

UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE UN BRAZO
ARTICULADO PARA LA MEDICIÓN DE COORDENADAS EN
UNA INDUSTRIA DE MÁQUINA HERRAMIENTA

T E S I S

PRESENTADA POR

ILSE GUADALUPE ENCINAS OSUNA

Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener el
grado de Maestra en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS
DR. AGUSTÍN BRAU ÁVILA

CODIRECTOR
DR. VÍCTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

MAYO 2018

Universidad de Sonora

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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 16 de mayo de 2018

ILSE GUADALUPE ENCINAS OSUNA

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestra en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE UN BRAZO ARTICULADO PARA LA MEDICIÓN DE COORDENADAS EN UNA INDUSTRIA DE MÁQUINA HERRAMIENTA** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE



Dr. Agustín Brau Ávila
Director de Tesis y Presidente del Jurado



Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar
Codirector y Vocal del Jurado



Dra. Margarita Valenzuela Galván
Secretaria del Jurado



Dr. Jesús Horacio Pacheco Ramírez
Vocal del Jurado

Tecate, Baja California, a 08 de mayo de 2018.

ILSE GUADALUPE ENCINAS OSUNA

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Sonora, otorgo a usted mi aprobación de la fase escrita del examen profesional, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestra en Ingeniería.

Por tal motivo, como sinodal externo y vocal del jurado, extiendo mi autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE UN BRAZO ARTICULADO PARA LA MEDICIÓN DE COORDENADAS EN UNA INDUSTRIA DE MÁQUINA HERRAMIENTA** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE



DR. ARTURO SINUE ONTIVEROS ZEPEDA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Sinodal Externo y Vocal del Jurado

RESUMEN

La necesidad de verificación y certificación de los procesos de fabricación de las empresas ha aumentado considerablemente en el sector industrial, debido a la importancia de asegurar la calidad y el cumplimiento de las tolerancias de las características físicas establecidas en el diseño de los productos. Para verificar el cumplimiento de esas tolerancias, las industrias han optado por utilizar sistemas de medición por coordenadas portátiles como los Brazos Articulados de Medición por Coordenadas (BAMC), debido a su alta portabilidad y flexibilidad para realizar mediciones de geometrías complejas, además de su bajo costo en comparación con las Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) tradicionales. En este trabajo se realizaron procedimientos de verificación y evaluaciones para identificar si las variaciones de medición realizadas por un BAMC, marca Faro Platinum de 7 grados de libertad, se encuentran dentro de los márgenes de error establecidos por el fabricante del brazo. Así mismo se realizó una optimización de los parámetros cinemáticos del brazo de medición. También se expone la creación y desarrollo de una interface realizada en la plataforma de Matlab, misma que permite capturar los datos de las coordenadas de medición para realizar la verificación, cálculo del error volumétrico del brazo y posteriormente llevar a cabo la optimización de los parámetros cinemáticos de un BAMC. Este proyecto se desarrolla para la empresa NORTECH TECHNOLOGIES, la cual produce piezas de un accesorio automotriz para sus clientes. La empresa requiere llevar a cabo certificaciones de sus piezas las cuales, debido a su geometría y tolerancias requeridas, no se pueden medir con instrumentos de medición convencionales como los son: el calibrador vernier, micrómetro, indicador de altura, entre otros.

ABSTRACT

The necessity about certification and verification in manufacturing process in enterprises has increased especially in industries seeking to achieve the quality and different requirements in product design. To verify those requirements, up to now industries have decided to use portable coordinate measurement system like articulated arms of measurement by coordinates (AAMC) as a result of high portability and flexibility for making complex geometries measurements, besides the low cost comparing the traditional measurement coordinates machines (MCM).

In this document, some procedures about verification and evaluation have been made to identify if variations from an AAMC faro platinum with seven degrees of freedom is within error margins considered by the manufacturer. Also includes an optimization of kinematic parameters of measurement arm. Furthermore, this work includes the development and creation of an interface made in Matlab platform which is useful for capturing data coming from measurement coordinates making it possible the verification, calculate volumetric error in arm, and later get the optimization of kinematic parameters about an AAMC. The project will be operated in NORTECH TECHNOLOGIES which produces automotive accessories for their clients. It is mandatory for the enterprise to certificate every tool and is clear than tolerance and geometry can not be measured by conventional instruments like Vernier calliper, micrometer, height indicator, and others.

DEDICATORIAS

“Si quieres ir a la cima de una colina para ver el paisaje desde lo más alto, tendrás que pasar primero por un valle igual de profundo. Si no fuera así, no sería justo”.

A Dios por guiarme y señalar el mejor camino. A mis padres Leticia y Renato, mis hermanos Lety e Irvin, a mi novio Arnold y a mis compañeros y amigos de posgrado que me brindaron un gran apoyo durante esta importante etapa.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por brindarme salud y fuerza, por guiarme en mi camino, a pesar de los obstáculos que se presentan en la vida, para poder continuar exitosamente con mi desarrollo personal y profesional.

A mis padres Renato Encinas y Leticia Osuna quienes siempre me han cuidado, amado y apoyado. Desde pequeña me han inculcado que debo esforzarme para lograr las metas y objetivos que me planteo y este es un ejemplo de ello.

A mis hermanos Leticia Encinas e Irvin Encinas por acompañarme en este logro, también los acompañaré en los suyos mientras Dios quiera.

A mi novio Arnold quien por más de 5 años me ha dado su amor incondicional, su compañía y su apoyo en cada proyecto de mi vida. Por seguir a mi lado en los malos y los más felices momentos, siempre tomándome de la mano.

A mi director de tesis, el Dr. Agustín Brau, quien estuvo guiándome a lo largo de este proyecto. Por sus consejos y por ser un buen compañero de viaje.

A mis compañeros y amigos del posgrado porque su apoyo, compañerismo y amistad fue un impulsor para lograr este éxito, agradezco haber empezado esta etapa con ustedes y el poder vernos ahora cumpliendo nuestros objetivos y metas. A los profesores de posgrado por sus compartir sus conocimientos durante este proceso.

Al coordinador de la maestría, el Dr. Alonso Pérez, quien siempre nos tuvo mucha paciencia y estuvo al pendiente de nosotros viendo que cumpliéramos nuestros objetivos y responsabilidades.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad Educativa (PFCE) por su apoyo económico, el cual me facilitó en gran medida el logro de esta meta.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
DEDICATORIAS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.Presentación	2
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos Específicos	3
1.5. Hipótesis	4
1.6. Alcances y Delimitaciones	4
1.7. Justificación.....	4
2. MARCO DE REFERENCIA	5
2.1. Brazo articulado de medición por coordenadas.....	5
2.1.1. Componentes de los brazos articulados de medición por coordenadas.....	7
a) Encoders.....	7
b) Palpadores.....	9
2.2. Verificación y calibración.....	11
2.2.1. Patrón de calibración	11
2.2.2 Normas/ procedimientos de verificación	13

A. Norma ASME B89.4.22	14
B. Norma ISO / DIS 10360-2.....	20
C. Evaluación de precisión de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado según VDI / VDE 2617-9	20
2.2.3 Técnicas de calibración y evaluación de precisión de bamc	20
2.2.4. Captura de puntos.....	22
2.4. Modelo cinemático	23
2.4.1. Algoritmo denavit hartenberg	23
3. METODOLOGÍA	32
3.1. Fase 1: verificación	34
3.1.1.Método de Verificación.....	35
3.2. Fase 2: Desarrollo de modelo cinemático.....	37
3.2.1 Modelado cinemático	40
3.2.2 Representación de modelo Denavit-Hartenberg.....	43
3.2.3 Optimización	44
3.3. Fase 3: Implementación.....	47
4. IMPLEMENTACIÓN.....	51
4.1. Verificación.....	51
4.2. Desarrollo de modelo cinemático.....	54
4.3 Optimización	56
4.3.1Diseño de Interface	60
4.6 Aplicación.....	61
5. RESULTADOS.....	64
6. CONCLUSIONES.....	67
7. REFERENCIAS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 <i>Brazo articulado de medición por coordenadas (BAMC). Universidad de Sonora.</i>	6
Figura 2.2 <i>Palpadores para BAMC. FARO.</i>	6
Figura 2.3 <i>Configuraciones de brazos de medición por coordenadas. ASME B89.4.22-2004.</i>	7
Figura 2.4 <i>Encoders angulares en BAMC. Romer, Heidenhain.</i>	8
Figura 2.5 <i>Palpadores pasivos para BAMC. FARO, Romel.</i>	9
Figura 2.6 <i>Palpadores touch trigger para BAMC. FARO, Romel, Renishaw.</i>	10
Figura 2.7 <i>Palpadores sin contacto de BAMC. FARO, Romel.</i>	10
Figura 2.8 <i>Tipos de patrones: barras, cubos, bases y tetraedros de bolas. Unimetrik S.A.</i>	12
Figura 2.9 <i>Patrón barra de esferas. Universidad de sonora, área de metrología.</i>	13
Figura 2.10 <i>Posiciones de ensayo en prueba de repetibilidad de punto. ASME B89.4.22-2004.</i>	15
Figura 2.11 <i>Posiciones de articulación del brazo en prueba de repetibilidad de punto. ASME B89.4.22-2004.</i>	16
Figura 2.12 <i>Numeración de octantes del volumen de medida de un BAMC. ASME B89.4.22-2004.</i>	18
Figura 2.13. <i>Posiciones de ensayo de evaluación de rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004.</i>	19
Figura 2.14 <i>Modelo Denavit – Hartenberg. Denavit-Hartenberg, 1955</i>	24
Figura 3.1. <i>Diagrama de metodología general (elaboración propia).</i>	34
Figura 3.2. <i>Diagrama Fase 1 (elaboración propia).</i>	35
Figura 3.3. <i>Diagrama Fase 2 (elaboración propia).</i>	38

Figura 3.4. <i>Disposición de articulaciones en brazo. FARO Platinum.</i>	38
Figura 3.5 <i>Relación entre el origen del sistema de medida y el modelo (Acero, 2015).</i>	39
Figura 3.6. <i>Rotaciones del sistema (x_1, y_1, z_1) respecto al sistema (x_0, y_0, z_0).</i>	43
Figura 3.7 <i>Funcionamiento de la interface optimización.</i>	46
Figura 3.8. <i>Diagrama Fase 3 (elaboración propia)</i>	48
Figura 3.9. <i>Interface final.</i>	48
Figura 3.10. <i>Funcionamiento de Interface, implementación.</i>	49
Figura 4.1. <i>Orientaciones verticales, horizontales e inclinadas de la barra patrón para la verificación de BAMC (Elaboración propia).</i>	51
Figura 4.2. <i>Interfaz para captura de datos del procedimiento de verificación de un BAMC.</i>	52
Figura 4.3. <i>Captura de puntos en esferas de la barra patrón.</i>	53
Figura 4.4 <i>Sistemas de coordenadas en posición inicial para brazo FARO Platinum según modelo D-H.</i>	55
Figura 4.5. <i>Valores de los parámetros optimizados.</i>	61
Figura 4.6. <i>Pieza automotriz a certificar.</i>	61
Figura 4.7. <i>Secciones y formas de la pieza a medir.</i>	62
Figura 4.8. <i>Proceso de medición de la pieza.</i>	62
Figura 4.9. <i>Resultados de medición de la pieza con el BAMC.</i>	63
Figura 5.1. <i>Esferas medidas de la barra patrón utilizada.</i>	64
Figura 5.2. <i>Errores de BAMC antes y después de la optimización de parámetros.</i> ...	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Verificación y calibración de brazos. Elaboración propia.</i>	14
Tabla 2.2 <i>Definición de posiciones y parámetros ensayo de evaluación del rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004.</i>	19
Tabla 3.1. <i>Coordenadas promedio y valores de diámetro de esferas para la calibración de la barra de esferas patrón.</i>	33
Tabla 4.1. <i>Valores iniciales de parámetros geométricos de un BAMC.</i>	56
Tabla 5.1. <i>Valores óptimos de parámetros.</i>	65

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente competitividad global en el sector industrial, ha aumentado la necesidad de verificar y certificar que los procesos de fabricación cumplan con las tolerancias de diseño establecidas, para asegurar el control de calidad en los sistemas de producción.

Para realizar la certificación de piezas, las máquinas de medición por coordenadas (MMC) son uno de los equipos más utilizados en el sector industrial, sin embargo, estas máquinas implican un costo elevado con respecto a otros equipos de medición convencionales, requieren de personal técnico calificado, además de ser necesario un área acondicionada para su uso y que permita controlar las condiciones ambientales. Debido a los inconvenientes mencionados anteriormente, las industrias han optado por utilizar los sistemas de medición por coordenadas portátiles como los Brazos Articulados de Medición por Coordenadas (BAMC), debido a su flexibilidad, fácil transporte y bajo costo en comparación con una MMC.

Los BAMC son máquinas de estructura similar a un brazo humano, controladas por un operario cuya función principal es la inspección de piezas mediante la medición de puntos en su superficie (González, 2013).

Este trabajo consiste en realizar una verificación volumétrica de un BAMC que permita cuantificar el error de medición del mismo y posteriormente, de ser necesario, llevar a cabo una optimización de los parámetros cinemáticos del brazo articulado para minimizar el error cometido en los resultados de las mediciones. Además, será necesario desarrollar una interface en un lenguaje de programación para tener la comunicación entre el software y el BAMC, permitiendo realizar mediciones de las primitivas geométricas que requiere medir la industria de máquina herramienta con el brazo de medición.

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema y la situación actual de la empresa donde se desarrollará la tesis, así como los objetivos generales y

específicos que se pretenden llevar a cabo entorno al problema, además de la justificación y las delimitaciones.

1.1. Presentación

El proyecto se desarrollará para la empresa NORTECH TECHNOLOGIES, la cual produce piezas de un accesorio automotriz para sus clientes. La empresa requiere llevar a cabo certificaciones en piezas de manera económica, ya que la empresa no cuenta con aparatos propios para la medición y en la actualidad los costos por este tipo de servicio por parte de empresas externas son muy elevados. Debido a su geometría y tolerancias requeridas, las piezas no se pueden medir con instrumentos de medición convencionales como lo son: el calibrador vernier, micrómetro, indicador de altura, entre otros.

La certificación de las piezas fabricadas es un requisito de los clientes para asegurar que las piezas cumplen con las tolerancias especificadas. La falta de certificación puede tener como consecuencia que los clientes devuelvan las piezas a la empresa y dañar su imagen, además de perder posibles proyectos futuros con sus clientes. Por esta razón, la empresa considera que es de gran importancia contar con una certificación que compruebe el cumplimiento con las tolerancias establecidas en las mediciones de las piezas para asegurar la calidad y confiabilidad en las mediciones.

El laboratorio de metrología de la Universidad de Sonora puede llevar a cabo el servicio de certificación de las piezas requeridas, utilizando un brazo articulado de medir por coordenadas de la marca Faro, Platinum, de 7 grados de libertad y un volumen de medición de 2.4 metros.

El BAMC no cuenta con una calibración reciente por lo que sus mediciones no son confiables y no se conoce de manera exacta la cuantificación del error cometido por el brazo. Así mismo, no se cuenta con una comunicación entre el software y el BAMC que permita realizar mediciones de las primitivas geométricas requeridas por la empresa. Debido a la falta de calibración del BAMC, el Centro de Asistencia Metrológica (CAM) de la Universidad no puede realizar la certificación de las piezas

de la industria antes mencionada y tampoco puede ofrecer sus servicios de medición a otros clientes potenciales.

1.2. Planteamiento del Problema

El BAMC no cuenta con una calibración actualizada, lo cual puede generar errores mayores a los permitidos por la norma ASME B89.4.22. Esto tiene como consecuencia la falta de confiabilidad en las mediciones, provocando que no se puedan ofrecer los servicios de certificación de las piezas fabricadas en la industria.

Actualmente no se cuenta en el departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas con ninguna interface que permita realizar mediciones de primitivas geométricas con el BAMC, lo cual ayudaría a la empresa con las mediciones de sus piezas.

1.3. Objetivo General

Optimizar los parámetros cinemáticos de un BAMC por medio de la programación de una interface que permita la comunicación entre el brazo de medición y la plataforma de programación utilizada y proceder a realizar la certificación de las piezas fabricadas por la industria Nortech Technologies.

1.4. Objetivos Específicos

- Realizar la verificación volumétrica del BAMC para cuantificar el error de medición del brazo de acuerdo a la norma ASME B89.4.22
- Desarrollar el modelo cinemático del BAMC de acuerdo a la metodología propuesta por Denavit-Hartenberg.
- Diseñar una interfaz con un lenguaje compatible con el brazo de medición, con las funciones de medición de las primitivas geométricas necesarias para la certificación de las piezas.
- Identificación y optimización de parámetros cinemáticos del BAMC, comprobando la disminución de errores en la medición por parte del

brazo y así realizar la certificación en las piezas fabricadas por la industria.

1.5. Hipótesis

La optimización de los parámetros cinemáticos del brazo articulado, minimizaría los errores en los resultados de las mediciones en las piezas en una industria de máquina herramienta.

