11012_Temp = mean(E11012)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1012,RE1012,dE1012] = lssphere(E1012, CE1012_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5012,RE5012,dE5012] = lssphere(E5012, CE5012_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8012,RE8012,dE8012] = lssphere(E8012, CE8012_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11012,RE11012,dE11012] = lssphere(E11012, CE11012_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 12

D1012 = sqrt(sum(minus(CE5012,CE1012).^2));% Bola 1-5
D2012 = sqrt(sum(minus(CE8012,CE1012).^2));% Bola 1-8
D3012 = sqrt(sum(minus(CE11012,CE1012).^2));% Bola 1-11
D4012 = sqrt(sum(minus(CE8012,CE5012).^2));% Bola 5-8
D5012 = sqrt(sum(minus(CE11012,CE5012).^2));% Bola 5-11
D6012 = sqrt(sum(minus(CE11012,CE8012).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O12 = [abs(D1012-D1n) abs(D2012-D2n) abs(D3012-D3n) abs(D4012-
D4n)...
abs(D5012-D5n) abs(D6012-D6n)];

%-----Orientacion 13 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1013_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
13\orientacion 13_esfera 1.txt');
E5013_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
13\orientacion 13_esfera 4.txt');

```

```

E8013_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
13\orientacion 13_esfera 7.txt');
E11013_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
13\orientacion 13_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1013 = E1013_Temp(1:9,1:3);
E5013 = E5013_Temp(1:9,1:3);
E8013 = E8013_Temp(1:9,1:3);
E11013 = E11013_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1013_Temp = mean(E1013)';
CE5013_Temp = mean(E5013)';
CE8013_Temp = mean(E8013)';
CE11013_Temp = mean(E11013)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1013,RE1013,dE1013] = lssphere(E1013, CE1013_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5013,RE5013,dE5013] = lssphere(E5013, CE5013_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8013,RE8013,dE8013] = lssphere(E8013, CE8013_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11013,RE11013,dE11013] = lssphere(E11013, CE11013_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 13

D1013 = sqrt(sum(minus(CE5013,CE1013).^2));% Bola 1-5
D2013 = sqrt(sum(minus(CE8013,CE1013).^2));% Bola 1-8

D3013 = sqrt(sum(minus(CE11013,CE1013).^2));% Bola 1-11
D4013 = sqrt(sum(minus(CE8013,CE5013).^2));% Bola 5-8
D5013 = sqrt(sum(minus(CE11013,CE5013).^2));% Bola 5-11
D6013 = sqrt(sum(minus(CE11013,CE8013).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O13 = [abs(D1013-D1n) abs(D2013-D2n) abs(D3013-D3n) abs(D4013-
D4n) ...
abs(D5013-D5n) abs(D6013-D6n)];

```

```
%-----Orientacion 14 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----  
-----
```

```
E1O14_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
14\orientacion 14_esfera 1.txt');  
E5O14_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
14\orientacion 14_esfera 4.txt');  
E8O14_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
14\orientacion 14_esfera 7.txt');  
E11O14_Temp =  
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion  
14\orientacion 14_esfera 10.txt');
```

```
% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.
```

```
E1O14 = E1O14_Temp(1:9,1:3);  
E5O14 = E5O14_Temp(1:9,1:3);  
E8O14 = E8O14_Temp(1:9,1:3);  
E11O14 = E11O14_Temp(1:9,1:3);
```

```
% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)
```

```
CE1O14_Temp = mean(E1O14)';  
CE5O14_Temp = mean(E5O14)';  
CE8O14_Temp = mean(E8O14)';  
CE11O14_Temp = mean(E11O14)';
```

```
% Calculo del centro de las esferas medidas
```

```
[CE1O14,RE1O14,dE1O14] = lssphere(E1O14, CE1O14_Temp, radio, .00001,  
.00001);  
[CE5O14,RE5O14,dE5O14] = lssphere(E5O14, CE5O14_Temp, radio, .00001,  
.00001);  
[CE8O14,RE8O14,dE8O14] = lssphere(E8O14, CE8O14_Temp, radio, .00001,  
.00001);
```

```
[CE11O14,RE11O14,dE11O14] = lssphere(E11O14, CE11O14_Temp, radio, .00001,  
.00001);
```