1.6. Alcances y Delimitaciones

El proyecto se limitará a la calibración del brazo para la optimización de sus parámetros cinemáticos y en el desarrollo de una interface que comunique el BAMC con una plataforma de programación Matlab.

1.7. Justificación

La realización del proyecto permitirá resolver un problema de una industria de máquinas herramientas, la cual necesita certificar sus piezas y no se cuenta con los instrumentos de medición adecuados para realizar las mediciones.

La certificación de piezas realizadas por empresas externas tiene un costo muy elevado, por lo que las empresas buscan la manera de conseguir sus propios aparatos de medición o buscar empresas que puedan brindarles el servicio de certificar sus piezas al menor costo posible.

Una manera de dar solución al problema de la industria de máquina herramienta es utilizar un instrumento de medición portátil que se encuentra dentro de la Universidad de Sonora, el cual actualmente no cuenta con una calibración vigente, por lo que es necesario realizar una optimización de parámetros del BAMC y ajustarlo para que cumpla las tolerancias establecidas en la industria.

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se muestran los conceptos y el estado del arte relacionado con los brazos articulados de medición por coordenadas, sus componentes, las técnicas de evaluación mostradas en aportaciones científicas de autores especializados en el área y también se habla sobre la normativa aplicable en la que se basan estos procedimientos de calibración y verificación.

2.1. Brazo articulado de medición por coordenadas.

Durante los últimos años, los brazos articulados de medición por coordenadas BAMC han adquirido gran popularidad dentro de la industria, debido a que son fáciles de transportar y por su bajo costo comparado con otros equipos de medición por coordenadas como una MMC (Zheng et al. 2016). Los BAMC pueden realizar inspecciones de piezas con formas geométricas básicas. Actualmente pueden verificar piezas de formas complejas o irregulares con complementos como scanner (Encinas, 2017).

Los BAMC (figura 2.1) son máquinas no automatizadas que son controladas por un operador que tiene como función realizar mediciones de piezas, mediante la captura de puntos en su superficie, para certificar que las piezas cumplan con las tolerancias de dimensión establecidas (Encinas, 2017).



Figura 2.1 Brazo articulado de medición por coordenadas (BAMC). Universidad de Sonora.

La estructura de un BAMC está compuesta por segmentos unidos entre sí por articulaciones rotativas con dos extremos. El BAMC es una máquina manual por lo que el operador tiene la libertad de controlar el movimiento y las articulaciones del brazo. Un extremo es fijo en una posición base y el otro es libre. En el extremo libre se encuentra un palpador, Figura 2.2, similar al utilizado por las MMC y que es el encargado de obtener las coordenadas de los puntos de contacto con cualquier pieza a medir (González, 2013).



Figura 2.2 Palpadores para BAMC. FARO.

Podría decirse que un BAMC está constituido por tres articulaciones, las cuales de acuerdo a la norma ASME B89.4.22 se denominan hombro, codo y muñeca. Esta

última es llamada así por la similitud con la mano humana y es el lugar donde se sitúa el palpador. Cada articulación cuenta con rotaciones o grados de libertad las cuales se clasifican como brazo 2-2-2 (6 grados de libertad) y brazo 2-2-3 (siete grados de libertad). Estos dos son definidas por una secuencia de letras a, b, c, d, e, f, hasta g, esto se divide en hombro (a, b), codo (c, d), muñeca (e, f, g) tal como se muestra en la Figura 2.3.

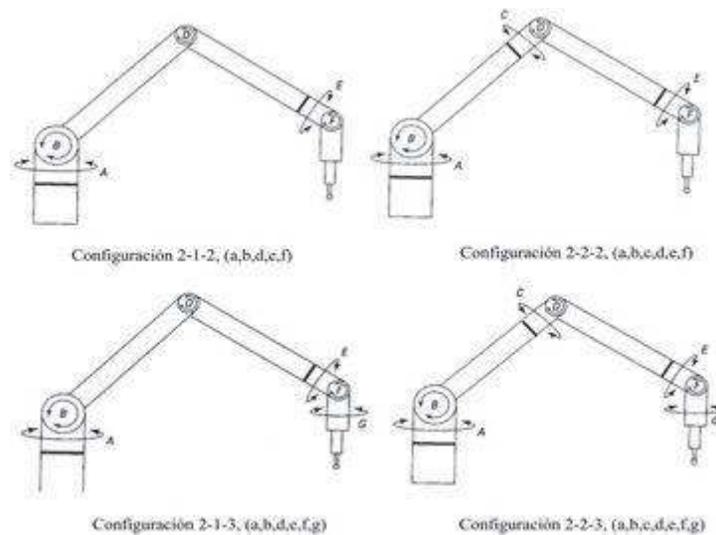


Figura 2.3 Configuraciones de brazos de medición por coordenadas. ASME B89.4.22-2004.

2.1.1. Componentes de los brazos articulados de medición por coordenadas

A continuación, se describen los diferentes componentes con los que cuenta un brazo articulado de medición por coordenadas.

a) Encoders

El componente principal de un BAMC son los encoders de las articulaciones como se muestra en la Figura 2.4. De acuerdo con Acero (2015) estos están relacionados

con las articulaciones del brazo por medio de parámetros geométricos del modelo cinemático del BAMC. Los Encoders son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. West Instruments (2012) menciona que existen dos tipos de encoders, uno está enfocado en la rotación (encoders angulares), y el otro en la detección de movimientos lineales (encoders lineales). Ambos tipos de encoders cuentan con dos clasificaciones dependiendo del tipo de datos de salida que se necesite manejar.



Figura 2.4 Encoders angulares en BAMC. Romer, Heidenhain.

Encoders Incrementales: proporcionan pulsos por cada ángulo de giro de movimiento lineal como dato de salida espaciado por revoluciones, pulgadas o milímetros. Consta de dos canales de salida llamados A y B. Si se utiliza solo un canal de salida (A) se considera un encoder incremental unidireccional, en este caso no se toma en cuenta la dirección de rotación. Si es necesario tomar en cuenta la rotación del eje, entonces se utilizan los dos canales de salida (A y B) los cuales son de 90° eléctricos desfasados, a este tipo de encoder se le conoce como incremental bidireccional (West Instruments, 2012).

Encoders Absolutos: Los encoder absolutos proporcionan como dato de salida un código absoluto para cada posición angular de acuerdo a la información obtenida (Mecafenix, 2018).

Los encoders absolutos realizan en todo momento una búsqueda de información de su posición para después darle a cada posición un código único, incluso durante

varias revoluciones (Mecafenix, 2018). Esta cualidad es útil si se emplea en equipos que funcionan ingresando energía de forma pausada entre cada uso pues, como menciona West Instruments (2012), si se detiene la entrada de energía, los datos de salida se modifica al reestablecer la energía, es decir, no es necesario regresar de nuevo a la posición de referencia. Por lo tanto, los encoders absolutos no pierden la posición eliminando la necesidad de la búsqueda del cero del equipo (Acero, 2015).

b) Palpadores

Otro de los componentes de los BAMC son los palpadores. En la mayoría de los casos, estos se presentan como una esfera que se encuentra en la última articulación del brazo y es solidario a ésta. Están diseñados para medición por contacto entre el palpador y la superficie de la pieza a partir de la captura de puntos. De acuerdo con Weckenmann, (2004) los palpadores se dividen en tres grupos: palpadores pasivos, palpadores activos (touch- trigger) y palpadores sin contacto.

Los palpadores pasivos o por contacto, Figura 2.5, requieren un contacto entre el palpador y la superficie de la pieza a medir (Weckenmann, 2004). Este tipo de palpadores son termosensibles por lo que es necesario hacer correcciones térmicas constantes en el lugar donde se realizan las mediciones, pues los cambios de temperatura podrían influir en los resultados de las capturas de coordenadas (Encinas, 2017). Actualmente, los palpadores se fabrican con materiales con bajo coeficiente de dilatación como la cerámica (Acero, 2015).

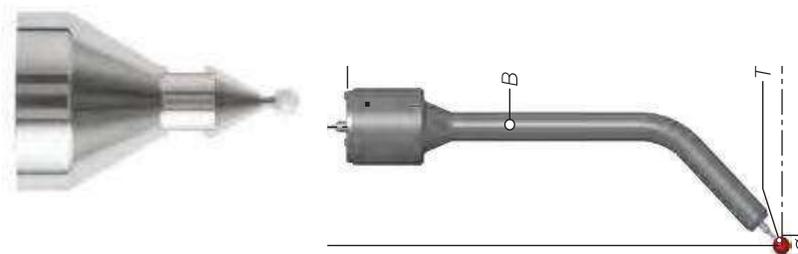


Figura 2.5 *Palpadores pasivos para BAMC. FARO, Romel.*

Los palpadores activos o touch trigger, Figura 2.6, constan de una punta esférica unida a un vástago que, a su vez, está unido a un soporte que dispone de tres pares de esferas separadas en intervalos de 120° alrededor del eje del vástago. Estas tres parejas de esferas se apoyan en tres cilindros, formando un acoplamiento cinemático, que proporciona una excelente repetibilidad de posicionamiento al restringir los seis grados de libertad del sistema (Mitutoyo, (2014).



Figura 2.6 Palpadores touch trigger para BAMC. FARO, Romel, Renishaw.

Los palpadores sin contacto, basados principalmente en sistemas de medición láser, han tenido un gran auge en su utilización conjunta con brazos de medición por coordenadas. Estos palpadores son generalmente utilizados en aplicaciones que no requieran una alta precisión como la digitalización y modelado 3D, ingeniería inversa o prototipado rápido. Existen palpadores sin contacto para medición de piezas con geometrías específicas como tubos de difícil medición con otro tipo de equipos (Mitutoyo, (2014). Un ejemplo de estos palpadores puede apreciarse en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Palpadores sin contacto de BAMC. FARO, Romel.

2.2. Verificación y calibración

2.2.1. Patrón de calibración

Para realizar los procesos de calibración y verificación de instrumentos portátiles de medición, es necesario disponer de patrones o elementos calibrados, que permitan establecer las dimensiones de referencia con respecto a las cuales se calcularán los errores derivados del proceso de medición (Acero, 2015).

Para los BAMC, existen patrones de calibración encargados de establecer dimensiones de referencia, y son utilizados para realizar la verificación de los brazos de medir por coordenadas determinando su error de medición. (Encinas 2016). En este punto, muchos de los trabajos se basan en patrones ya establecidos para MMC, principalmente patrones lineales con esferas o planos distribuidos a lo largo de su dimensión principal. Con el paso del tiempo los autores han adaptado, hasta cierto punto, o diseñado patrones para las características de los brazos de medir por coordenadas (González, 2013).

Existen una gran variedad de objetos patrones utilizados en la verificación de máquinas de medir por coordenadas, para los que se han desarrollado métodos de verificación y cálculo de errores geométricos, minimizando el número de posiciones del patrón necesarias y aprovechando la capacidad de movimiento de la máquina de medida en un solo eje del sistema de referencia global. Este tipo de métodos se encargan de calcular, a partir de valores medidos por la máquina, los errores de posicionamiento en cada uno de sus tres ejes, así como el error de perpendicularidad de los mismos, por lo que se determina el error que físicamente comete la máquina al alcanzar una posición objetivo. En la verificación de máquinas de medir por coordenadas se utilizan patrones unidimensionales (bloques patrón, barra de esferas), bidimensionales (placas de esferas o agujeros) y tridimensionales (cubos o tetraedros de esferas) tal y como se puede ver en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Tipos de patrones: barras, cubos, bases y tetraedros de bolas. Unimetrik S.A.

Los patrones bidimensionales son los patrones más utilizados en las máquinas de medir por coordenadas para realizar procedimientos de verificación completa y los patrones tridimensionales para comprobación rápida del estado de la máquina o en procedimientos de verificación interna periódica. En el caso de brazos de medición por coordenadas, es importante analizar el máximo rango del volumen de trabajo del brazo durante la verificación, por lo cual, son de gran utilidad los patrones unidimensionales sencillos que puedan moverse fácilmente alrededor del equipo, adoptando posiciones definidas por la norma aplicable para la evaluación del brazo.

Santoralia (2010) menciona que a pesar de la creciente utilización de BAMC, en la actualidad existe una escasez de normas para evaluar estos instrumentos en los procedimientos de calibración y verificación, dando lugar a los fabricantes a aplicar sus propios procedimientos de evaluación, por lo que es imposible tener comparaciones fiables entre diferentes BAMC.

La norma ASME B89.4.22-2004 es la que establece los requisitos y métodos para especificar y evaluar el rendimiento de un BAMC (Brau et al, 2014). Además de aclarar la evaluación del desempeño del BAMC, esta norma tiene por objeto facilitar

la comparación de rendimiento entre los brazos por la terminología que unifica, la clasificación general de estos equipos, el tratamiento de los efectos ambientales, y el análisis de datos. Esta Norma trata de definir los métodos de ensayo más simples, capaces de producir resultados adecuados para la mayoría de los BAMC y no está destinada a sustituir pruebas más completas que pueden ser adecuadas para aplicaciones especiales (ASME B89.4.22, 2004).

Uno de los patrones más comunes que se utilizan para realizar la verificación y calibración de un BAMC es una barra patrón de esferas, como se muestra en la Figura 2.9, modelo ESCALON de 1950 mm de largo y 74 mm de ancho y que comprende 15 esferas de cerámica.

Las barras de esferas se utilizan ampliamente en procedimientos de calibración y verificación BAMC debido a su flexibilidad, alta precisión, bajo costo y fácil concepto de uso en comparación con otros tipos de patrones.

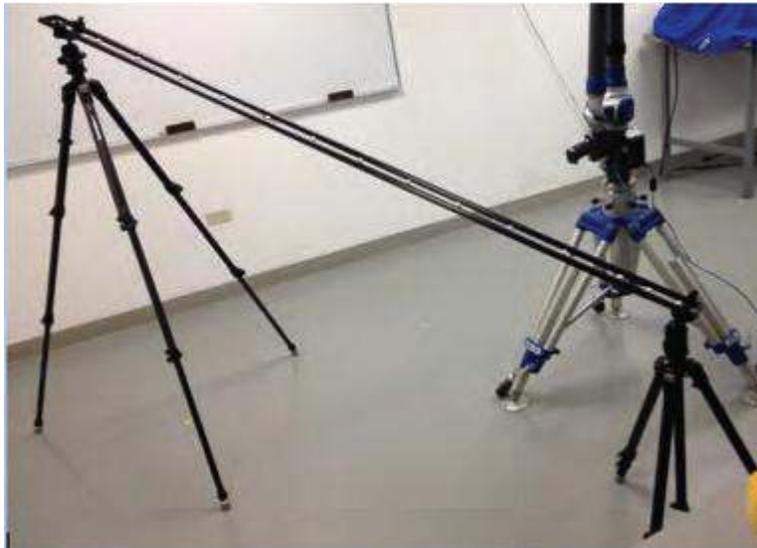


Figura 2.9 Patrón barra de esferas. Universidad de sonora, área de metrología.

2.2.2 Normas/ procedimientos de verificación

ASME B89.4.22-2004, VDI / VDE 2617 y la ISO 10360-12 parte 12-2014, siendo la última la más reciente, son las únicas normas establecidas y aceptadas que cuentan con metodologías para realizar la verificación de los BAMC (Acero, 2015).

Para llevar a cabo los procesos descritos en las normas anteriores, es necesario contar con patrones y artefactos calibrados como los mencionados en el apartado anterior, los cuales permitirán realizar el cálculo del error del brazo por medio de comparación a lo largo del proceso de medición. Las metodologías de estas normas pueden dividirse en los tres procesos siguientes: proceso de diámetro efectivo, proceso de repetibilidad de punto y proceso de precisión longitudinal volumétrica.

A. Norma ASME B89.4.22

La norma ASME B89.4.22 es una de las más utilizadas para evaluar el desempeño de los BAMC por medio de tres pruebas (Encinas, 2016).

Prueba	ASME B89.4.22-2004
a	Prueba de diámetro efectivo
b	Prueba de articulación de punto único
c	Prueba rendimiento volumétrico

Tabla 2.1. Verificación y calibración de brazos. Elaboración propia.

1) Prueba de diámetro efectivo

La prueba de diámetro efectivo aplicada de acuerdo a la norma ASME B89.4.22-2004 consiste en posicionar un patrón fijamente y que este contenga esferas calibradas, después se realizan mediciones al diámetro de las esferas las cuales son todas iguales con un diámetro entre 10 y 50 mm. Como marca la norma ASME B89.4.22-2004, las mediciones del diámetro se repiten tres veces tomando mínimo 9 puntos en cada prueba intentando articular lo menos posible el Brazo de medición (Agudelo et al. 2011) . El resultado de esta prueba muestra la diferencia entre los diámetros medidos de las esferas formándose así una desviación máxima con un valor absoluto, el cual puede compararse con la desviación dada por el fabricante del BAMC (Acero, 2015).

Los nueve puntos se utilizan para determinar una esfera utilizando un software compatible con el BAMC y el diámetro calculado.