```
% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 14
```

```
D1O14 = sqrt(sum(minus(CE5O14,CE1O14).^2));% Bola 1-5  
D2O14 = sqrt(sum(minus(CE8O14,CE1O14).^2));% Bola 1-8  
D3O14 = sqrt(sum(minus(CE11O14,CE1O14).^2));% Bola 1-11  
D4O14 = sqrt(sum(minus(CE8O14,CE5O14).^2));% Bola 5-8  
D5O14 = sqrt(sum(minus(CE11O14,CE5O14).^2));% Bola 5-11  
D6O14 = sqrt(sum(minus(CE11O14,CE8O14).^2));% Bola 8-11
```

```

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O14 = [abs(D1O14-D1n) abs(D2O14-D2n) abs(D3O14-D3n) abs(D4O14-
D4n)...
            abs(D5O14-D5n) abs(D6O14-D6n)];

%-----Orientacion 15 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1O15_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
15\orientacion 15_esfera 1.txt');
E5O15_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
15\orientacion 15_esfera 4.txt');
E8O15_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
15\orientacion 15_esfera 7.txt');
E11O15_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
15\orientacion 15_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1O15 = E1O15_Temp(1:9,1:3);
E5O15 = E5O15_Temp(1:9,1:3);
E8O15 = E8O15_Temp(1:9,1:3);
E11O15 = E11O15_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1O15_Temp = mean(E1O15)';
CE5O15_Temp = mean(E5O15)';
CE8O15_Temp = mean(E8O15)';
CE11O15_Temp = mean(E11O15)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1O15,RE1O15,dE1O15] = lssphere(E1O15, CE1O15_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5O15,RE5O15,dE5O15] = lssphere(E5O15, CE5O15_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8O15,RE8O15,dE8O15] = lssphere(E8O15, CE8O15_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11O15,RE11O15,dE11O15] = lssphere(E11O15, CE11O15_Temp, radio, .00001,
.00001);

```

```
% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 15
```

```
D1O15 = sqrt(sum(minus(CE5O15,CE1O15).^2));% Bola 1-5
D2O15 = sqrt(sum(minus(CE8O15,CE1O15).^2));% Bola 1-8
D3O15 = sqrt(sum(minus(CE11O15,CE1O15).^2));% Bola 1-11
D4O15 = sqrt(sum(minus(CE8O15,CE5O15).^2));% Bola 5-8
D5O15 = sqrt(sum(minus(CE11O15,CE5O15).^2));% Bola 5-11
D6O15 = sqrt(sum(minus(CE11O15,CE8O15).^2));% Bola 8-11
```

```
% Errores en distancia en esta posicion
```

```
Error_O15 = [abs(D1O15-D1n) abs(D2O15-D2n) abs(D3O15-D3n) abs(D4O15-
D4n)...
abs(D5O15-D5n) abs(D6O15-D6n)];
```

```
%-----Orientacion 16 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----
```

```
E1O16_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
16\orientacion 16_esfera 1.txt');
E5O16_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
16\orientacion 16_esfera 4.txt');
E8O16_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
16\orientacion 16_esfera 7.txt');
E11O16_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
16\orientacion 16_esfera 10.txt');
```

```
% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.
```

```
E1O16 = E1O16_Temp(1:9,1:3);
E5O16 = E5O16_Temp(1:9,1:3);
E8O16 = E8O16_Temp(1:9,1:3);
E11O16 = E11O16_Temp(1:9,1:3);
```

```
% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)
```

```
CE1O16_Temp = mean(E1O16)';
CE5O16_Temp = mean(E5O16)';
CE8O16_Temp = mean(E8O16)';
CE11O16_Temp = mean(E11O16)';
```

```
% Calculo del centro de las esferas medidas
```

```
[CE1O16,RE1O16,dE1O16] = lssphere(E1O16, CE1O16_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5O16,RE5O16,dE5O16] = lssphere(E5O16, CE5O16_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8O16,RE8O16,dE8O16] = lssphere(E8O16, CE8O16_Temp, radio, .00001,
.00001);
```

```

[CE11016,RE11016,dE11016] = lssphere(E11016, CE11016_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 16

D1016 = sqrt(sum(minus(CE5016,CE1016).^2));% Bola 1-5
D2016 = sqrt(sum(minus(CE8016,CE1016).^2));% Bola 1-8
D3016 = sqrt(sum(minus(CE11016,CE1016).^2));% Bola 1-11
D4016 = sqrt(sum(minus(CE8016,CE5016).^2));% Bola 5-8
D5016 = sqrt(sum(minus(CE11016,CE5016).^2));% Bola 5-11
D6016 = sqrt(sum(minus(CE11016,CE8016).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O16 = [abs(D1016-D1n) abs(D2016-D2n) abs(D3016-D3n) abs(D4016-
D4n)...
abs(D5016-D5n) abs(D6016-D6n)];

%-----Orientacion 17 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1017_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
17\orientacion 17_esfera 1.txt');
E5017_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
17\orientacion 17_esfera 4.txt');
E8017_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
17\orientacion 17_esfera 7.txt');
E11017_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
17\orientacion 17_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1017 = E1017_Temp(1:9,1:3);
E5017 = E5017_Temp(1:9,1:3);
E8017 = E8017_Temp(1:9,1:3);
E11017 = E11017_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1017_Temp = mean(E1017)';
CE5017_Temp = mean(E5017)';
CE8017_Temp = mean(E8017)';
CE11017_Temp = mean(E11017)';

```

```

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1017,RE1017,dE1017] = lssphere(E1017, CE1017_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5017,RE5017,dE5017] = lssphere(E5017, CE5017_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8017,RE8017,dE8017] = lssphere(E8017, CE8017_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11017,RE11017,dE11017] = lssphere(E11017, CE11017_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 17

D1017 = sqrt(sum(minus(CE5017,CE1017).^2));% Bola 1-5
D2017 = sqrt(sum(minus(CE8017,CE1017).^2));% Bola 1-8
D3017 = sqrt(sum(minus(CE11017,CE1017).^2));% Bola 1-11
D4017 = sqrt(sum(minus(CE8017,CE5017).^2));% Bola 5-8
D5017 = sqrt(sum(minus(CE11017,CE5017).^2));% Bola 5-11
D6017 = sqrt(sum(minus(CE11017,CE8017).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O17 = [abs(D1017-D1n) abs(D2017-D2n) abs(D3017-D3n) abs(D4017-
D4n)...
abs(D5017-D5n) abs(D6017-D6n)];

%-----Orientacion 18 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1018_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
18\orientacion 18_esfera 1.txt');
E5018_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
18\orientacion 18_esfera 4.txt');

E8018_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
18\orientacion 18_esfera 7.txt');
E11018_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
18\orientacion 18_esfera 10.txt');

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1018 = E1018_Temp(1:9,1:3);
E5018 = E5018_Temp(1:9,1:3);
E8018 = E8018_Temp(1:9,1:3);
E11018 = E11018_Temp(1:9,1:3);

```

```

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1018_Temp = mean(E1018)';
CE5018_Temp = mean(E5018)';
CE8018_Temp = mean(E8018)';
CE11018_Temp = mean(E11018)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1018,RE1018,dE1018] = lssphere(E1018, CE1018_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5018,RE5018,dE5018] = lssphere(E5018, CE5018_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8018,RE8018,dE8018] = lssphere(E8018, CE8018_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11018,RE11018,dE11018] = lssphere(E11018, CE11018_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 18

D1018 = sqrt(sum(minus(CE5018,CE1018).^2));% Bola 1-5
D2018 = sqrt(sum(minus(CE8018,CE1018).^2));% Bola 1-8
D3018 = sqrt(sum(minus(CE11018,CE1018).^2));% Bola 1-11
D4018 = sqrt(sum(minus(CE8018,CE5018).^2));% Bola 5-8
D5018 = sqrt(sum(minus(CE11018,CE5018).^2));% Bola 5-11
D6018 = sqrt(sum(minus(CE11018,CE8018).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O18 = [abs(D1018-D1n) abs(D2018-D2n) abs(D3018-D3n) abs(D4018-
D4n)...
             abs(D5018-D5n) abs(D6018-D6n)];

%-----Orientacion 19 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1019_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
19\orientacion 19_esfera 1.txt');
E5019_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
19\orientacion 19_esfera 4.txt');
E8019_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
19\orientacion 19_esfera 7.txt');
E11019_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
19\orientacion 19_esfera 10.txt');

```