La diferencia entre los diámetros de las esferas se declara como la desviación del diámetro. El valor de la prueba de rendimiento del diámetro efectivo se indica como la desviación máxima entre el diámetro de una esfera nominal y el diámetro de las esferas tres veces medidas realizadas. (Acero, 2015)

II) Prueba de articulación de punto único

Esta prueba, por diseño, incorpora aspectos de repetibilidad y reproducibilidad que son necesarios debido a la naturaleza única del BAMC.

La prueba de rendimiento de articulación de punto único busca evaluar la capacidad de un BAMC al realizar mediciones sobre un mismo punto intentando articular lo mas posible el Brazo sobre mismo punto de medición (Agudelo et al. 2011). La Figura 2.10 ilustra las tres ubicaciones de medición, recomendadas por la norma ASME B89.4.22, dentro del volumen de trabajo del BAMC para la prueba de rendimiento de articulación de punto único. La primera ubicación deberá estar dentro de un radio hasta el 20% de la longitud del brazo, centrada en el primer eje de rotación del BAMC. La segunda ubicación estará dentro de una zona definida por dos radios entre el 20% y el 80% de la longitud del brazo. La tercera ubicación deberá estar fuera de un radio mayor que el 80% de la longitud del brazo.

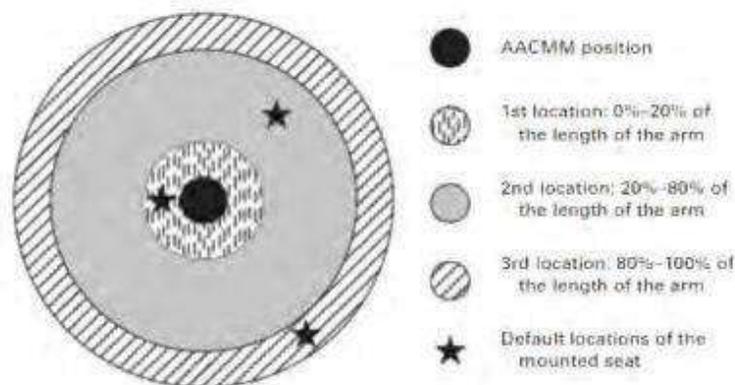


Figura 2.10 Posiciones de ensayo en prueba de repetibilidad de punto. ASME B89.4.22-2004.

La prueba de rendimiento de articulación de punto único se realiza midiendo coordenadas centrales del palpador de un BAMC en un asiento cinemático montado rígidamente.

Durante las mediciones, la norma ASME B89.4.22 recomienda colocar el brazo en diez orientaciones diferentes como las mostradas en la Figura 2.11, maximizando las orientaciones posibles de los ejes del BAMC. Como condición predeterminada, y observando la orientación de la muñeca, las cinco primeras de las diez orientaciones se realizarán de la siguiente manera: Si el operador está mirando hacia la máquina, las cinco posiciones del brazo pueden definirse como:

- brazo codo a la izquierda y hacia abajo
- codo a la izquierda y arriba
- codo hacia arriba
- codo a la derecha y arriba
- codo a la derecha y hacia abajo

El mismo patrón se repite 5 veces más, pero esta vez con la muñeca girada aproximadamente 180 grados.

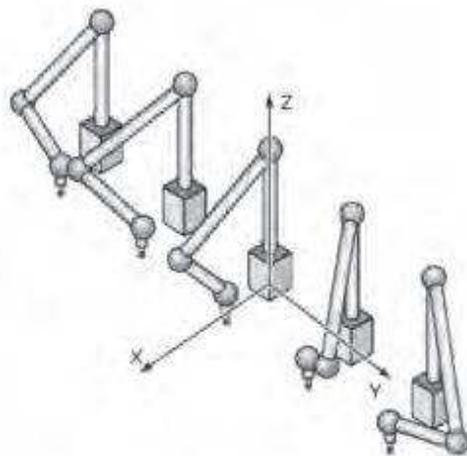


Figura 2.11 Posiciones de articulación del brazo en prueba de repetibilidad de punto. ASME B89.4.22-2004.

III) Prueba de rendimiento volumétrico

La prueba de rendimiento volumétrico busca evaluar la precisión de un BAMC en su volumen de trabajo. Esta prueba es aplicada respecto a la norma ASME B89.4.22-2004 y es utilizada para realizar la verificación de los BAMC. Esta prueba fue aplicada en el Artículo de Encinas et al. (2017) donde se realizó una verificación de un BAMC utilizando misma barra patrón y el mismo brazo de medición comentados en el capítulo 3 y 4 de esta tesis.

El enfoque general de esta prueba es posicionar el artefacto patrón en dos orientaciones verticales, diez orientaciones horizontales y ocho orientaciones de 45 grados. Para cada medida de longitud, el operador debe registrar cinco puntos de medición por cada característica de calibración en el artefacto patrón.

En esta prueba el volumen de trabajo del BAMC se dividirá en ocho octantes aproximadamente iguales. El volumen de trabajo del BAMC es una esfera cuyo radio está definido por toda la longitud del brazo y está centrado en la primera articulación del brazo.

El artefacto patrón recomendado por la norma ASME B89.4.22 es la barra de esferas, la cual está calibrada para la longitud de centro a centro, pero pueden usarse otros artefactos como un indicador de escalón. El artefacto patrón puede medirse en 20 posiciones sugeridas por la norma. Otras posiciones son aceptables siempre y cuando la zona de trabajo lo permita. La barra de esferas debe estar fijada adecuadamente en las posiciones indicadas para la medición, de modo que exista un contacto entre el palpador del BAMC y las esferas del patrón.

El volumen de trabajo del BAMC es una esfera cuyo radio está definido por toda la longitud del brazo y está centrado en la primera articulación del brazo. Esta esfera está dividida en hemisferios superior e inferior por un plano ecuatorial paralelo a la superficie sobre la que está montada la máquina. El plano ecuatorial se divide en cuatro cuadrantes, que crea ocho volúmenes iguales: cuatro cuadrantes en el hemisferio superior y cuatro cuadrantes en el hemisferio inferior. La Figura 2.12

ilustra el esquema de numeración de los ocho octantes, para un plano ecuatorial horizontal.

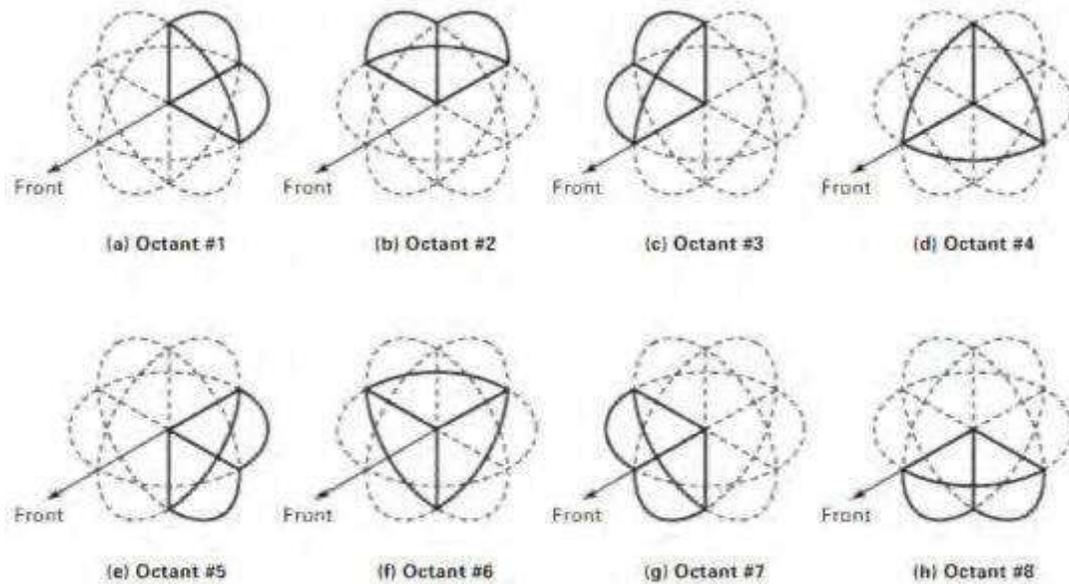


Figura 2.12 Numeración de octantes del volumen de medida de un BAMC. ASME B89.4.22-2004.

El artefacto se colocará en tres inclinaciones, es decir, vertical, horizontal y 45 grados, como se muestra en la Figura 2.13.

Existen cinco características a considerar cuando se coloca un artefacto patrón: la longitud del artefacto, el octante, la inclinación del artefacto (Figura 2.14), la distancia del artefacto y la dirección con respecto al centro. La tabla 2.2 define las 20 posiciones recomendadas de la barra de esferas. Para cada medición de longitud, el operador debe registrar cinco puntos de medida por esfera. Los puntos deben estar bien dispersos en la superficie de la esfera. Los centros de la esfera se utilizan entonces para calcular una distancia de centro a centro para la barra de esferas.

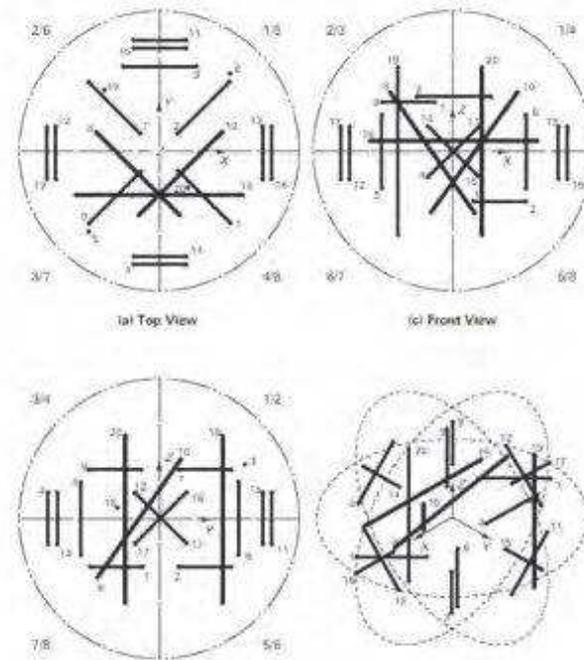


Figura 2.13. Posiciones de ensayo de evaluación de rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004.

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

Tabla 2.2 Definición de posiciones y parámetros ensayo de evaluación del rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004.

Para cada posición medida se obtiene la diferencia entre la longitud medida L_i y la longitud calibrada L_{Cal} , siendo esta diferencia el error de medida en distancias tal como muestra la ecuación (2,1)

$$D_i = L_i - L_{cal} \quad (2,1)$$

De los resultados de esta prueba se obtienen tres parámetros: la desviación máxima (D_i), el rango de las desviaciones, y dos veces el cuadrado medio-raíz de las desviaciones (2RMS), ver ecuación (2,2). El rango es la diferencia entre la desviación de longitud máxima y la desviación de longitud mínima.

$$2RMS = 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n D_i^2}{n}} \quad (2,2)$$

B. Norma ISO / DIS 10360-2

La norma ISO 10360-2: 2009 determina las pruebas de aceptación para verificar el rendimiento de una MMC usada para medir dimensiones lineales, como el que establece el fabricante (ISO / DIS 10360-2: 2009). También especifica las pruebas de re-verificación que permiten al usuario re-verificar periódicamente el desempeño de la MMC (Ostrowska, 2016).

C. Evaluación de precisión de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado según VDI / VDE 2617-9

De acuerdo con la norma VDI / VDE 2617-9, el procedimiento de evaluación de la exactitud implica lo siguiente: determinar el error de indicación para la medición de tamaño E, así como tres tipos de errores de sondeo: error de sondeo PL para la ubicación de la esfera, PS error de sondeo para el tamaño, y PF error de sondeo para el formulario.

2.2.3 Técnicas de calibración y evaluación de precisión de BAMC

Unai et al (2013) menciona un método de calibración para un BAMC: Prueba volumétrica, en la cual se valoran aspectos de la precisión de desplazamiento lineal

y el rendimiento volumétrico del BAMC. Esta prueba menciona que el proceso de medición tiene en cuenta cinco variables de medición para definir posiciones de medición en la barra de esferas (Figura 2.7). El enfoque general es posicionar la barra patrón en orientaciones verticales, horizontales y a 45° con respecto al BAMC a una distancia dada (cerca/lejos).

Brau, et al (2014) presenta un dispositivo o plataforma multiregistro que persigue mejorar los procedimientos de verificación de brazo articulado. Para lograr este objetivo, las siguientes cinco etapas se llevan a cabo habitualmente: determinación del modelo cinemático por medio de ecuaciones no lineales, adquisición de datos, identificación de parámetros geométricos, evaluación de modelo, y por último, la identificación de las fuentes de error y la aplicación de la corrección de modelos.

El primer paso, la determinación del modelo cinemático, consta de la obtención de las ecuaciones no lineales que relacionan las variables conjuntas a la posición y orientación del efector final y los valores iniciales de los parámetros geométricos nominales. Uno de los métodos geométricos más ampliamente utilizados para el modelado de un mecanismo es el método de Denavit-Hartenberg (1955).

El segundo paso es la adquisición de datos. Cualquier error de medición del instrumento externo se propaga a los resultados de los parámetros identificados. Por esta razón, para la adquisición de datos, un instrumento debe ser al menos un orden de magnitud más preciso que el mecanismo de cuyos parámetros van a ser identificados.

El tercer paso es la optimización o identificación de parámetros geométricos, donde el objetivo es la búsqueda de los valores óptimos de todos los parámetros incluidos en el modelo que minimiza el error en las mediciones realizadas. Este paso se lleva a cabo generalmente por medio de procedimientos de aproximación basada en ajuste de mínimos cuadrados. Esta función se puede definir como la diferencia cuadrática del error (obtenida entre el valor medido y el valor calculado por el modelo cinemático). El incremento establecido para parámetros debe definirse para cada iteración. En la mayoría de los casos, las técnicas de optimización numérica

se utilizan para minimizar el error. El método de Levenberg-Marquardt (LM) (1944) es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para resolver el algoritmo de optimización numérica en este tipo de problemas. Este método, por lo general, presenta un costo computacional menor, proporcionando una solución más cerca de la solución óptima para el conjunto de parámetros considerados. Por otra parte, el algoritmo LM resuelve problemas numéricos que aparecen en otras técnicas de optimización numérica, tales como los basados en el gradiente o sobre los métodos de mínimos cuadrados como el Gauss-Newton. En el trabajo de Santolaria et al. (2008) se presentó una técnica de estimación de parámetros cinemáticos, que nos permite mejorar la repetibilidad del BAMC en más de un 50%. Esta técnica utiliza un patrón de barra de esferas para realizar el procedimiento de adquisición de datos.

El cuarto paso, la evaluación del modelo, consiste en evaluar el comportamiento del mecanismo con el conjunto de parámetros identificados, obtenidos en el procedimiento de identificación de parámetros geométricos, en configuraciones diferentes a las utilizadas en el proceso de optimización.

Por último, la identificación de las fuentes de error así como un modelado y aplicación de los modelos de corrección se puede realizar opcionalmente.

2.2.4. Captura de puntos

El proceso de captura de datos es uno de los puntos clave en el procedimiento de verificación del error y en la identificación de los parámetros de un modelo cinemático de un BAMC.

Santolaria et al (2010) menciona que actualmente, todos los procedimientos de calibración del BAMC establecen un sistema de coordenadas o distancias nominales en el espacio de trabajo, para capturar puntos que permiten calcular el error y minimizarlo. Los procedimientos de identificación de parámetros en los brazos actuales se basan en un conjunto limitado de posiciones en las que las coordenadas del BAMC son capturados discretamente. En el caso de Gong et al (2000) se describe un método para identificar los parámetros geométricos,

definiendo 30 posiciones de un patrón para realizar la captura de datos o mediciones con un brazo articulado de medición por coordenadas. El número de posiciones no tiene una justificación específica, es decir, el autor seleccionó 30 posiciones de un patrón para realizar el procedimiento de extrapolación en sus resultados de una forma más confiable de acuerdo a su criterio.

2.3. Modelo cinemático

La calibración estática de un BAMC se basa en la determinación de un modelo paramétrico que describe con precisión su comportamiento cinemático, de modo que se pueden establecer relaciones numéricas entre las variables conjuntas y la posición del palpador para cualquier posición del brazo. Este modelo es una representación matemática de la cinemática directa, que se caracteriza por cuatro parámetros geométricos en cada una de las articulaciones (distancias d_i , a_i y los ángulos θ_i , α_i) definidas en el modelo básico D-H.

Sladek et al (2012) desarrollaron un modelo metrológico para identificar los parámetros cinemáticos de un brazo de medición y los errores asociados con sus mediciones. Establecieron un sistema de simulación en línea llamado brazo articulado virtual de máquina de medición, lo que permite la evaluación de la exactitud en las mediciones, así como la determinación de la matriz de compensación utilizando medidores de barra de esferas.

2.3.1. Algoritmo Denavit Hartenberg

El modelo Denavit-Hartenberg (D-H) (1955) es el modelo cinemático básico empleado en brazos robot por medio del cual se modelan los mecanismos de varios grados de libertad.

El modelo D-H establece sistemas de referencia locales en las articulaciones del brazo de medir por coordenadas y matrices de transformación homogéneas con la relación geométrica entre los sucesivos sistemas de referencia. El modelo de D-H ha sido aplicado al modelado cinemático de brazos de medición por coordenadas, debido a sus similitudes con los robots.

Este modelo consiste en establecer un sistema de coordenadas sobre cada uno de los ejes de articulación y después relacionar cada sistema de coordenadas por medio de matrices de transformación homogéneas. Un problema con este modelo se presenta cuando dos ejes de articulación de giro son paralelos o casi paralelos, dando como resultado una discontinuidad o no proporcionalidad del modelo (Santolaria, 2010). Para eliminar el problema anterior Hayati (1983) y Mirmirani et al (1985) proponen la eliminación de un parámetro y la incorporación de un nuevo parámetro de rotación.

Como se mencionó, la representación básica D-H modela cada una de las articulaciones del brazo, permitiendo conocer la relación entre dos sistemas de referencia consecutivos mediante cuatro parámetros geométricos o cinemáticos θ_i , α_i , a_i y d_i . Los dos primeros parámetros son ángulos de giro en sistemas de referencia sucesivos, mientras que los dos últimos hacen referencia a dimensiones longitudinales entre dichos sistemas, como se ilustra en la Figura 2.14

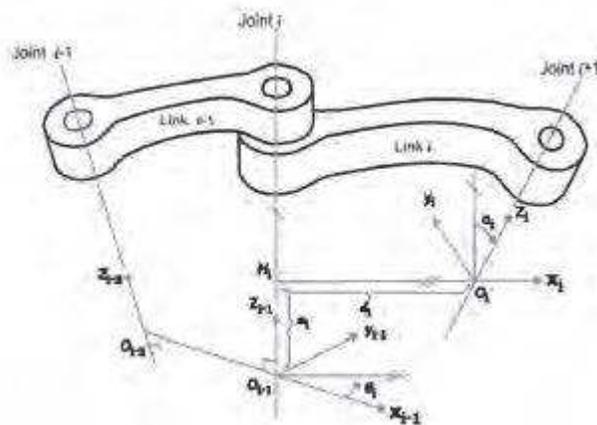


Figura 2.14 Modelo Denavit – Hartenberg. Craig, 2018

A continuación, se explican brevemente los parámetros geométricos que definen el modelo cinemático de D-H:

- θ_i : Es el ángulo de las articulaciones del eje X_{i-1} al eje X_i respecto del eje Z_{i-1} (siguiendo la regla de la mano derecha).
- α_i : Es el ángulo de separación del eje Z_{i-1} al eje X_i respecto del eje X_{i-1} (siguiendo la regla de la mano derecha).

- a_i : Es la distancia de separación desde la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i hasta el origen del sistema i -ésimo a lo largo del eje X_i . (o la menor distancia o normal común entre los ejes Z_{i-1} y Z_i).
- d_i : Es la distancia desde el 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} .

Mediante una matriz homogénea de 4×4 , es posible obtener la relación geométrica entre los sistemas de referencia consecutivos a través de los cuatro parámetros independientes.

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i & T_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

en donde el término R_i es una matriz de giro o rotación 3×3 con las componentes de los vectores unitarios del SR_i con respecto SR_{i-1} , T_i es un vector de traslación 3×1 desde el origen del sistema i al $i-1$, de modo que:

$$\bar{X}_{i-1} = A_i \cdot \bar{X}_i \quad (2.9)$$

Mediante la ecuación (2,9) es posible expresar un punto de coordenadas conocidas en el sistema de referencia i , en el sistema de referencias $i-1$. El uso de matrices homogéneas hace que los vectores X de la ecuación (2,9) deban ser vectores de dimensión 4×1 , con las coordenadas X, Y, Z de un punto en el sistema de referencia correspondiente más una cuarta componente igual a 1. Este tipo de representaciones permite realizar tanto la rotación como la traslación con una sola matriz, permitiendo una formulación más sencilla y compacta. El vector de dimensión 1×3 , cuyas componentes son cero en este caso, permite realizar una transformación de perspectiva de los puntos, mientras que el último elemento de la diagonal principal es un factor de escala encargado de representar el factor de escala global o relación geométrica entre ambos sistemas de coordenadas. Este último elemento no tiene ningún uso en el caso de los BAMC.

Para el BAMC es posible seguir un procedimiento general para determinar los parámetros geométricos iniciales del modelo y posicionar los sistemas de referencia

en cada una de las articulaciones del brazo. Finalmente, mediante la multiplicación de las matrices obtenidas se obtendrá una matriz global para cada posición del brazo, dependiente de todos los parámetros geométricos, que permitirán obtener en el sistema de referencia global las coordenadas de un punto definido por el extremo o por la esfera del palpador del BAMC, respecto al último sistema de referencia. De este modo, para definir la cadena de transformaciones completa, en los ejes de articulación de cada elemento se establece un sistema de coordenadas cartesiano ortonormal (X_i, Y_i, Z_i) , 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) , estando situado en la parte inferior del brazo.

El procedimiento a seguir para la localización de los sistemas de coordenadas y el cálculo de los parámetros para el caso general de un brazo con n grados de libertad es:

- 1) *Establecer el sistema de coordenadas de la base.* Establecer un sistema de coordenadas ortonormal dextrógiro (X_0, Y_0, Z_0) en la base soporte en el eje Z_0 estando a lo largo del eje de movimiento de la articulación 1. Los ejes X_0 y Y_0 se pueden establecer convenientemente y son normales al eje Z_0 .
- 2) *Inicializar y repetir.* Para cada i , $i = 1, \dots, n-1$, realizar los pasos 3 a 6.
- 3) *Establecer los ejes de articulaciones.* Alinear Z_i 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} o en la intersección de las normales comunes entre los ejes Z_i y Z_{i-1} y el eje Z_i .
- 5) *Establecer el eje X_i .* Establecer X_i normal al eje Z_{i-1} o al o largo de la normal común entre los ejes Z_i y Z_{i-1} cuando son paralelos.
- 6) *Establecer el eje Y_i .* Asignar Y_i para completar el sistema de coordenadas dextrógiro.

- 7) *Encontrar los parámetros de la articulación y del elemento.* Para $i, i-1, \dots, n$, realizar los pasos 8 a 11.
- 8) *Encontrar 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) *Encontrar 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) *Encontrar α_i .* α_i es el ángulo de rotación desde el eje Z_{i-1} hasta el eje Z_i respecto al eje X_i

En caso de una articulación giratoria, el parámetro característico que cambiaría conforme varié la posición de la articulación es θ_i .

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 siguientes transformaciones sucesivas:

- Girar respecto del eje z_{i-1} un ángulo de θ_i para alinear el eje x_{i-1} con el eje x_i (el eje x_{i-1} es paralelo a x_i y apunta en la misma dirección).
- Trasladar a lo largo del eje z_{i-1} una distancia de d_i para hacer coincidir los ejes x_{i-1} y x_i .
- Trasladar a lo largo del eje x_i una distancia de a_i para hacer coincidir los dos orígenes de los ejes x .
- Girar respecto del eje x_i un ángulo α_i para hacer coincidir los sistemas de coordenadas.

Cada una de estas cuatro operaciones se puede expresar mediante una matriz homogénea básica. El producto de estas cuatro matrices de transformación homogéneas básicas da una matriz de transformación homogénea compuesta ${}^{i-1}A_i$, conocida como la matriz de transformación D-H para sistemas de coordenadas adyacentes i e $i-1$ que es la ecuación (2.10):

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}A_i &= T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_i & -\sin a_i & 0 \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos a_i \sin \theta_i & \sin a_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos a_i \cos \theta_i & -\sin a_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

La matriz de la ecuación (2.12) se obtiene premultiplicando la matriz identidad por las matrices que representan giros o traslaciones en el sistema $(i-1)$ -ésimo ($T_{z,d}$, $T_{z,\theta}$) en el orden adecuado y postmultiplicándola por las que los representan en el sistema i -ésimo ($T_{x,a}$, $T_{x,\alpha}$). 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.

$$P_{i-1} = {}^{i-1}A_i P_i \quad (2.11)$$

Por último, la matriz homogénea 0T_i , que especifica la localización del sistema de coordenadas i -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:

$${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i \quad (2.12)$$

Asumiendo que los parámetros geométricos descritos son fijos para un brazo, cada una de las matrices A no será constante, sino que variará según varíe la orientación

del brazo. Es decir, los términos que dependan de la variable de la articulación cambiarán para cada nueva posición, obteniendo una nueva matriz T para cada conjunto de valores de los ángulos de giro de las articulaciones. Siguiendo el método básico presentado, es posible obtener, por ejemplo, para un brazo de medida de siete ejes, las coordenadas del centro de la esfera del palpador para cualquier posición y orientación del brazo a partir de la ecuación (2.13)

$$\bar{X}_{brazo} = {}^0T_7 \bar{X}_{palpador} \quad (2.13)$$

donde \bar{X}_{brazo} representa las coordenadas del palpador respecto al sistema de referencia global situado en la base del equipo y $\bar{X}_{palpador}$ son las coordenadas del centro de la esfera del palpador con respecto al sistema de referencia situado en la última articulación.

El modelo Denavit-Hartenberg ha sido utilizado ampliamente en el modelado cinemático de múltiples sistemas, tales como robots o BAMC. Sin embargo, se debe optar por otras opciones cuando estos sistemas presentan articulaciones consecutivas con ejes paralelos, debido a que no se podría cumplir correctamente con el modelo D-H y se presentaría una indeterminación. A lo largo del tiempo se han propuesto diferentes métodos para solucionar esta indeterminación, que hace incompleto el modelo D-H, formulando modificaciones al mismo. Estas modificaciones incluyen cuatro, cinco, seis o más parámetros.

Los primeros en crear una solución al problema del modelo D-H fueron Hayati-Mirmirani (1985). Estos autores proponen un nuevo método de calibración aplicado a robots, que permite cualquier combinación de articulaciones prismáticas o rotativas con ejes paralelos, introduciendo un nuevo parámetro de rotación β_i que relaciona ambos sistemas de referencia consecutivos con ejes paralelos. Hayati et al (1985) proponen modelos de cinco parámetros para articulaciones prismáticas.

Everett et al (1987), Veitschegger et al (1987) y Driels et al (1987) presentan modelos con cinco parámetros aplicables a cualquier tipo de articulación. En 1986 Stone propone un modelo conocido como el S-model que añade dos nuevos parámetros γ_i y b_i al modelo D-H como offsets de traslación y rotación de los ejes

que modelizan la posición variable de los sistemas de referencia de las articulaciones. Hollerbach et al (1986) diseñan un modelo mixto basado en D-H y lo propuesto por Hayati et al (1985) en donde se usan diferentes parámetros en función del tipo de articulación para evitar indeterminaciones. El modelo CPC (complete and parametrically continuous model) desarrollado por Zhuang et al (1992) añade dos parámetros adicionales como realiza Stone para modelizar la posición arbitraria de los sistemas de referencia. Sin embargo, este problema no se presenta en los BAMC, debido a que su configuración nunca presenta dos ejes de articulación de giro paralelos.

Con un modelo cinemático es posible realizar la optimización de sistemas. Mediante un procedimiento de calibración, debe ser posible obtener modelos de corrección a los resultados de una medición. Sin embargo, un procedimiento de optimización, persigue la cuantificación de los efectos de variables de influencia sobre la medida final obtenida, traduciendo estos efectos a la corrección y a la incertidumbre de medida obtenida como resultado de la calibración del equipo (acero 2015).

Gong et al (2000) presentan un procedimiento de autocalibración de robots mediante un sensor óptico híbrido sin contacto posicionado en la mano del robot, cuyo modelado cinemático se realiza aplicando el modelo de D-H con la inclusión del parámetro de rotación β_i adicional propuesto por Hayati. Análogamente y siguiendo este modelo de D-H modificado, Santolaria et al (2013) muestran un nuevo método de calibración aplicado a un robot Kuka KR5, que pretende incrementar la precisión del robot analizando errores cinemáticos y dinámicos. Santolaria et al (2013) presenta también un procedimiento de calibración de robots con láser tracker mediante el método CPA (circle point analysis) creado en 1989, donde un reflector activo colocado sobre el brazo del robot permite una captura continua de datos en todos los ejes sin paradas. Este método se basa en el movimiento independiente de las articulaciones en un círculo mientras se mide la trayectoria descrita por la articulación mediante un punto por articulación. Se toman las mediciones de todas las articulaciones y el círculo que mejor circunscribe los puntos medidos es calculado para cada eje. Por lo tanto, se puede considerar la

posición del eje como un vector que pasa por el centro del círculo y dirección normal al plano que contiene el círculo. El modelo cinemático generado para el robot como primer paso de este procedimiento de calibración está basado en el modelo de D-H. Nubiola et al (2014) proponen calibrar un robot mediante un hexápodo 3-3 que consistente en una barra de bolas telescópica y modelado cinemático del robot basado en el modelo de D-H modificado.

La búsqueda de un modelo matemático óptimo de calibración con parámetros independientes, no redundantes, completo y con el mínimo número de parámetros necesarios, lleva a autores como Tao et al. (2012) y Yang et al. (2014) a generar modelos cinemáticos basados en POE (product of exponentials). Muchos autores utilizan D-H como modelo de referencia para la definición del modelo cinemático en los brazos articulados de medición por coordenadas o brazos robots.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología en donde se describen las actividades, herramientas y normas que se aplicarán para cumplir con los objetivos escritos en el capítulo I y de esta manera dar solución al problema planteado. Por el tipo de investigación la metodología cumple con los parámetros de estudio tipo experimental de enfoque cuantitativo debido a que se trabajan con varios parámetros, es decir, con varias variables como menciona Hernández Sampieri, (2014).

En base a la revisión de literatura vista en el capítulo 2, se realiza la verificación y calibración de un brazo articulado de medición por coordenadas, utilizando como valores nominales iniciales en la calibración del BAMC las mediciones hechas a un patrón de barra de esferas. La manera en que se realizan las mediciones es cumpliendo con lo especificado en la norma ASME B89.4.22. Esta norma es la más utilizada por los usuarios y proveedores de los brazos de medición y permite realizar la evaluación de un BAMC en todo su volumen de medición. Además, se lleva a cabo la verificación del brazo por medio de captura y análisis de datos en una interface desarrollada en la plataforma Matlab. Se crea un modelo cinemático para el BAMC utilizando el método de Denavit-Hartenberg.

El patrón que se utiliza en este trabajo durante los procedimientos de verificación y calibración del BAMC es un patrón de esferas con una longitud de 1950 mm y 74 mm de ancho. Se utiliza este patrón debido a su facilidad de manejo. Esta barra patrón de esferas posee una línea de quince esferas calibradas de cerámica de 15 mm de diámetro, más una esfera auxiliar de las mismas características fuera de la línea principal utilizada para alineación del sistema de referencia del patrón.

El fabricante ha calibrado el patrón de esferas mediante sus procedimientos de calibración interno ISM3D T02-01 y ISM3D T03-01 acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) para calibración de barras de esferas en toda su longitud.

El procedimiento de calibración de la barra de esferas especifica el promedio de las coordenadas de todas las mediciones del centro de las quince esferas, como se muestra en la tabla 3.1. Con esta información será posible materializar en el espacio de trabajo del brazo, distancias y puntos nominales para la realización de los ensayos de captura de puntos en la verificación, mediante un patrón unidimensional como recomienda la norma ASME B89.4.22.

Ball No	X / mm	Y / mm	Z / mm	D / mm
1	0.00000	0.00000	0.00000	14.9984
2	74.87238	-0.04868	-0.06938	14.9990
3	149.91147	-0.09550	-0.04345	14.9989
4	299.94027	-0.15583	-0.07026	14.9987
5	449.88907	-0.09459	-0.07097	14.9989
6	599.95690	0.00000	0.00000	14.9988
7	749.91459	-0.08844	-0.21151	14.9988
8	899.85239	-0.00138	-0.23742	14.9987
9	1049.91544	-0.01572	-0.25201	14.9985
10	1199.94153	0.08109	-0.24771	14.9985
11	1349.97302	0.11337	-0.27325	14.9982
12	1499.92366	0.12030	-0.36735	14.9983
13	1649.91874	0.20865	-0.27649	14.9984
14	1799.98057	0.32036	-0.33199	14.9985
15	1949.91556	0.38177	-0.33142	14.9980

Tabla 3.1. *Coordenadas promedio y valores de diámetro de esferas para la calibración de la barra de esferas patrón.*

La metodología que se emplea para esta investigación se muestra en la Figura 3.1, donde se muestran las etapas que se desarrollan para cumplir con los objetivos específicos mencionados en el capítulo 1. La metodología consta de tres fases las cuales son:

- Verificación de BAMC
- Desarrollo de modelo cinemático del BAMC
- Implementación de parámetros óptimos del BAMC

En la última fase se analiza si se cumple con la hipótesis establecida y si es así se realizan las certificaciones de la pieza utilizada en la investigación. La realización de la verificación lleva al análisis y posible optimización de los datos tomados al realizar mediciones, donde se captura una serie de puntos que se guardan en una interface que se crea utilizando la herramienta de software Matlab.