```

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1O19 = E1O19_Temp(1:9,1:3);
E5O19 = E5O19_Temp(1:9,1:3);
E8O19 = E8O19_Temp(1:9,1:3);
E11O19 = E11O19_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1O19_Temp = mean(E1O19)';
CE5O19_Temp = mean(E5O19)';
CE8O19_Temp = mean(E8O19)';
CE11O19_Temp = mean(E11O19)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1O19,RE1O19,dE1O19] = lssphere(E1O19, CE1O19_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5O19,RE5O19,dE5O19] = lssphere(E5O19, CE5O19_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8O19,RE8O19,dE8O19] = lssphere(E8O19, CE8O19_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11O19,RE11O19,dE11O19] = lssphere(E11O19, CE11O19_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 19

D1O19 = sqrt(sum(minus(CE5O19,CE1O19).^2));% Bola 1-5
D2O19 = sqrt(sum(minus(CE8O19,CE1O19).^2));% Bola 1-8
D3O19 = sqrt(sum(minus(CE11O19,CE1O19).^2));% Bola 1-11
D4O19 = sqrt(sum(minus(CE8O19,CE5O19).^2));% Bola 5-8
D5O19 = sqrt(sum(minus(CE11O19,CE5O19).^2));% Bola 5-11
D6O19 = sqrt(sum(minus(CE11O19,CE8O19).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O19 = [abs(D1O19-D1n) abs(D2O19-D2n) abs(D3O19-D3n) abs(D4O19-
D4n)...
abs(D5O19-D5n) abs(D6O19-D6n)];

%-----Orientacion 20 de Plataforma Superior. Bola 1 4 7 10-----
-----

E1O20_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
20\orientacion 20_esfera 1.txt');
E5O20_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
20\orientacion 20_esfera 4.txt');
E8O20_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
20\orientacion 20_esfera 7.txt');
E11O20_Temp =
load('C:\Users\Ricardo\Desktop\TESIS\Orientaciones\RICARDO\orientacion
20\orientacion 20_esfera 10.txt');

```

```

% Quedarse solamente con las coordenadas X,Y,Z.

E1O20 = E1O20_Temp(1:9,1:3);
E5O20 = E5O20_Temp(1:9,1:3);
E8O20 = E8O20_Temp(1:9,1:3);
E11O20 = E11O20_Temp(1:9,1:3);

% Estimacion del centro de la esfera (media de los puntos)

CE1O20_Temp = mean(E1O20)';
CE5O20_Temp = mean(E5O20)';
CE8O20_Temp = mean(E8O20)';
CE11O20_Temp = mean(E11O20)';

% Calculo del centro de las esferas medidas

[CE1O20,RE1O20,dE1O20] = lssphere(E1O20, CE1O20_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE5O20,RE5O20,dE5O20] = lssphere(E5O20, CE5O20_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE8O20,RE8O20,dE8O20] = lssphere(E8O20, CE8O20_Temp, radio, .00001,
.00001);
[CE11O20,RE11O20,dE11O20] = lssphere(E11O20, CE11O20_Temp, radio, .00001,
.00001);

% Distancias entre esferas medidas en Orientacion 20

D1O20 = sqrt(sum(minus(CE5O20,CE1O20).^2));% Bola 1-5
D2O20 = sqrt(sum(minus(CE8O20,CE1O20).^2));% Bola 1-8
D3O20 = sqrt(sum(minus(CE11O20,CE1O20).^2));% Bola 1-11
D4O20 = sqrt(sum(minus(CE8O20,CE5O20).^2));% Bola 5-8
D5O20 = sqrt(sum(minus(CE11O20,CE5O20).^2));% Bola 5-11
D6O20 = sqrt(sum(minus(CE11O20,CE8O20).^2));% Bola 8-11

% Errores en distancia en esta posicion

Error_O20 = [abs(D1O20-D1n) abs(D2O20-D2n) abs(D3O20-D3n) abs(D4O20-
D4n)...
abs(D5O20-D5n) abs(D6O20-D6n)];

ErroresDistancia = [Error_O1 Error_O2 Error_O3 Error_O4 Error_O5
Error_O6...
Error_O7 Error_O8 Error_O9 Error_O10 Error_O11
Error_O12...
Error_O13 Error_O14 Error_O15 Error_O16 Error_O17
Error_O18 Error_O19...
Error_O20];

```

```

%% Grafica de los errores en distancia por coordenada y punto

Common = linspace(1,6,6);