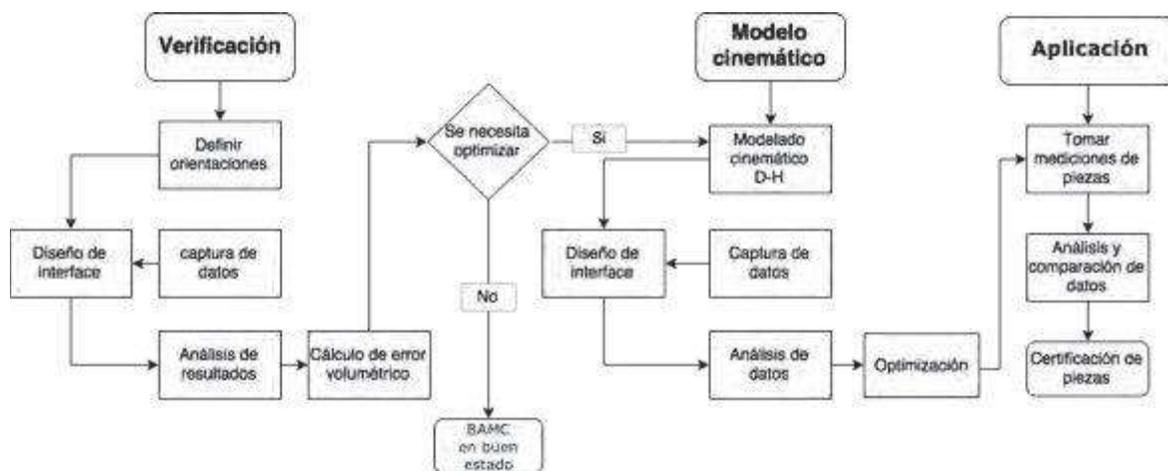


Figura 3.1. Diagrama de metodología general (elaboración propia).

3.1. Fase 1: verificación

Dentro de esta fase (Figura 3.2) se desarrollan los temas de verificación, cálculo de error volumétrico de un brazo de medición y el diseño de una interface en la que se utiliza un lenguaje de programación compatible con el BAMC. Matlab es el software que se utilizará en el presente trabajo.

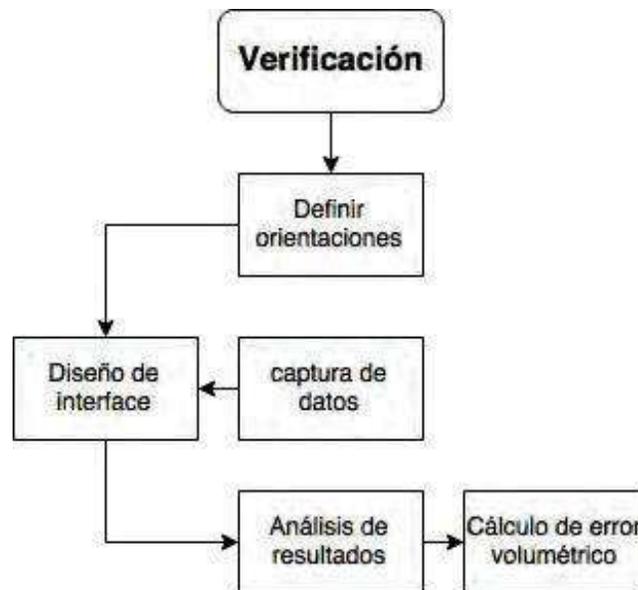


Figura 3.2. Diagrama Fase 1 (elaboración propia).

3.1.1.Método de Verificación

Para realizar la calibración y verificación de un brazo de medición por coordenadas se toma como referencia la norma ASME B89.4.22 para el cumplimiento de los siguientes pasos:

1. Determinar orientaciones de un BAMC, en este se indican 9 orientaciones que debe colocarse la barra patrón respecto al BAMC.
2. Diseño de interface para los pasos 3 y 4
3. Captura de puntos tomados con el palpador del BAMC, en esferas de una barra patrón. La cantidad de puntos capturados es respecto a la norma ASME B89.4.22 la cual establece que deben capturarse 9 puntos distribuidos para cada esfera.
4. Evaluación del error volumétrico.

Paso 1. Se definen 9 orientaciones del patrón a utilizar y se dividen en: 5 horizontales y 4 inclinadas aproximadamente a 45°, de esta manera se cumple lo establecido con la norma ASME B89.4.22. Este paso consiste en tratar de cubrir el

mayor volumen de medición del brazo de medición por coordenadas para obtener datos confiables, que permitan evaluar el error cometido por el brazo de una manera más confiable.

Paso 2. Debido a que no se cuenta con el software oficial del brazo, se desarrolló una interfaz que facilita el proceso de la captura de datos en la verificación.

En la interface se capturan los datos de cada punto X, Y y Z medido con el palpador y las posiciones de los siete encoders del brazo correspondientes a cada punto, por lo que resulta de gran importancia sincronizar la captura del punto con las posiciones de los encoders del brazo. Para diseñar la interface se selecciona un software que es compatible con las funciones del BAMC. Matlab es el software que cumple con esta característica y presenta una enorme capacidad en el tratamiento de datos y realización de interfaces gráficas. Además, cabe mencionar que este software ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de análisis numérico en diferentes campos de la ciencia y en particular en la ingeniería de precisión.

Paso 3. Se realiza la captura de los puntos medidos de las esferas seleccionadas de la barra patrón de acuerdo a lo que establece la norma ASME B89.4.22 donde se menciona que deben ser seleccionadas las esferas de tal manera que el BAMC abarque la mayor longitud de trabajo al realizar las mediciones durante el proceso de verificación, en este caso se seleccionan 5 esferas para realizar la medición y se capturan 9 puntos distribuidos en cada esfera (la cantidad de 9 puntos está establecido en la Norma ASME B89.4.22).

Paso 4. Para calcular el error volumétrico de un BAMC se comparan las distancias de los centros de las esferas materializadas con el brazo de medida con las distancias calibradas del patrón, calculadas en el certificado de calibración presentado en la tabla 3.1, lo que arroja un error en distancia que corresponde a la desviación entre la distancia nominal del patrón y la distancia medida entre los centros de las esferas palpadas. Este error es utilizado para evaluar la precisión del brazo de acuerdo a los parámetros definidos en la norma ASME B89.4.22, como la desviación máxima permitida. Simultáneamente, estos errores en distancia también

permiten evaluar la validez de los modelos matemáticos del procedimiento de calibración y verificación.

Para obtener el centro de cada esfera se palpan puntos distribuidos en toda la circunferencia de la esfera. El centro de la esfera se calcula con el método de mínimos cuadrados utilizando Matlab. Si se denota la distancia tridimensional entre las parejas de esferas a partir de los centros calculados entre la esfera k y la esfera l como:

$$D_{i_{kl}} = \sqrt{(X_{i_k} - X_{i_l})^2 + (Y_{i_k} - Y_{i_l})^2 + (Z_{i_k} - Z_{i_l})^2} \quad (3.1)$$

para $i = 1, 2, \dots, 5$ orientaciones del patrón de esferas y Dn_{kl} como la distancia nominal calculada de las tablas de calibración del patrón entre las esferas k y l , se puede calcular el error en distancias que el brazo de medida comete entre las esferas k y l en las posiciones i del patrón como sigue:

$$E_{i_{kl}} = \sqrt{(D_{i_{kl}} - Dn_{i_{kl}})^2} \quad (3.2)$$

Este error corresponde a la desviación entre la distancia nominal del patrón y la distancia medida entre las esferas palpadas.

3.2. Fase 2: Desarrollo de modelo cinemático

En el capítulo 2, véase Figura 3.3, se explica el método de Denavit-Hartenberg y se menciona que este puede ser adaptado y aplicado a cualquier tipo de brazo de medición que no tenga articulaciones paralelas. En nuestro caso se aplica el método D-H para realizar el modelo cinemático de un brazo articulado de medición por coordenada marca FARO Platinum de 7 grados de libertad, con un volumen de trabajo de 2.4 metros (Figura 3.4) para poder aplicar métodos y así identificar parámetros que permitan cuantificar y optimizar el error de medición del brazo.

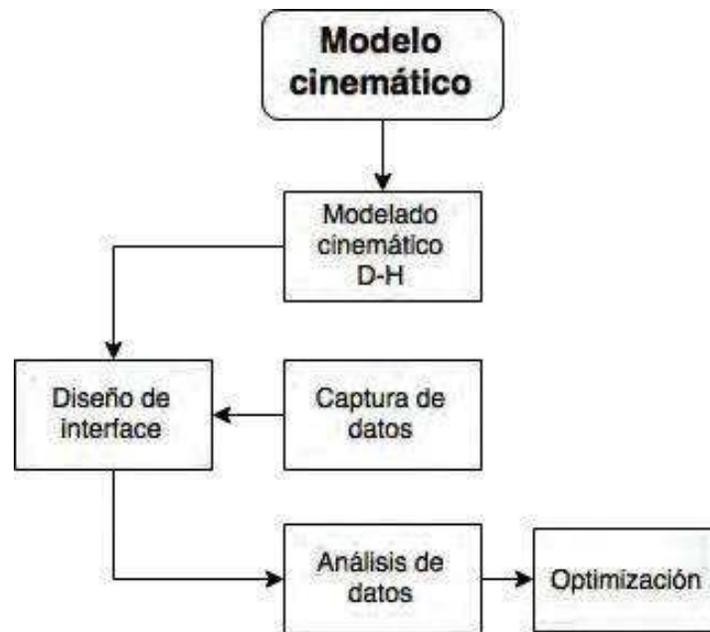


Figura 3.3. Diagrama Fase 2 (elaboración propia).



Figura 3.4. Disposición de articulaciones en brazo. FARO Platinum.

De acuerdo con Brau (2014) es posible representar cada una de las siete articulaciones del brazo de medición por medio de cuatro parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i utilizando el modelo D-H, por lo que se optó utilizar la misma metodología para el presente trabajo.

El procedimiento para el desarrollo del modelo cinemático consiste en crear el modelo y definir el posicionamiento de los sistemas de referencia para cada articulación del BAMC y determinar los puntos de inicio los cuales se calcularán por medio de un modelado matemático.

Para realizar lo anterior es necesario definir la posición inicial, de tal manera que coincida con la posición inicial de los encoders, es decir colocar el BAMC en una posición cero. Esto significa que debe agregarse un parámetro más al modelo D-H θ_{0i} el cual establecerá el valor de giro entorno al eje Z de la articulación entre el sistema de referencia de la articulación i en posición nominal del modelo y el cero de los encoders y sus articulaciones, como se muestra en la Figura 3.5. El valor de este nuevo parámetro se tomará como punto de inicio para realizar el modelo cinemático.

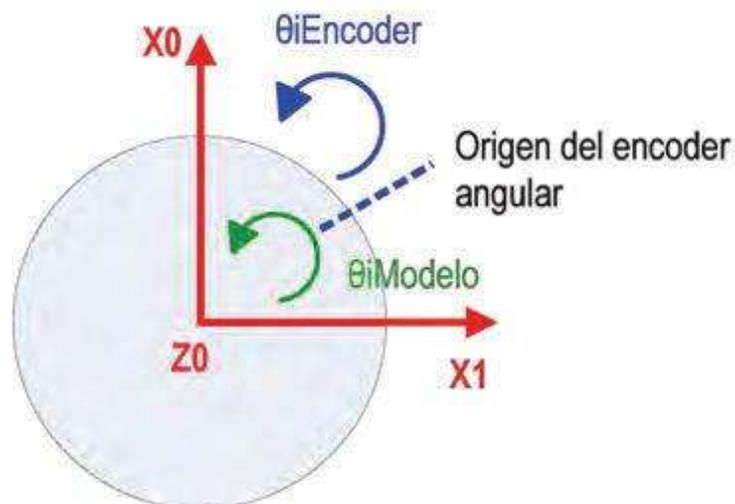


Figura 3.5 Relación entre el origen del sistema de medida y el modelo (Acero, 2015).

El valor de rotación de la articulación en $\theta_{i \text{ Modelo}}$, será la diferencia entre el valor de rotación captado por $\theta_{i \text{ Encoder}}$ respecto a su posición y el parámetro del modelo D-H " θ_{i0} ".

Una vez obtenidos los sistemas de coordenadas del modelo cinemático, el siguiente paso es determinar los parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i . Ya obtenidos los valores de cada parámetro, por medio de métodos de optimización, se verá reflejado la disminución del error al realizar mediciones con el BAMC. El valor de los parámetros, obtenidos por el método D-H, harán que el error de medición del brazo disminuya. Por lo tanto, es importante que los valores de entrada de los parámetros geométricos utilizados en el modelo cinemático, se aproximen los valores que nos brindaría el fabricante del Brazo.

3.2.1 Modelado cinemático

El objetivo de analizar un BAMC es determinar la relación matemática entre todas y cada una de las articulaciones que forman su estructura, conjuntamente con la posición y orientación final del propio sistema. Para hacer lo anterior se sitúan sistemas de referencia en distintas partes del brazo de medición siguiendo una serie de pasos predefinidos que permitan obtener, mediante combinación de parámetros geométricos, la relación entre dos sistemas de referencia sucesivos. La posición y orientación del brazo para cualquier posición de sus articulaciones respecto al sistema de referencia global del equipo, se obtiene enlazando sistemas de referencia sucesivos por medio de matrices de giro y traslación.

Las variables que describen la geometría del sistema y los ángulos girados por cada articulación en cada momento serán las entradas del modelo matemático, determinando así la relación entre el sistema global de referencia y la orientación y posición final del palpador del brazo articulado de medición por coordenadas. Un modelo cinemático directo puede formularse según la siguiente ecuación (3,3).

$$y=f(\theta_i,p) \quad (3.3)$$

Siendo los valores de i desde 1 hasta n para un sistema de 7 articulaciones giratorias. Este modelo cinemático estima la posición y orientación final del sistema en función del valor de rotación de articulación θ_i y de las ecuaciones del modelo definidas en f , las cuales dependen del vector de parámetros p . El vector de parámetros contiene los parámetros geométricos que deben ser optimizados por medio del modelo para minimizar los errores de posicionamiento. En función del modelo cinemático utilizado, la forma de obtener las ecuaciones en f cambia, así como el número de parámetros geométricos necesarios para incluirlos en p .

Los modelos cinemáticos determinados en este trabajo son modelos cinemáticos directos.

Conocer la posición y orientación de un sólido rígido en el espacio implica la definición de las características respectivas a un sistema de referencia definido. Para eso, se establece un sistema de referencia global y de sistemas de referencia asociados a cada una de las partes móviles a partir de los parámetros geométricos. Las relaciones geométricas entre los sucesivos sistemas de referencia se pueden establecer por medio de la relación entre la traslación y rotación entre ellos.

La ecuación matemática para describir la posición de un cuerpo respecto a donde está localizada su base (referencia) se define por un vector de posición $[3 \times 1]$, como se describe en la ecuación (3,4), junto con tres vectores unitarios en la dirección de los ejes x, y, z del sistema de referencia x_0, y_0, z_0 , los cuales son i, j, k .

$$p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = p_{0x}i_0 + p_{0y}j_0 + p_{0z}k_0 \quad (3.4)$$

El cambio de coordenadas del punto p respecto al sistema (x_1, y_1, z_1) a las coordenadas x_0, y_0, z_0 se pueden representar como la matriz de rotación $R_{0/1}$ si los dos sistemas de referencia comparten el mismo origen.

$$p_0 = R_{0/1} \cdot p_1 \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} p_{0x} \\ p_{0y} \\ p_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i_0 + i_1 \cdot j_0 + i_1 \cdot k_0 \\ i_2 \cdot i_0 + i_2 \cdot j_0 + i_2 \cdot k_0 \\ i_3 \cdot i_0 + i_3 \cdot j_0 + i_3 \cdot k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

De igual forma se puede encontrar la matriz de transformación inversa de x_0, y_0, z_0 al sistema x_1, y_1, z_1 de la forma siguiente:

$$R_{1/0} = (R_{0/1})^{-1} \quad (3.7)$$

Por medio de la matriz de rotación R , es posible representar rotaciones del sistema de coordenadas respecto a uno de los ejes de coordenadas x_0, y_0, z_0 . La orientación de x_1, y_1, z_1 , con el eje O_x que coincide con el eje x de x_0, y_0, z_0 cuando el sistema de referencia gira un ángulo α respecto al eje O_x , es determinado por la matriz de rotación $R_{x,\alpha}$, ecuación (3.8). Igualmente, las matrices de rotación $R_{y,\varphi}$ y $R_{z,\theta}$, ecuaciones (3.9) y (3.10), representan las rotaciones respecto al eje O_y con ángulo φ y respecto al eje O_z con ángulo θ .

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La Figura 3.6 muestra la representación de las rotaciones del sistema (x_1, y_1, z_1) respecto de cada uno de los ejes del sistema (x_0, y_0, z_0) .

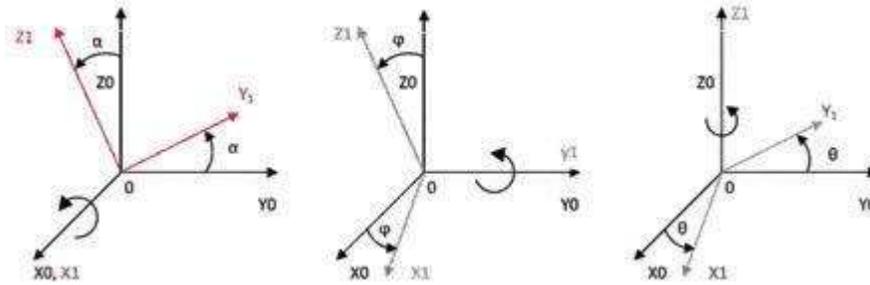


Figura 3.6. Rotaciones del sistema (x_1, y_1, z_1) respecto al sistema (x_0, y_0, z_0) .

$R_{x,\alpha}$, $R_{y,\varphi}$ y $R_{z,\theta}$ son matrices llamadas matrices de rotación básicas, y se obtienen por medio de otras matrices de rotación se da el caso de una rotación compuesta. Considerando una rotación del sistema de coordenadas con respecto a un sistema ya rotado y teniendo en cuenta que el producto de las matrices de rotación no es conmutativo, se puede obtener una matriz de rotación $R_{0/2}$, ecuación (3,11), que representa una rotación del sistema (x_1, y_1, z_1) relativo al sistema (x_0, y_0, z_0) para luego rotar al sistema (x_2, y_2, z_2) respecto al sistema (x_1, y_1, z_1) previamente rotado.

$$R_{0/2} = R_{0/1} \cdot R_{1/2} \quad (3.11)$$

De igual manera, la matriz R , ecuación 3,12, muestra un giro de φ grados alrededor del eje y , continuando después con una rotación de θ grados alrededor del eje z actual ya rotado.

$$R = R_{y,\varphi} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\cos \varphi \sin \theta & \sin \varphi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.2.2 Representación de modelo Denavit-Hartenberg

Como se ha mencionado anteriormente, la representación básica D-H modela cada una de las articulaciones del brazo, permitiendo conocer la relación entre dos sistemas de referencia consecutivos mediante cuatro parámetros geométricos o cinemáticos θ_i α_i a_i d_i . Los dos primeros parámetros son ángulos de giro en sistemas de referencia sucesivos, mientras que los dos últimos hacen referencia a

dimensiones longitudinales entre dichos sistemas. Los pasos para realizar el modelo D-H se explican en el punto **2.4.1**.

3.2.3 Optimización

Una vez realizado la captura de los datos de las orientaciones establecidas, se realiza el procedimiento de optimización de los parámetros del modelo cinemático del brazo para determinar los valores de los parámetros, los cuales son los errores mínimos en las mediciones de las orientaciones establecidas. Para realizar la optimización, en el presente trabajo se utiliza una aproximación por mínimos cuadrados mediante el método de Levenberg-Marquardt. El modelo matemático implementado en el brazo de medición se puede describir, para una posición del brazo, mediante la ecuación (3,13) basada en el modelo cinemático del brazo descrito en el apartado **3.2.1**.

$$p = f(a_i, d_i, \theta_i, \alpha_i) \quad i = 1, \dots, 7 \quad (3.13)$$

donde $p = (x, y, z)$ son las coordenadas del punto medido con respecto al sistema de referencia global del BAMC.

Para realizar la identificación y optimización de los parámetros cinemáticos del brazo articulado, se crean las siguientes funciones para aplicarlas en el software Matlab versión 2011a:

Optimiza_parametros: Función que realiza la optimización de los parámetros cinemáticos del brazo de medir por coordenadas empleando el método de mínimos cuadrados de Levenberg Marquardt.

- **ModeloBrazo:** Función que calcula XYZ del palpador del BAMC para la combinación de ángulos de articulaciones y los parámetros geométricos definidos, así como las coordenadas en un sistema de referencia situado con la misma orientación que el sistema de referencia global interno del brazo con origen del sistema 0 del modelado. El cálculo matricial interno es realizado según el modelo Denavit-Hartenberg.

- **F_Brazo:** Calcula y construye un vector con todas las distancias entre puntos nominales, la función devuelve un vector renglón "F" que contiene los errores en distancias de todas las orientaciones del brazo, al igual realiza los cálculos correspondientes de las distancias nominales, estimación de centro de las esferas y el cálculo entre esferas medidas. También devuelve varios archivos que registran para cada iteración distintos vectores para su posterior estudio.

Cabe mencionar que se realizará la optimización de parámetros, únicamente si al momento de calcular el error volumétrico, este es mayor al error mínimo establecido por el fabricante. Para optimizar los parámetros se agregó un botón a la interface que permite ejecutar la función de optimización al momento de pulsar el botón creado.

En la Figura 3.7 se observan las secciones que conforman la interface y a continuación se describirá el funcionamiento de cada sección.

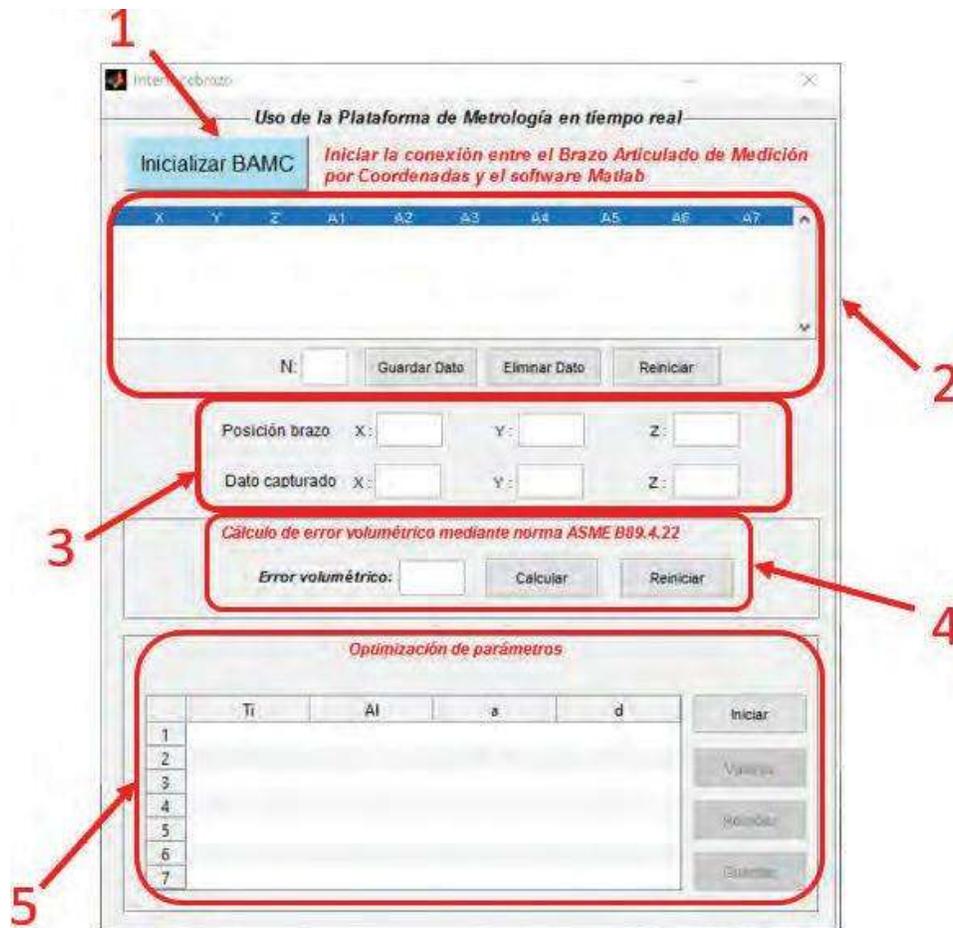


Figura 3.7 Funcionamiento de la interface optimización.

1. Botón para realizar la conexión entre la interface y el BAMC.
2. Sección de captura de puntos, en donde se enlistan los valores al palpar un punto, los cuales son las coordenadas X, Y, Z y los valores de la posición de los encoders A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7. También se cuenta con un indicador que muestra la cantidad de puntos tomados y las diferentes opciones que tienen la finalidad de guardar los datos capturados, eliminar el último valor seleccionado o simplemente reiniciar la lista.
3. Área que muestra la información de la posición del brazo, donde la primera fila muestra las coordenadas de la posición actual en la que se encuentra el palpador y la segunda fila muestra las coordenadas donde se capturó el último punto.

4. Sección que cuenta con un botón para realizar la verificación volumétrica basándose en la norma ASME B89.4.22, así como un indicador que muestra el error volumétrico calculado.
5. Sección de optimización de parámetros, donde se cuenta con botones para iniciar la optimización. Para detener la optimización es necesario ir a la ventana de comandos y oprimir la siguiente combinación de teclas “Control + C” para detener la operación. Esta sección también cuenta con un botón que muestra los valores óptimos obtenidos, otro para reiniciar la lista de valores y finalmente uno que permite guardar en un archivo de texto los valores óptimos.

Una vez finalizada la interface es posible calcular el error volumétrico del BAMC. Si este valor es mayor a lo establecido por el fabricante se deberán optimizar los parámetros haciendo clic en el botón “iniciar”, después de un determinado tiempo se debe presionar las teclas “control + C” para detener la operación. Una vez detenido, se activa el botón “Valores” el cual al momento de presionarlo muestra en la tabla del lado izquierdo, los valores de los parámetros optimizados y se activan los botones “Reiniciar” y “Guardar”. Estos últimos botones tienen la finalidad de guardar los valores optimizados en un archivo de texto y reiniciar el proceso de optimización. Una vez obtenidos los parámetros optimizados se prosigue con el cálculo del error volumétrico por segunda vez, con el fin de verificar que el nuevo valor de error es menor que el calculado en la primera evaluación del brazo de medición.

3.3. Fase 3: Aplicación

En esta fase se aplican los procesos de las fases anteriores al brazo articulado de medición por coordenadas marca FARO Platinum, para cumplir con los objetivos específicos establecidos en el capítulo 1. Además, se programan en la interface diseñada en Matlab las funciones para medir las características geométricas de la pieza que desea medir la empresa y de esta manera se pueden realizar las certificaciones de las piezas utilizadas en la investigación. Véase Figura 3.8



Figura 3.8. Diagrama Fase 3 (elaboración propia).

En la Figura 3.9 se observa la interface completa, en la parte izquierda de la interface se realizarán los procesos de los puntos 3.1 y 3.2 de este documento, la parte derecha se enfoca en los resultados de los puntos capturados de las piezas a medir, cumpliendo así la fase 3 de la metodología.

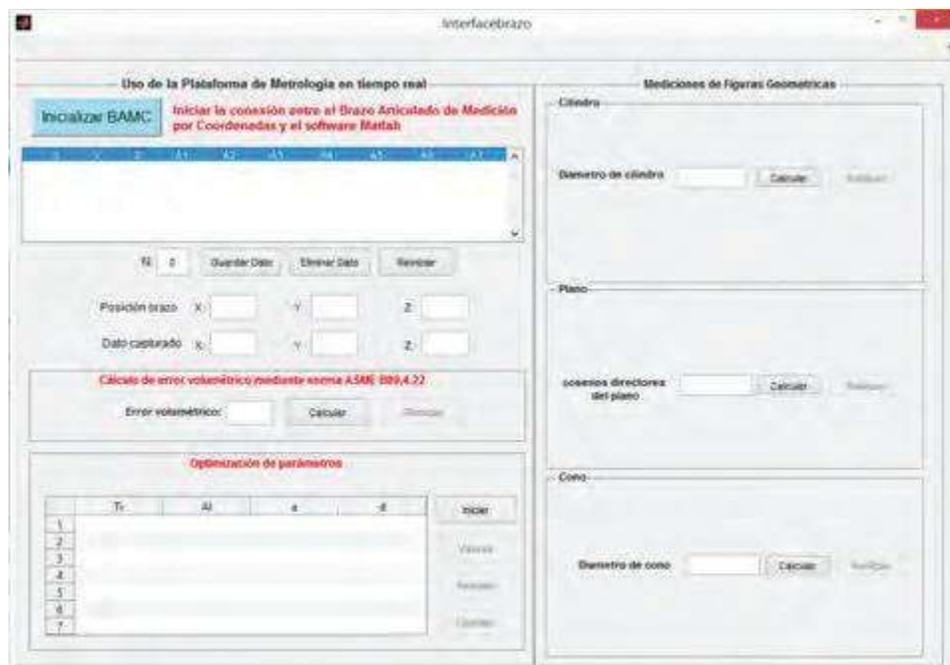


Figura 3.9. Interface final.

En la Figura 3.10 se señalan las secciones que conforman la implementación del proyecto en la interface y a continuación se describirá el funcionamiento de cada sección.

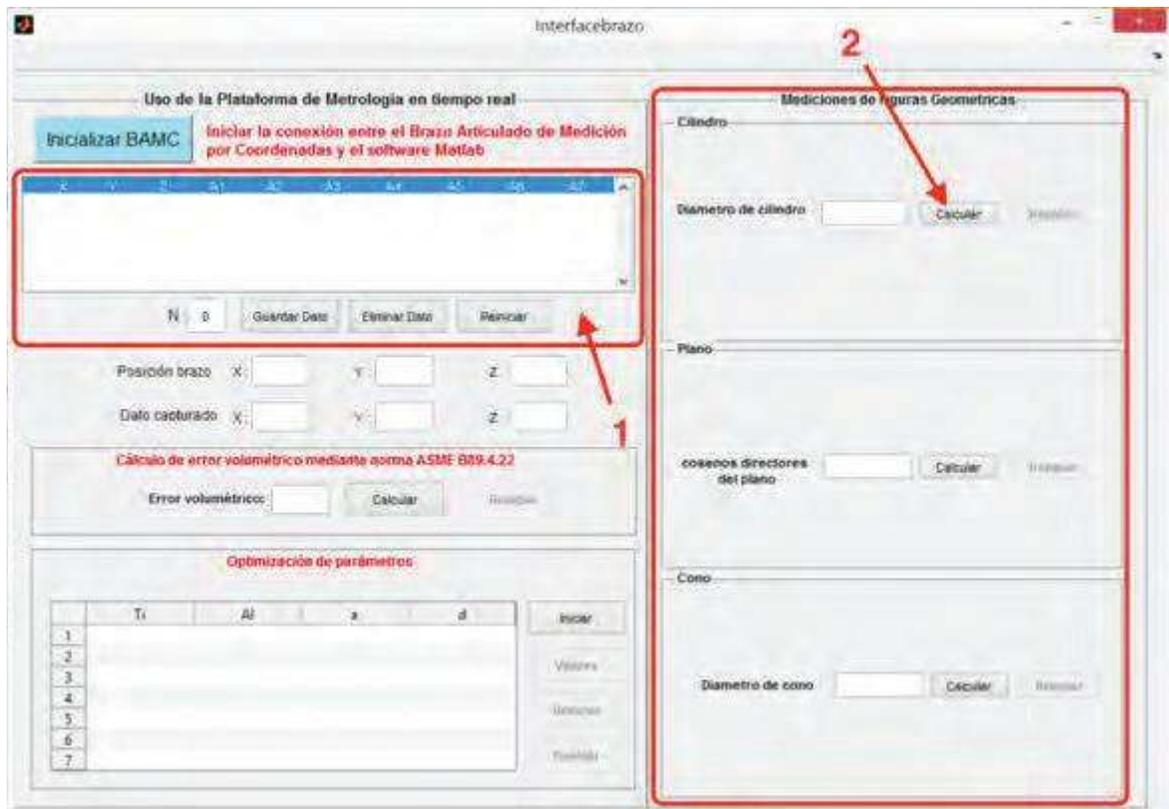


Figura 3.10. Funcionamiento de Interface, implementación.

1. Sección de captura de puntos, se enlistan los valores al palpar un punto de la pieza, los cuales son las coordenadas X, Y, Z y los valores de la posición de los encoders A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7. En este caso solo necesitamos las coordenadas X, Y, Z para realizar la implementación del proyecto. Una vez capturados los puntos se guardan con el nombre de la forma de la Figura medida, por ejemplo: cilindro1.txt, plano1.txt, cilindro1.txt. Las mediciones se guardarán en formato .txt.
2. Sección donde, una vez guardados los puntos capturados en la medición de Figura geométrica, se calculan las características de la Figura medida. Si se mide un cono o un cilindro se calculan los diámetros y en el caso de un plano se calculan los cosenos directores del plano.

Una vez obtenidas las características de las Figuras, será posible realizar comparaciones de los resultados obtenidos con las tolerancias que pide el cliente y si los valores quedan dentro de los márgenes establecidos se puede decir que la pieza si está certificada.

4. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se presenta el desarrollo y la implementación de la metodología propuesta en el capítulo previo, la cual fue aplicada en el laboratorio de metrología de la Universidad de Sonora.

4.1. Verificación

En la etapa de verificación se definen 9 orientaciones del patrón a utilizar, de acuerdo a la norma ASME B89.4.22, y se dividieron en: 5 horizontales y 4 inclinadas aproximadamente a 45° como lo marca la misma norma, Figura 4.1.