% Graficar errores en distancia de orientacion 1 de la barra patron
h1 = figure(1);
h1 = plot(Common,Error_O1,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .140]);
set(gca,'Ytick',0:.02:.150,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.145],'String','ORIENTACIÓN 1 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 2 de la barra patron
h2 = figure(2);
h2 = plot(Common,Error_O2,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .09]);
set(gca,'Ytick',0:.01:.09,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);

text('Position',[1.8,.094],'String','ORIENTACIÓN 2 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 3 de la barra patron
h3 = figure(3);
h3 = plot(Common,Error_O3,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .110]);
set(gca,'Ytick',0:.01:.110,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.114],'String','ORIENTACIÓN 3 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 4 de la barra patron
h4 = figure(4);
h4 = plot(Common,Error_O4,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .07]);
set(gca,'Ytick',0:.01:.07,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.073],'String','ORIENTACIÓN 4 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');

```

```

set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 5 de la barra patron
h5 = figure(5);
h5 = plot(Common,Error_O5,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .05]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.05,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.052],'String','ORIENTACIÓN 5 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 6 de la barra patron
h6 = figure(6);
h6 = plot(Common,Error_O6,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .02]);
set(gca,'Ytick',0:.002:.02,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);

text('Position',[1.8,.021],'String','ORIENTACIÓN 6 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 7 de la barra patron
h7 = figure(7);
h7 = plot(Common,Error_O7,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .012]);
set(gca,'Ytick',0:.001:.012,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.0125],'String','ORIENTACIÓN 7 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 8 de la barra patron
h8 = figure(8);
h8 = plot(Common,Error_O8,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .8]);
set(gca,'Ytick',0:.1:.8,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.83],'String','ORIENTACIÓN 8 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 9 de la barra patron
h9 = figure(9);
h9 = plot(Common,Error_O9,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .03]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.03,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.031],'String','ORIENTACIÓN 9 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 10 de la barra patron
h10 = figure(10);
h10 = plot(Common,Error_O10,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .025]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.025,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);

text('Position',[1.8,.026],'String','ORIENTACIÓN 10 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 11 de la barra patron
h11 = figure(11);
h11 = plot(Common,Error_O11,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .045]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.045,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.047],'String','ORIENTACIÓN 11 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 12 de la barra patron
h12 = figure(12);
h12 = plot(Common,Error_O12,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .009]);
set(gca,'Ytick',0:.001:.009,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.0095],'String','ORIENTACIÓN 12 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 13 de la barra patron
h13 = figure(13);
h13 = plot(Common,Error_O13,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .03]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.03,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.032],'String','ORIENTACIÓN 13 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 14 de la barra patron
h14 = figure(14);
h14 = plot(Common,Error_O14,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .036]);
set(gca,'Ytick',0:.006:.036,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);

text('Position',[1.8,.0375],'String','ORIENTACIÓN 14 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 15 de la barra patron
h15 = figure(15);
h15 = plot(Common,Error_O15,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .032]);
set(gca,'Ytick',0:.004:.032,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.033],'String','ORIENTACIÓN 15
BARRAPATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

% Graficar errores en distancia de orientacion 16 de la barra patron
h16 = figure(16);
h16 = plot(Common,Error_O16,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .055]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.055,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.057],'String','ORIENTACIÓN 16 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 17 de la barra patron
h17 = figure(17);
h17 = plot(Common,Error_O17,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .05]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.05,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.052],'String','ORIENTACIÓN 17 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 18 de la barra patron
h18 = figure(18);
h18 = plot(Common,Error_O18,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .035]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.035,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);

```

```

text('Position',[1.8,.0365],'String','ORIENTACIÓN 18 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 19 de la barra patron
h19 = figure(19);
h19 = plot(Common,Error_O19,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .05]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.05,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.052],'String','ORIENTACIÓN 19 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

% Graficar errores en distancia de orientacion 20 de la barra patron
h20 = figure(20);
h20 = plot(Common,Error_O20,'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 7]);
set(gca,'XTick',0:1:7,'FontSize',8);
xlabel('Error data','Fontweight','bold','FontSize',8);
ylim([0 .04]);
set(gca,'Ytick',0:.005:.04,'FontSize',8,'YGrid','off');
ylabel('Distance Errors (mm)','Fontweight','bold','FontSize',8);
text('Position',[1.8,.0415],'String','ORIENTACIÓN 20 BARRA
PATRÓN','Fontweight','bold','FontSize',10,'color','r');
set(gcf,'color','w');

```

```

h = 0;

```