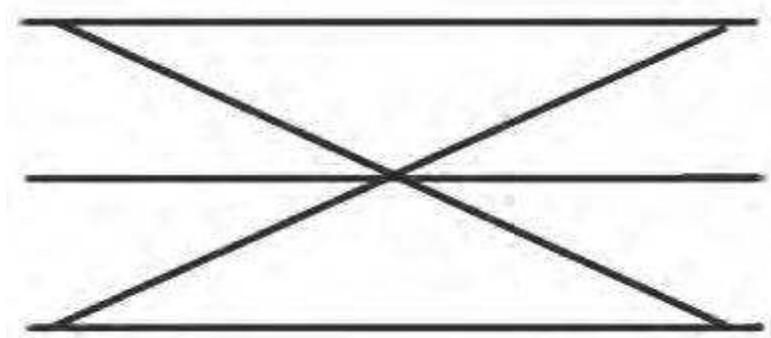


Figura 4.1. Orientaciones verticales, horizontales e inclinadas de la barra patrón para la verificación de BAMC (Elaboración propia).

Una vez definidas las orientaciones se realiza la captura de los puntos medidos de las esferas seleccionadas de la barra patrón, en este caso se seleccionan 5 esferas de la barra para realizar la medición y se capturan 9 puntos con el palpador en cada esfera. Se desarrolló una interfaz que facilita el proceso de la captura de datos en la verificación.

En la interface creada se capturan los datos de cada punto X, Y y Z tomados con el palpador y las posiciones de los siete encoders del brazo correspondientes a cada punto, por lo que resulta de gran importancia sincronizar la captura del punto con las posiciones de los encoders del brazo. Figura 4.2.

Uso de la Plataforma de Metrología en tiempo real

Inicializar BAMC *Iniciar la conexión entre el Brazo Articulado de Medición por Coordenadas y el software Matlab*

X	Y	Z	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7

N:

Posición brazo X: Y: Z:

Date capturado X: Y: Z:

Cálculo de error volumétrico mediante norma ASME B89.4.22

Error volumétrico:

Optimización de parámetros

	Ti	Al	a	d
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Figura 4.2. Interfaz para captura de datos del procedimiento de verificación de un BAMC.

Para calcular el error volumétrico de un BAMC se compararon las distancias de los centros de las esferas medidas con el brazo (Figura 4.3), con las distancias calibradas del patrón, calculadas en el certificado de calibración presentado en la tabla 3.1, el resultado marca el error en distancia que corresponde a la desviación entre la distancia nominal del patrón y la distancia medida entre los centros de las esferas palpadas.



Figura 4.3. Captura de puntos en esferas de la barra patrón.

Para determinar el centro de la esfera medida, se palparon un total de 9 puntos distribuidos de la siguiente manera: cuatro puntos distribuidos a distancias iguales sobre el ecuador de la esfera, cuatro puntos distribuidos a distancias iguales a una latitud aproximada de 45° y rotados 45° con respecto a los puntos sobre el ecuador y un punto sobre el polo de la esfera. El centro de la esfera se calcula con el método de mínimos cuadrados utilizando Matlab. Se denota la distancia tridimensional entre las parejas de esferas a partir de los centros calculados entre la esfera k y la esfera l como:

$$D_{i_{kl}} = \sqrt{(X_{i_k} - X_{i_l})^2 + (Y_{i_k} - Y_{i_l})^2 + (Z_{i_k} - Z_{i_l})^2} \quad (4.1)$$

para $i = 1, 2, \dots, 5$ orientaciones del patrón de esferas (Posición_Barra_Vertical, Posición_Barra_Horizontal, Posición_Barra_Diag45abajo, Posición_Barra_Diag45arriba y Posición_Barra_Diagdos45arriba respectivamente) y $D_{n_{kl}}$ como la distancia nominal calculada de las tablas de calibración del patrón entre las esferas k y l , se puede calcular el error en distancias que el brazo de medida comete entre las esferas k y l en las posiciones i del patrón como sigue:

$$E_{i_{kl}} = \sqrt{(D_{i_{kl}} - Dn_{i_{kl}})^2} \quad (4.2)$$

Este error corresponde a la desviación entre la distancia nominal del patrón y la distancia medida entre las esferas palpadas y el resultado del error volumétrico obtenido es de **0.98207 mm**, por lo tanto, es necesario optimizar los parámetros cinemáticos del BAMC realizando como primer paso un modelo cinemático del brazo de medición.

4.2. Desarrollo de modelo cinemático

El brazo de medida utilizado durante los ensayos realizados en este trabajo es un modelo comercial marca Faro Brazo Platinum, ver Figura 3.3, con número de serie: P08-05-0521419. El volumen de medida del brazo corresponde a un diámetro de esfera de 2.4 metros y su configuración cinemática es del tipo 2-2-3, dando un total de siete grados de libertad con giro ilimitado de sus articulaciones. De acuerdo a la información suministrada por el fabricante, la precisión del brazo en la prueba de rendimiento volumétrico es de ± 0.043 mm y la repetibilidad obtenida en la prueba de punto único es de 0.030 mm todas ellas ensayadas de acuerdo a la norma ASME B89.4.22.

Para el procedimiento para el diseño del modelo cinemático de un BAMC, se define la posición inicial del modelo con sus respectivos sistemas de referencia situados en las siete articulaciones del brazo en estudio, haciendo coincidir ésta con la posición cero de los encoders de las articulaciones, esto de acuerdo al modelo D-H. Se utiliza un parámetro más adicional θ_{0i} que establece el valor de giro entorno al eje Z de la articulación entre el sistema de referencia de la articulación i en posición nominal del modelo y el cero del encoder.

En la Figura 4.1 se observa la posición inicial del BAMC aplicando el modelo D-H, con los siete sistemas de coordenadas posicionados en las articulaciones del brazo partiendo de un sistema de referencia global x_0, y_0, z_0 y finalizando con el séptimo sistema de referencia ligado al palpador que se sitúa sobre la punta del mismo

denominándose x_7 , y_7 , z_7 o x_{palp} , y_{palp} , z_{palp} . La última articulación corresponde al giro de muñeca del palpador.

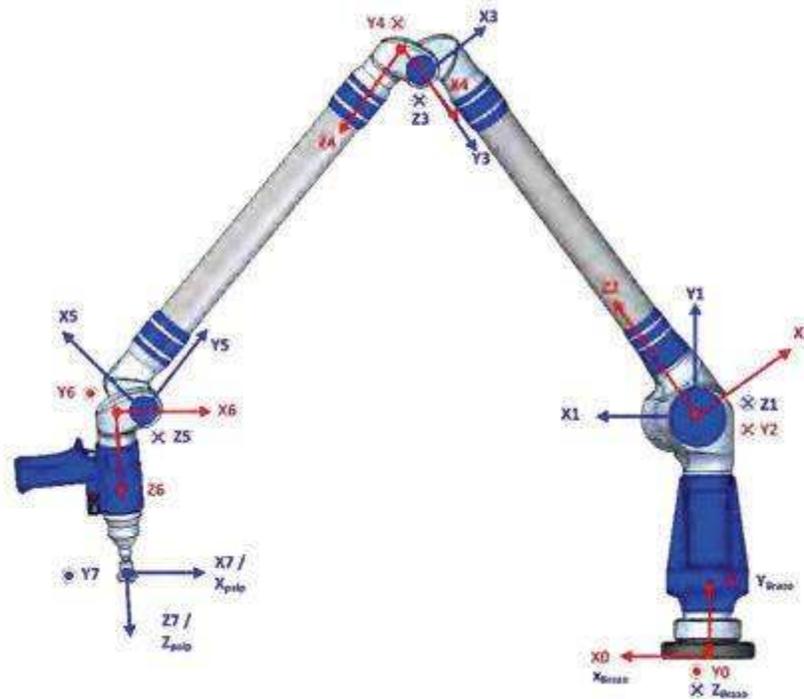


Figura 4.4 Sistemas de coordenadas en posición inicial para brazo FARO Platinum según modelo D-H.

Una vez definidos los sistemas de coordenadas del modelo, se determinaron los parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i que relacionan las distintas articulaciones en el modelado según D-H.

Los valores iniciales obtenidos para los parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i del modelo D-H en cada una de las siete articulaciones del brazo de medición se muestran en la tabla 4.1.

Articulaciones	θ_i (o)	α_i (o)	a_i (mm)	d_i (mm)
SR Brazo	Giro de -90° en torno a X_0			
1	0	90	50	75
2	135	90	0	0
3	0	-90	30	590
4	90	-90	30	0
5	180	-90	30	590
6	135	-90	30	0
7	0	0	0	215

Tabla 4.1. Valores iniciales de parámetros geométricos de un BAMC.

Por medio de transformaciones sucesivas de coordenadas mediante matrices de transformación desde el sistema global de referencia (x_0, y_0, z_0) hasta el sistema de referencia colocado en la punta del palpador $(x_{\text{palp}}, y_{\text{palp}}, z_{\text{palp}})$, es posible expresar las coordenadas de un punto medido con el palpador $X_{\text{Palp}}, Y_{\text{Palp}}, Z_{\text{Palp}}$ en sistema de referencia global del brazo (x_0, y_0, z_0) como se expresa en la ecuación (4,3).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{x_0, y_0, z_0 (SR0)} = {}^0T_7 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{x_{\text{palp}}, y_{\text{palp}}, z_{\text{palp}} (SR7)} \quad (4.3)$$

Siendo la matriz de transformación homogénea 0T_7 el producto en cadena de matrices de transformación de coordenadas sucesivas ${}^{i-1}A_i$ expresado como:

$${}^0T_7 = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^6A_7 \quad (4.4)$$

4.3 Optimización

La optimización de los parámetros cinemáticos a partir de los datos capturados se realizó con la aproximación por mínimos cuadrados, mediante el método de Levenberg-Marquardt, utilizado también como algoritmo de optimización como se menciona en el apartado 3.2.3. El brazo articulado de medición por coordenadas utilizado en este trabajo es un brazo modelo Faro Platinum con siete grados de libertad.

Para realizar la identificación y optimización de los parámetros cinemáticos del brazo articulado se utilizó el software Matlab versión 2011a. A continuación, se

describen las funciones empleadas para la realización de la optimización de los parámetros del BAMC.

Función **F_Brazo**: Cálculo de distancias entre puntos nominales. Esta función calcula y construye un vector con todas las distancias entre puntos nominales. La función devuelve un vector fila "F" que contiene los errores en distancias entre esferas capturadas.

- Primera etapa: se obtienen las distancias nominales de las esferas
- Segunda etapa: multiplicar la matriz de valores correspondiente a la posición de los encoders del brazo por los valores óptimos de los parámetros del modelado cinemático
- Tercera etapa: estimación del centro de las esferas
- Cuarta etapa: cálculo del centro de las esferas medidas
- Quinta etapa: cálculo de las distancias entre esferas medidas

Todo esto se realiza para cada orientación

Como resultado de la función anterior, se obtiene un vector renglón "F" que contiene todos los errores en distancias entre esferas medidas, además de generar archivos de texto en el cual se almacenan: el error máximo, el error mínimo, el error medio y el vector de errores. También genera un archivo donde se guardan los vectores creados con los valores óptimos obtenidos en las iteraciones realizadas a la hora de ejecutar la optimización.

Función **ModeloBrazo**: Modelado cinemático del brazo de medición por coordenadas. Es una función que calcula las coordenadas del extremo del brazo para una combinación de ángulos de las distintas articulaciones y parámetros geométricos. El cálculo matricial interno es realizado según el modelo Denavit-Hartenberg. Dentro de la función se encuentra el modelado cinemático del brazo y sus distintas transformaciones de valores de sistemas de coordenadas. Como salida se obtienen las coordenadas del extremo del brazo respecto el eje de coordenadas global interno del brazo.

Esta función tiene la siguiente línea de llamada:

- **Función:** [PosBrazoNuevo]=ModeloBrazo (Xnew, Ang)
- **Parámetros de entrada:**
 - Xnew: Vector renglón de 31 elementos que contiene las coordenadas finales del extremo del brazo (3 elementos) y los distintos parámetros necesarios para realizar el modelado cinemático del brazo por el método de Denavit-Hartenberg (4 parámetros x 7 articulaciones = 28 elementos), los cuales son:
 - θ_i Es el ángulo de la articulación del eje X_{i-1} al eje X_i respecto del eje Z_{i-1} (siguiendo la regla de la mano derecha).
 - d_i Es la distancia desde el 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} .
 - a_i Es la distancia de separación desde la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i hasta el origen del sistema i -ésimo a lo largo del eje X_i , (o la menor distancia o normal común entre los ejes Z_{i-1} y Z_i).
 - α_i Es el ángulo de separación del eje Z_{i-1} al eje X_i respecto del eje X_i (siguiendo la regla de la mano derecha).
 - Ang: Vector renglón de 7 elementos que contiene los valores iniciales de los ángulos de las diferentes articulaciones del brazo.
- **Parámetro de salida:**
 - PosBrazoNuevo: Vector columna de 4 elementos que muestra las coordenadas finales XYZ del palpador del brazo. Para obtener dicho vector, la función multiplica la matriz de 4x4 de cambio de base entre el sistema de referencia inicial y el sistema de referencia del palpador, por el vector columna de las coordenadas del palpador en el sistema de referencia del palpador. Siendo T la matriz de cambio de base. La ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_0 = T_n^0 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_n \quad (4.5)$$

Función **Optimiza_Parametros**: Optimización de parámetros cinemáticos del brazo de medición por coordenadas. Esta función optimiza los distintos parámetros del brazo de medición. Para ello a partir del vector renglón “F” resultado de la función “F_Brazo”. La función devuelve un vector de parámetros optimizados “X”

Esta función tiene la siguiente línea de llamada:

- Función:


```
[x,resnorm,residual,exitflag,output,lambda,jacob]=lsqnonlin(@F_Brazo,Brazo_iniciales,lb,ub,options);
```
- Parámetros de entrada:
 - F_Brazo: Vector con todos los errores en distancias entre puntos nominales que contienen las distintas distancias entre esferas. Se obtiene con la función anteriormente descrita “F_Brazo”.
 - Brazo_iniciales: Vector renglón de 28 elementos que contiene los distintos parámetros necesarios para realizar el modelado cinemático del brazo por el método de Denavit-Hartenberg (4 parámetros x 7 articulaciones = 28 elementos), los cuales están descritos en apartados anteriores.
 - lb y ub: son variables que se encargan de definir el rango de valores para una solución.
 - options: es la configuración de la función empleada que permite el ajuste de los distintos factores a aplicar en el proceso de mínimos cuadrados, donde se especifica lo siguiente: el valor de tolerancia de la función, de la variable, el número máximo de evaluaciones de la función y el número de iteraciones del ajuste.
- Parámetros de salida:
 - x: es el vector de parámetros optimizados. Con dichos parámetros generados se intenta minimizar el error en distancias en cada posición física.

4.3.1 Diseño de Interface

Se creó una interface como se muestra en la Figura 4.2, la cual puede ser utilizada para el brazo articulado de medición por coordenadas, para realizar el proceso de verificación tal y como se describe en el punto 4.1 del presente documento. También se agregó una sección donde pueden ser calculados los valores óptimos de los parámetros cinemáticos, donde se encuentra el valor del error volumétrico de acuerdo a la norma ASME B89 4.22. Este nuevo botón llama a la función “Optimiza_Parametros” la cual es definida en el punto anterior.

El proceso de optimización (como se muestra en la Figura 3.1 de la metodología) se llevó a cabo debido a que el valor del error volumétrico, calculado en el proceso de verificación, es mayor al valor del error establecido.

Se optimizaron los parámetros haciendo clic en el botón “iniciar”, después de un determinado tiempo se presionaron las teclas “control + C” para detener la operación, una vez detenido, se activó el botón “Valores” el cual muestra en la tabla del lado izquierdo, los valores de los parámetros optimizados. Se activaron los botones “Reiniciar” y “Guardar” y se guardaron los valores optimizados en un archivo de texto, para utilizar los valores como referencia en el siguiente proceso de verificación del BAMC. Una vez obtenidos los parámetros optimizados, se prosiguió con el cálculo del error volumétrico por segunda vez, con el fin de verificar que el nuevo valor de error se encuentra dentro de lo establecido por el fabricante. Véase la Figura 4.5.

Cálculo de error volumétrico mediante norma ASME B89.4.22

Error volumétrico:

Optimización de parámetros

	Ti	Al	a	d
1	43.6479	89.7380	75	0.6574
2	40.6436	89.4637	4.6117	137.1434
3	-26.5710	-89.8757	588.0762	-0.4082
4	-25.5840	-89.9351	-0.2980	130.0694
5	-28.5825	-89.8816	591.9595	177.4554
6	29.7436	-87.5741	-10.5470	135.9491
7	-0.1365	0	220.5385	-8.6530

Figura 4.5. Valores de los parámetros optimizados.

4.6 Aplicación

Esta es la última etapa del proyecto y consiste en certificar las piezas de tipo automotriz de la empresa NORTECH TECHNOLOGIES. El proceso de certificación consistió en demostrar por medio de una interface que las mediciones de la pieza cumplen con las tolerancias establecidas por el cliente, en este caso la pieza a certificar es la que se muestra en la Figura 4.6, la cual se compone por un plano, un cilindro y un cono como se observa en la Figura 4.7.



Figura 4.6. Pieza automotriz a certificar.



Figura 4.7. Secciones y formas de la pieza a medir.

El encargado de la empresa solicitó que se midiera la pieza como se muestra en la Figura 4.7, es decir se midió el plano de la pieza y las figuras que conforman la pieza que son un cilindro y un cono (Figura 4.8). Este tipo de pieza es un ensamble, por lo que se consideró importante verificar que la pieza cumpliera con las medidas que solicitó el cliente de la empresa.



Figura 4.8. Proceso de medición de la pieza.

Una vez concluido el proceso de medición de la pieza se continuó con el análisis de resultados, los cuales se observaron en la interface (Figura 4.9), para comprobar que las medidas tomadas de la pieza cumplen con lo establecido por la empresa que solicitó el servicio de certificación.

The screenshot displays a software interface titled "Mediciones de Figuras Geometricas" with three distinct sections for different geometric shapes:

- Cilindro:** A section for cylinder measurements. It features a text input field labeled "Diametro de cilindro" containing the value "35.0102". To the right of the input field are two buttons: "Calcular" and "Reiniciar".
- Plano:** A section for plane measurements. It displays three numerical values: "0.0125335", "-0.99992", and "0.00161887". The first two values are aligned with the label "cosenos directores" and the third with "del plano". To the right of these values are two buttons: "Calcular" and "Reiniciar".
- Cono:** A section for cone measurements. It features a text input field labeled "Diametro de cono" containing the value "28.2968". To the right of the input field are two buttons: "Calcular" and "Reiniciar".

Figura 4.9. Resultados de medición de la pieza con el BAMC.

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la verificación y optimización de parámetros de un brazo articulado de medición por coordenadas, también se incluyen los resultados de las mediciones de la pieza medida para la industria NORTECH TECHNOLOGIES.

La verificación del BAMC se realizó calculando el error volumétrico tomando como datos los centros de las 5 esferas (Figura 5.1) medidas en las posiciones explicadas en la sección 4.1 de esta tesis y los resultados fueron los siguientes:

- Error máximo: 1.7656 mm
- Error medio: 0.2629 mm
- Error mínimo: 0.0016 mm
- Error volumétrico: 0.9820 mm



Figura 5.1. Esferas medidas de la barra patrón utilizada.

Una vez realizada la optimización de parámetros se obtuvieron los parámetros óptimos para el BAMC, observar tabla 5.1.

Articulación	θ_i	α_i	a_i	d_i
SR Brazo	Giro de -90° en torno a X_0			
1	45.0002	89.7814	75	-1.4576
2	41.9082	89.4002	3.2241	137.1369
3	-26.3546	-89.8738	586.6332	-0.5430
4	-25.3234	-90.0196	-0.0975	130.1196
5	-28.9226	-89.7618	592.4981	177.6890
6	-503738	-96.9280	25.1674	115.1279
7	-0.3727	0	218.2483	-60.4733

Tabla 5.1. Valores óptimos de parámetros.

Los siguientes errores son los resultados de la verificación que incluye la prueba de error volumétrico con los parámetros ya optimizados:

- Error máximo: 0.4739 mm
- Error medio: 0.1180 mm
- Error mínimo: 0.0017 mm
- Error volumétrico: 0.02637 mm

Comparando los valores obtenidos antes y después de realizar la optimización de parámetros, como se observa de manera más grafica en la Figura 5.2, se comprueba que al realizar la optimización se reduce considerablemente los errores obtenidos en las mediciones realizadas con el BAMC, además el error volumétrico del brazo de medición asignado por el fabricante es de +/- 0.043 mm y el valor del error volumétrico obtenido con la optimización es de 0.02637 mm, por lo tanto las mediciones realizadas en la pieza que necesita certificar la empresa son confiables.

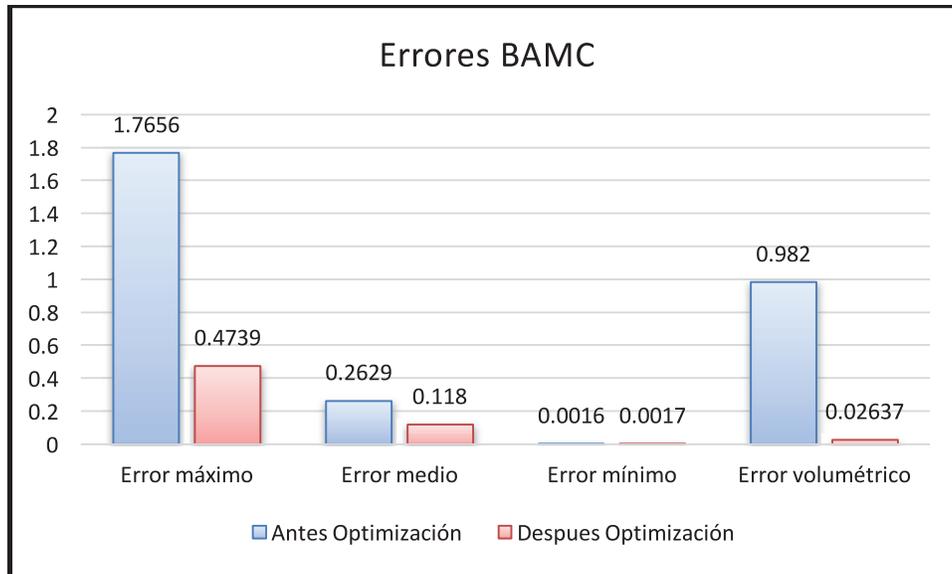


Figura 5.2. Errores de BAMC antes y después de la optimización de parámetros.

Resultados de las mediciones de la pieza medida para la industria NORTECH TECHNOLOGIES:

Diámetro de Cilindro	35.0102
Diámetro de Cono	28.2968
Cosenos directores del plano	0.0125
	-0.9999
	0.0016

Debido a que la empresa no continuó con el proyecto de la realización de este tipo de piezas, no se lograron obtener las tolerancias para hacer la comparación de las mediciones que se obtuvieron como resultado. Sin embargo, gracias a la interface programada con los parámetros óptimos del BAMC, es posible adaptarse en el futuro para que la empresa pueda medir cualquier pieza que tenga casi cualquier geometría.

6. CONCLUSIONES

El objetivo logrado de este trabajo fue optimizar los parámetros cinemáticos de un BAMC, por medio de la programación de una interface que permite la comunicación entre el brazo de medición y la plataforma de programación utilizada, así como la realización de la certificación de las piezas fabricadas por la industria NORTECH TECHNOLOGIES.

Primeramente, se realizó el procedimiento de verificación completo del brazo articulado de medición por coordenadas, calculando el error volumétrico siguiendo la norma ASME B89 4.22. Los resultados se calcularon con la ayuda del software Matlab y se plasmó en la sección de la interface desarrollada para este proceso. El resultado de la verificación muestra que el error obtenido es mayor al error establecido por el fabricante, por lo tanto, se concluyó que era necesario continuar con el procedimiento y realizar la optimización de parámetros del BAMC.

Para desarrollar la optimización del BAMC, primero se creó un modelo cinemático, utilizando el método D-H donde se definen los parámetros geométricos y la forma de establecer los sistemas de referencia en un brazo de medición. Una vez definidos los parámetros se determinaron los valores iniciales de los mismos. Posteriormente, se crearon funciones en Matlab que permitieran llevar a cabo la optimización de los parámetros y se mostraron los valores optimizados en una sección de la interface creada para este proceso. Al obtener los parámetros ya optimizados se realizó de nuevo el cálculo de error volumétrico y de acuerdo a los resultados vistos en el capítulo anterior, se concluyó que si se minimizaron los errores cometidos en las mediciones hechas en la barra patrón. Esto significa que los resultados de las mediciones que se tomaron en las piezas de una industria de máquina herramienta son confiables y a pesar de que la empresa ya no continuó con el proyecto de la fabricación de piezas, ellos tienen la confianza de realizar las mediciones de sus próximos proyectos con el BAMC calibrado.

7. REFERENCIAS

Acero R 2015, 'Desarrollo, implementación y ensayo de técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante plataforma multi-registro'. Universidad de Zaragoza, Ingeniería de diseño y Fabricación.

Agudelo R. H, and Parra W. O. 2011 "Medición e inspección de piezas utilizando brazos portátiles de medición por coordenadas", Universidad Eafit escuela de ingeniería.

Alici, G. And Shirinzadeh, B. 2005, 'A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing', Mechanism and Machine Theory. Doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.012.

ASME B89.4.22-2004, 2004. Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. , 23(1).

Borm, J.-H. And Meng, C.-H. 1991, 'Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure', The International Journal of Robotics Research. SAGE Publications, 10(1), pp. 51–63. Doi: 10.1177/027836499101000106.

Brau A, Santolaria J, Majarena A, Samper D, Velazquez J. 2014, 'Articulated arm coordinate measuring machine calibration by laser tracker multilateration', The Scientific World Journal. Doi: 10.1155/2014/681853.

Craig, John J, 2018, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", 4th Ed. Pearson Education International.

Driels, M. R. And Pathre, U. S. 1987, 'Generalized joint model for robot manipulator kinematic calibration and compensation', Journal of Robotic Systems. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 4(1), pp. 77–114. Doi: 10.1002/rob.4620040107.

Driels, M. R. And Pathre, U. S. 1990, 'Significance of observation strategy on the design of robot calibration experiments', *Journal of Robotic Systems*. Doi: 10.1002/rob.4620070206.

Encinas-osuna, I. and Brau-avila, A. 2016, 'Propuesta para la optimización de parámetros de un brazo articulado para la medición de coordenadas', pp. 147–152.

Encinas-Osuna I, Valenzuela-Galván M, Brau-Avila A, Benítez V, 2017, 'Desarrollo de una interface para la verificación de parámetros de un brazo articulado de medir por coordenadas', pp. 1–10.

Everett, L., Driels, M. And Mooring, B. 1987, 'Kinematic modelling for robot calibration', *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Doi: 10.1109/ROBOT.1987.1087818.

Everett, L. J. And Hsu, T.-W. 1988, 'The Theory of Kinematic Parameter Identification for Industrial Robots', *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Doi: 10.1115/1.3152658.

Gao, Q. Et al. 2013, 'Multiobjective optimization design of a fractional order PID controller for a gun control system', *The Scientific World Journal*. Doi: 10.1155/2013/907256.

Gong, C., Yuan, J. And Ni, J. 2000, 'Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Doi: 10.1016/S0890-6955(00)00023-7.

Gong C, Yuan J & Ni J 2000, 'A self-calibration method for robotic measurement system' *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol 122, no. 1, pp. 174-181.

González D 2013, 'Desarrollo de técnicas de mejora de la fiabilidad en la medición con brazos portátiles de medir por coordenadas', *Universidad de León*.

Hamana, H. *Et al.* 2011, 'Calibration of articulated Arm Coordinate Measuring Machine considering measuring posture', *International Journal of Automation Technology*.

Hartenberg, R. S. And Denavit, J. 1955, 'A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on metrics', *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*. Doi: citeulike-article-id:7153318.

Hayati, Samad 1983, 'Robot arm geometric link parameter estimation', in *IEEE Conference on Decision and Control*. Doi: 10.1109/CDC.1983.269783.

Hayati, S. And Mirmirani, M. 1985, 'Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators', *Journal of Robotic Systems*. Doi: 10.1002/rob.4620020406.

Hayati, S., Tso, K. And Roston, G. 1988, 'Robot geometry calibration', *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Doi: 10.1109/ROBOT.1988.12181.

Hernández, M. I. O. I. and Reyes, M. C. E. A. 2010, "Ensayos de la Norma ISO / DIS 10360-2". Available at:
[http://www.cenam.mx/ammc/eventos/evento2010/presentacion final ISO 10360-2-2010-EAR.pdf](http://www.cenam.mx/ammc/eventos/evento2010/presentacion%20final%20ISO%2010360-2-2010-EAR.pdf).

Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, B.-L. P. (2014) Metodología de la investigación.

Hollerbach, J. M. And Wampler, C. W. 1996, 'The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods', *The International Journal of Robotics Research*. Doi: 10.1177/027836499601500604.

ISO 2001, 'Geometrical Product Specifications (GPS) Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 1: Vocabulary', *ISO 10360*.

ISO 10360-2:2009, 2009 Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). CMMs used for measuring linear dimensions.

Kovač, I. And Frank, A. 2001, 'Testing and calibration of coordinate measuring arms', *Precision Engineering*. Doi: 10.1016/S0141-6359(00)00057-X.

Levenberg, K. 1944, 'A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least-Squares', *Quarterly of Applied Mathematics*.

Madruga D.G 2013, Desarrollo de técnicas de mejora de la fiabilidad en la medición con brazos portátiles de medir por coordenadas. , p.231.

Mecafenix F, 2018, 'Encoder ¿Como Funciona? y Sus Tipos' *Ingeniería Mecafenix*, www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/.

Mutitoyo corporation, 2014, Palpadores. Available at: <http://www.mitutoyo.com.mx/Descargas/Folletos/new/Palpadores.pdf>.

Nubiola, A. And Bonev, I. A. 2014, 'Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar', *Precision Engineering*. Doi: 10.1016/j.precisioneng.2014.01.001.

Ostrowska K, Gaska A, 2016, 'Verification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Accuracy Using LaserTracer System as Standard of Length', *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, 31(4), pp. 241–256. doi: 10.1007/s12647-016-0176-2.

Santolaria, J, A. 2014, 'Evaluation of different probing systems used in articulated arm coordinate measuring machines', *Metrology and Measurement Systems*. Doi: 10.2478/mms-2014-0020.A.

Santolaria, J., Brau, A., Velázquez, J., Aguilar, J. 2010 'A self-centering active probing technique for kinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring machines', *Measurement Science and Technology*. Doi: 10.1088/0957-0233/21/5/055101.

Santolaria J, Conte J, Pueo, M 2014, ROTATION ERROR MODELING AND IDENTIFICATION FOR ROBOT KINEMATIC CALIBRATION BY CIRCLE POINT

METHOD. *Metrology and Measurement Systems*, 21(1), pp. 85-98. Retrieved 25 May. 2017, from doi:10.2478/mms-2014-0009

Santolaria, J. *Et al.* 2011 'A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Doi: 10.1016/j.rcim.2010.07.008.

Santolaria, J., Conte, J. And Ginés, M. 2013 'Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Doi: 10.1007/s00170-012-4484-6.

Sladek, J. And Gaska, A. 2012, 'Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method', *Measurement*. Doi: DOI 10.1016/j.measurement.2012.02.020.

Sladek, J., Ostrowska, K., Gaška, A. 2013, 'Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Doi: 10.1016/j.measurement.2012.08.026.

Standardization, I. O. 2008, Evaluation of measurement data — *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, *International Organization for Standardization*. Doi: 10.1373/clinchem.2003.030528.

Stone H, Sanderson A, And Neuman C 1986, 'Arm signature identification', *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Doi: 10.1109/ROBOT.1986.1087664.

Tao, P. 2012, 'Product-of-exponential (POE) model for kinematic calibration of robots with joint compliance', in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*. Doi: 10.1109/AIM.2012.6266002.

T. W. Hsu and L. J. Everett 1985 , “Identification of the kinematic parameters of a robot manipulator for positional accuracy improvement,” in *Proceedings of the Computation in Engineering Conference*, pp. 263–267.

Unai M, Gorka K, Olarra A, Gutiérrez A, Gomez-Acedo E, Zubieta M, 2013, ‘Performance calibration of articulated arm coordinate measuring machine’, *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 63, pp. 720–727. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.264.

VDI/VDE-GMA-Fachausschuss „Industrie4.0“ 2014, *Industrie 4.0 - Auf dem Weg zu einem Referenzmodell, Statusreport*.

Veitschegger W. K, And Wu C.-H 1987, ‘A method for calibrating and compensating robot kinematic errors’, in *Proceedings 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Doi: 10.1109/ROBOT.1987.1087839.

Veitschegger W. And Wu C.-H 1986, ‘Robot accuracy analysis based on kinematics’, *Robotics and Automation, IEEE Journal of*. Doi: 10.1109/JRA.1986.1087054.

Yang X 2014 ‘A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Doi: 10.1016/j.rcim.2013.11.002.

Weckenmann A, Estler T, Peggs G, McMurtry D, 2004, ‘Probing Systems in Dimensional Metrology’, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2), pp. 657–684. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60034-1.

West Instruments de México, 2012, ‘Manual de Aplicación de Encoders’. Available at: <https://www.amee.com.mx/ENCODERS.pdf/>.

Zheng D, Yin S, Luo Z, Zhang J, Zhou T. 2016, ‘Measurement accuracy of articulated arm CMMs with circular grating eccentricity errors’, *Measurement Science and Technology*. IOP Publishing, 27(11), p. 115011. doi: 10.1088/0957-0233/27/11/115011.

Zhuang, H. And Roth, Z. S 1992, 'Robot calibration using the CPC error model', *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Doi: 10.1016/0736-5845(92)90027-4.

Zhuang H, Roth Z, And Hamano F 1992, 'A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulators', *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Doi: 10.1109/70.149944.